

調査を開始し、ノーマルカメラと赤外線カメラの準備、撮影、片づけ、カウントを含めて、1 時間程度で終了する。本手法は、2 機のドローンを使用する必要があり、1 日 1 か所の調査しか行うことができなかったが、調査時間を目視で行う調査より、約 2 時間作業時間を短縮することができる。調査人数も 1 人で可能であるため、時給を 1,000 円と仮定すると、目視カウントと比べ、ねぐら・コロニー 1 か所あたり 5,000 円の人件費の削減が期待できる。

表 2 目視による調査とドローンによる調査の費用比較

	目視	赤外線	赤外線 ノーマル
調査時間 [h]	3	0.5	1
調査人数 [人]	2	1	1
カウント時間 [分]		5	10
時給 [円]		1,000	
機体の代金 [万円]		125	145
人件費 [円]	6,000	500	1,000

② ねぐら・コロニーの合成画像における自動カウントアプリの有効性の検証

手動カウントと自動カウントのカウント数について比較した結果、有意に手動カウントのカウント数の方が自動カウントのカウント数より高かった（ウィルコクソン符号付順位和検定、 $n=40$ 、 $p<0.01$ ）。

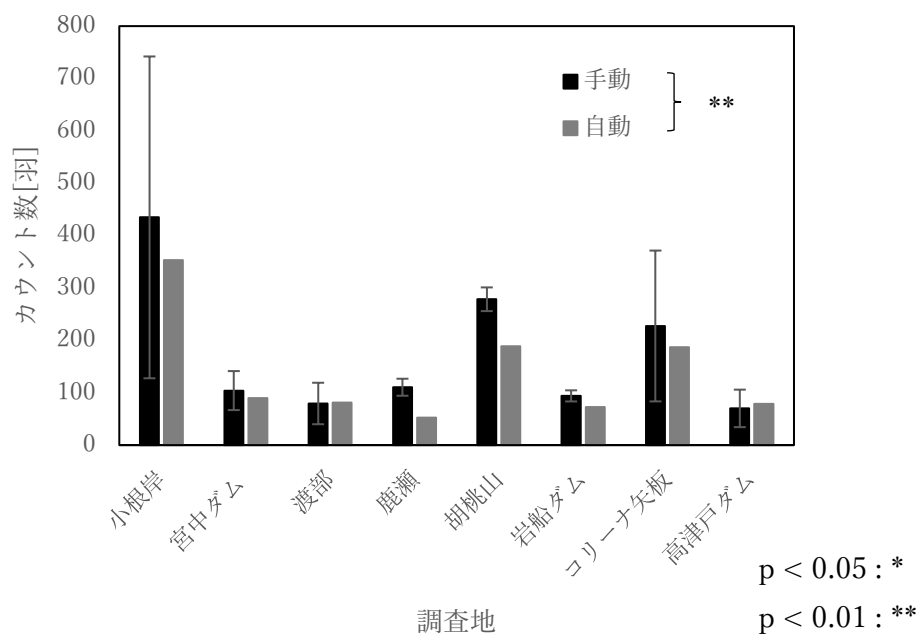


図 12. 調査地ごとの手動カウントと自動カウントの結果

(小根岸 ; n=3, 宮中ダム ; n=4, 渡部 ; n=1, 鹿瀬 ; n=1, 胡桃山 ; n=1, コリーナ矢板 ; n=5, 高津戸ダム ; n=5)

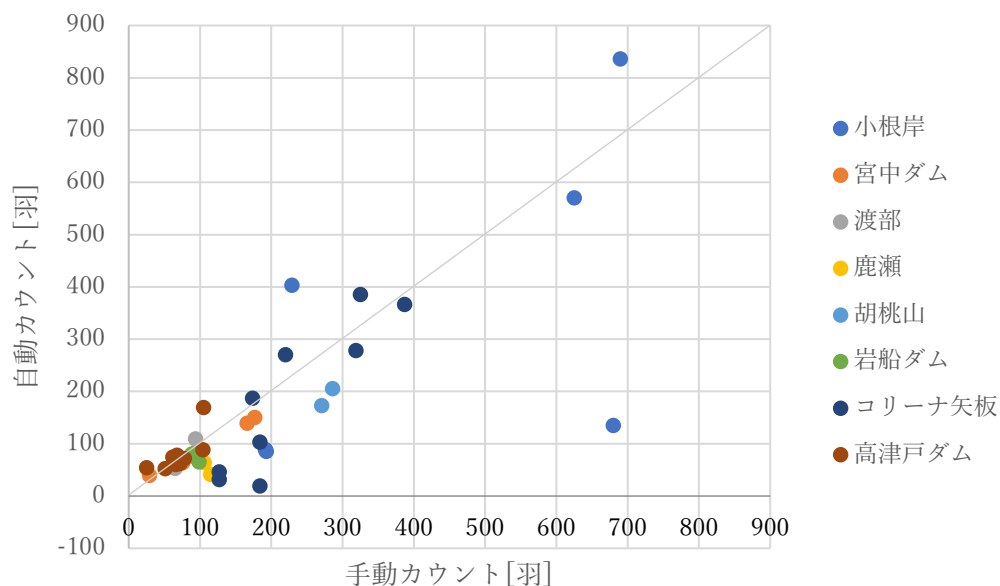


図 13. 手動カウントと目視カウントの比較

ドローンによるカウント数と目視によるカウント数の差を比較するため $Y=x$ の直線を挿入した。(小根岸 ; n=3, 宮中ダム ; n=4, 渡部 ; n=1, 鹿瀬 ; n=1, 胡桃山 ; n=1, コリーナ矢板 ; n=5, 高津戸ダム ; n=5)

表 3 各ねぐら・コロニーの手動カウントと自動カウントの結果

	小根岸	宮中ダム	渡部	鹿瀬	胡桃山	岩船ダム	コリーナ矢板	高津戸ダム
n	6	8	2	2	2	2	9	9
手動-自動[羽]	81.8±258.4	14.5±11.8	-3.5±12.0	58.0±22.6	89.5±12.0	21.5±17.7	40.2±73.6	-8.7±24.8
$\frac{\text{手動}-\text{自動}}{\text{自動}}[\%]$	99.3±164.7	11.6±19.0	4.4±25.7	123.1±81.2	48.1±12.1	31.8±29.0	156.9±288.6	-7.8±24.9

本調査の結果、自動カウント数は手動カウント数に比べて統計的に有意に小さくなった（図 12）。本研究で用いたエッジ検出は、画像のピクセルのスペクトル値を参照して、その設定した閾値より上もしくは下の値を持つセグメントをカウントする技術である。手動カウントの結果よりも自動カウントの結果の方が、値が小さくなった理由として、エッジ検出に失敗した可能性がある。エッジ検出の際に行うモルフォジー処理によって、エッジが膨張し、密集したカワウや白く表現された木の枝や葉を、まとめて 1 つとしてとらえてしまったケースが観察された。これによりカワウの個体数を過小評価してしまった可能性がある。

自動カウントの精度が下がる要因として、撮影されたカワウの画像内の個体サイズのバラつきがあげられる（Dominique *et al.* 2016）。奥行が大きい画像では、遠近感で個体サイズのバラつきが大きいため、小さく映った個体が、画像処理の最終工程であるサイズが小さいものを除去する際に消去されてしまった可能性がある。コリーナ矢板や、高津戸ダムコロニーでは、上空から垂直方向に撮影を行ったが、これらのコロニーは傾斜の大きい河畔に位置しており、垂直方面の奥行きが大きい。そのため、樹冠部に位置するカワウと樹木の下部に位置するカワウにサイズ差が生じた。前述のような検出時の差が生まれ、過小評価されている可能性がある（図 13）。一方、コリーナ矢板コロニーや高津戸コロニーと同じように傾斜の大きい樹林に分布する宮中ダムコロニーでは、コロニーの斜面を、水平方向から撮影を行ったため、撮影されたカワウの個体サイズのばらつきが少なく、自動カウントと手動カウントの誤差が小さくなったと考えられる（表 3）。よって、個体サイズのバラつきを抑えるためには、カワウが樹木に垂直に分布する立体的なねぐら・コロニーでは、樹木に対して垂直方向ではなく、水平方向から撮影することで、カワウの個体サイズのばらつきが減少するため、カウントの精度が高まり、平地にある樹木に平面的にカワウが位置するねぐら・コロニーでは、上空から垂直方向から撮影することで、自動カウントの精度を上げることが可能と思われる。

本調査で用いたアプリケーションを改良することでカウントの誤差を少なくなると考えられる。具体的には、個体サイズのバラつきを補正する処理や、密集している個体を個別にカウントできるような処理があげられる。エッジ検出を拡張した「教師あり」処理（お手本になるデータを学習させて、それに似たものを分類する処理）や機械学習などで解決できる可能性がある。

③ドローンを用いたカワウのねぐら・コロニーカウントの有効性と費用対効果についてそれぞれのねぐら・コロニーの条件に合わせて、使用するドローンとそのカメラの撮影の

設定条件、撮影する方向をねぐら・コロニーの形状に合わせて設定することで、ドローンを用いたカウントを利用することができる。

2019 年までの調査から、日没後のノーマルカメラによる撮影は、照度が 10 Lux 程度となる日没 20 分後まで撮影可能であることが示唆された。照度 10 Lux 程度までであれば、撮影時のカメラ設定は、オートモードでもカワウの検出が可能であった。カワウだけが繁殖しているねぐら・コロニーにおいて、赤外線カメラを搭載したドローンによるカウントは、日没 30 分後以降に撮影することで個体数カウントができることが示唆された。

サギ類とカワウが混在するねぐら・コロニーについては、日没直後から日没 20 分後までにノーマルカメラの撮影によって白く写ったサギ類のカウントを行い、日没 30 分後に赤外線カメラで撮影し、カワウとサギ類を含めた総生息数からサギ類のカウント数を引くことで、サギ類が同居するねぐら・コロニーにおいてもカワウの個体数を推定することができる。

ドローンを用いた調査手法の利点と欠点を考慮し、各ねぐら・コロニーに適した調査手法を選択できるような、フローチャートを作成した（図 14）。

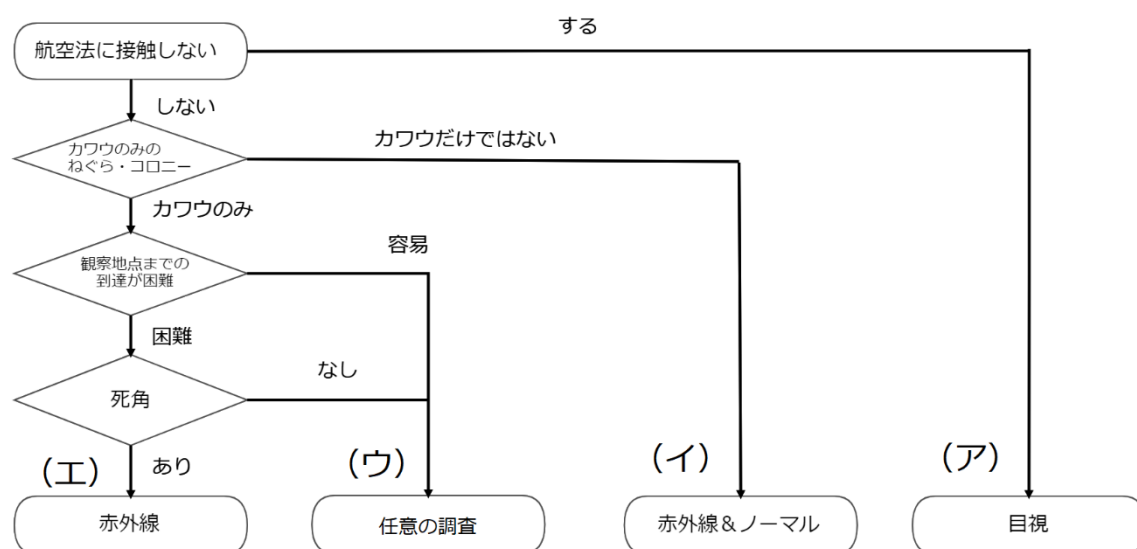


図 14. カウント手法を選ぶ際のフローチャート

調査手法は、目視、赤外線カメラによるカウント、ノーマルカメラと赤外線カメラを用いたカウント、任意のカウント（ドローンと、目視どちらを用いてもよい）の 4 項目に分けた。空港周辺や、人口密集地域は、ドローンの飛行には許可が必要であり、許可を取らない場合は目視による調査を行う必要がある（国土交通省 2019）。また、市街地付近のねぐら・コロニーは堤防なども整備され、比較的調査地までのアクセスが良いことが多い。よって、図 14 の（ア）のように目視カウントが適している。続いて、ねぐら・コロニーにサギ類などのカワウ以外の鳥類が混在する場合は、図 14 の（イ）のようにノーマルカメラと赤外線カメラを併用した調査が適している。カワウのみのねぐら・コロニーの場合、観察地点までの到

達が容易であれば、図 14 の(ウ)のように任意の調査を選択できる。観察地点に死角（観察地点が、一部が葉や枝などで隠れている場合や、河川の中州に位置しており対面側が見えない場合など）がある場合は、図 14 の(エ)のように赤外線カメラによるカウントを選択し、死角がない場合は図 14 の(ウ)のように任意の調査を選択できる。このフローチャートを参考にすることで、ねぐら・コロニーに適した手法を選ぶことができ、調査活動のコストカットや調査時間の短縮が期待できる。

実際の現場で、本研究で用いたドローンによるカウント調査を導入した場合、具体的にどのくらいの費用削減が可能か、またどのくらい調査時間の短縮や労働力の削減が可能か、新潟県のねぐら・コロニー調査を例に試算を試みた。

新潟県には現在、調査すべきねぐらコロニーが 13 か所存在し、1 年に各 3 回（4~5 月、7 月、11~12 月）の調査が必要である。図 14 のフローチャートを利用して、それぞれのねぐら・コロニーに適した調査を適用する（表 4）。

表 4 新潟県内のコロニーと選択した調査法

ねぐらコロニー名	調査法
福島潟	赤外線 & ノーマル
胡桃山	赤外線 & ノーマル
鹿瀬	赤外線 & ノーマル
塩谷	赤外線
李崎町	目視
小根岸	赤外線 & ノーマル
加茂湖	赤外線 & ノーマル
渡部	赤外線
奥三面	赤外線
岩船ダム	赤外線
瀬波	赤外線
中条ノ池	赤外線 & ノーマル
宮中ダム	赤外線 & ノーマル

表5 赤外線カメラ搭載ドローンを用いた調査の順序

調査順	経路1	経路2
1	塩谷	岩船
2	渡部	瀬波
3		奥三面

表6 調査共通の条件設定

共通条件	
出発地点	長岡技大
時給[円]	1000
交通費[円/km]	20円/km
車	普通車
高速道路料金	一般
距離計算	Googlemap https://www.google.co.jp/maps/?hl=ja

調査に出発する地点を長岡技術科学大学と仮定し、調査者の人数は、目視が2人、ドローンを用いる場合を1人とした。1人当たりの時給は1000円、目視による調査時間は3時間、赤外線カメラによる調査時間は0.5時間、赤外線カメラとノーマルカメラによる調査時間を1時間とした。交通手段には普通車を利用し、高速道路の利用料金は一般ゲートを通ることとした。1kmあたりの交通費を20円とし、経路の距離計算はGoogle Map (Google Inc, California of U.S.)を利用した(表6)。赤外線カメラを用いた調査を行う、5か所のねぐら・コロニーを2か所と3か所をそれぞれ1晩で調査することとし、移動時間が最短となるような調査順序を設定した(表5)。

表 7 目視のみの調査を適用した場合の詳細

ねぐら・コロニー名	往復距離[km]	移動時間[h:mm]	交通費[円]	高速料金[円]	人件費[円]
福島潟	166	2:20	3,320	4,380	6,000
胡桃山	146	1:40	2,920	3,900	6,000
鹿瀬	218	3:20	4,360	5,840	6,000
塩谷	68	1:40	1,360	0	6,000
李崎町	30	1:00	600	0	6,000
小根岸	72	2:00	1,440	0	6,000
加茂湖	272	8:00	5,440	1,740	6,000
渡部	56	1:40	1,120	0	6,000
奥三面	340	5:40	6,800	5,880	6,000
岩船ダム	264	5:40	5,280	5,880	6,000
瀬波	246	5:20	4,920	5,880	6,000
中条ノ池	122	2:00	2,440	1,740	6,000
宮中ダム	108	2:40	2,160	0	6,000

表 8 目視とドローン調査を適用した場合の詳細

ねぐら・コロニー名	手法	往復距離[km]	移動時間[h:mm]	交通費[円]	高速料金[円]	人件費[円]
経路1	赤外線	91.9	2:10	1,838	0	1,000
経路2	赤外線	412	7:05	8,240	5,880	1,500
胡桃山	赤外線 & ノーマル	146	1:40	2,920	3,900	1,000
鹿瀬	赤外線 & ノーマル	218	3:20	4,360	5,840	1,000
小根岸	赤外線 & ノーマル	80	2:00	1,600	0	1,000
加茂湖	赤外線 & ノーマル	272	8:00	5,440	1,740	1,000
中条ノ池	赤外線 & ノーマル	122	2:00	2,440	1,740	1,000
福島潟	赤外線 & ノーマル	166	2:20	3,320	4,380	1,000
李崎	目視	30	1:00	600	0	6,000
宮中ダム	赤外線 & ノーマル	108	2:40	2,160	0	1,000

表 9 目視のみと目視とドローンを組み合わせた場合の予算

手法	目視	目視とドローン
1シーズンの調査回数	13	10
年間総人件費[円]	234,000	46,500
年間総交通費[円]	126,480	98,754
年間総高速道路費[円]	105,720	70,440
年間総額[円]	466,200	215,694

表 10 ドローンを用いた調査に必要な初期予算

物品	費用
Inspire1	800,000
Zenmuse XT	450,000
総額	1,250,000

表 11 目視のみと目視とドローンを組み合わせた場合の調査時間

手法	目視	目視とドローン
1シーズンの調査回数	13	10
年間調査日数[日]	39	30
年間総調査時間[h]	117	37.5
年間総移動時間[h]	129	96.4
年間活動時間[h]	246	134

これらの仮定で全て目視による調査と、ドローンを用いた調査の2つを比較したところ、年間約 25 万円の差が生まれた（表 9）。これは、ドローンの調査環境を整えるためにかかる費用（表 10）の、約 20 %にあたり、約 5 年調査を継続することで精算することができる（ドローンの耐用年数は約 5 年）。調査にかかる日数、時間についてはドローンを用いた場合は目視のみの調査に比べて、9 日従事日数が低減でき、移動時間を含めた総活動時間は約 112 時間短縮できることが示唆された（表 11）。本考察での試算は目安ではあるが、ドローンを活用することで確実に予算と調査時間が削減できることが示唆された。ねぐら・コロニ

一の母数と、ドローンを活用できる箇所が多い都道府県では、さらに多くの予算と調査時間を低減することができると予想される。

本研究で用いたドローンである、Inspire1 と Zenmuse XT は現在、生産中止となっている。そのため、赤外線カメラによるカウント調査を行うには、後継機である Zenmuse XT2 (FLIR Systems, Inc, <https://www.dji.com/jp/zenmuse-xt2?site=brandsite&from=nav>) を用いるのが妥当と思われる。価格は本研究で用いた Zenmuse XT と同程度の約 80 万円である。産業向け高性能機である DJI MATRICE シリーズ (DJI 社, <https://www.dji.com/jp/matrice-200-series#m200s-s6>) に装着が可能である。DJI MATRICE シリーズは約 60 万円で購入可能である。Zenmuse XT2 は Zenmuse XT と同性能の赤外線カメラに加え、Mavic2 Enterprise Dual と同性能なノーマルカメラを内蔵しているため、サギ類が同居するねぐら・コロニーにおいても、ノーマルカメラと赤外線カメラを使用し、1 台で調査が可能となる。

ABI Research 社 (2016) の予測によれば、ドローン市場は 2016 年の 39 億ドルから、2019 年には 90 億ドルに達すると予測しているなど、今後もドローン市場は拡大していくとみられ、高性能で安価な機体が流通する可能性が高い。高性能で安価が流通することで、ドローンを用いた調査が一般的なものとなっていく、画像処理による自動カウントも実現し、カワウの個体数把握がより容易になっていくことが期待される。

2) 漁場におけるドローンを用いた飛来数調査

6 月から 8 月にかけて河川横断物、人工護岸、自然護岸の 3 か所をランダムに計 18 回調査を行った。データ回収は 4 回で、7,8 月にかけて雨と霧の影響により調査を行えない日がほとんどであった(表 12 - 14)。

また、9 月から 10 月にかけて河川横断物については追加で 7 回調査を行い、4 回データを回収した。3 回は雨により調査が行えなかった(表 14)。

表 12 自然護岸調査結果

	場所	時間	採餌個体数	休息個体数	合計
6 月 5 日	3	4:16	0	0	0
6 月 8 日	4	5:03	0	0	0
6 月 16 日	5	6:20	0	0	0
6 月 17 日	1	4:32	1	0	1

表 13 人工護岸調査結果

	場所	時間	採餌個体数	休息個体数	合計
6 月 5 日	3	6:03	0	0	0
6 月 8 日	4	5:40	0	0	0

6 月 16 日	5	5:43	3	108	111
6 月 17 日	1	5:51	0	0	0

表 14 河川横断物調査結果

	場所	時間	採餌個体数	休息個体数	合計
6 月 5 日	宮中	5:11	0	1	1
6 月 8 日	妙見堰	4:13	2	0	2
6 月 16 日	妙見堰	4:54	0	0	0
6 月 17 日	宮中	4:55	4	2	6
9 月 22 日	宮中	5:32	25	6	31
9 月 23 日	妙見堰	5:28	1	0	1
9 月 24 日	宮中	5:39	8	3	11
9 月 29 日	宮中	5:39	7	17	24

飛来数調査結果を表 12 - 14 にそれぞれまとめた。自然護岸に比べて、人工護岸のほうが採餌個体数、休息個体数は多かった。宮中ダムは採餌個体が最も多く合計で 73 羽飛来が確認された。ダムから 250 m 離れた位置にカワウのねぐらがあり、採餌しやすい魚種と環境を選択するカワウにとって採餌場として利用しやすいことが示唆される。一方で妙見堰については合計で 2 羽飛来が確認された。

河川横断物で最も飛来個体数の多かった宮中ダムの魚道での採餌がほとんどであった(図 15)。宮中ダムは魚道にプール式と呼ばれる魚道を設置している(国交省信濃川河川事務所 2013)。魚道内を多数の比較的大規模な隔壁で仕切って流速を抑える形式で、低流速の湛水域(プール)ができる(国交省 2005)。しかし、プール式に分類される階段式魚道では遡上を阻害しており(小坂ほか 2013, 鬼束ほか 2017)、滞留したところをカワウが採餌場として利用していることが示唆された。