

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

フィールド調査とロボット・センサ・通信技術をシームレスに連結する水域
生態系モニタリングシステムの開発

(1-1602)

平成28年度～平成30年度

Development of Aquatic Ecosystems Monitoring System that Seamlessly Connects Field Investigation and
Robot, Sensor and Communication Technology

〈研究代表機関〉

東京大学

〈研究分担機関〉

酪農学園大学

北海道大学

宮城県伊豆沼・内沼環境保全財団

〈研究協力機関〉

バードリサーチ

2019年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	1
2. 研究開発目的	1
3. 研究開発の方法	2
4. 結果及び考察	3
5. 本研究により得られた主な成果	5
6. 研究成果の主な発表状況	7
7. 研究者略歴	9
II. 成果の詳細	
II-1 ロボットボートによる生態系モニタリング及びマネジメント（サブテーマ1）	10
（東京大学）	
要旨	10
1. はじめに	10
2. 研究開発目的	12
3. 研究開発方法	12
4. 結果及び考察	19
5. 本研究により得られた成果	28
6. 国際共同研究等の状況	29
7. 研究成果の発表状況	29
引用文献	30
II-2 ドローンを用いた空中からの広域生物相モニタリング	31
（酪農学園大学）	
要旨	31
1. はじめに	31
2. 研究開発目的	32
3. 研究開発方法	32
4. 結果及び考察	36
5. 本研究により得られた成果	45
6. 国際共同研究等の状況	46
7. 研究成果の発表状況	46
引用文献	48
II-3 センサネットワークによる地上・水面からの生物相モニタリング	49
（北海道大学）	
要旨	49
1. はじめに	49
2. 研究開発目的	50
3. 研究開発方法	50

4. 結果及び考察	57
5. 本研究により得られた成果	64
6. 国際共同研究等の状況	65
7. 研究成果の発表状況	65
引用文献	67
II-4 モニタリング技術の適正運用に向けたマニュアル・ガイドラインの作成……………	68
(宮城県伊豆沼・内沼環境保全財団)	
要旨	68
1. はじめに	68
2. 研究開発目的	68
3. 研究開発方法	69
4. 結果及び考察	72
5. 本研究により得られた成果	82
6. 国際共同研究等の状況	82
7. 研究成果の発表状況	82
引用文献	84
III. 英文Abstract ……………	85

I. 成果の概要

課題名 1-1602 フィールド調査とロボット・センサ・通信技術をシームレスに連結する水域生態系モニタリングシステムの開発

課題代表者名 海津 裕（東京大学大学院農学生命科学研究科生物・環境工学専攻 准教授）

研究実施期間 平成28～30年度

累計予算額 99,276千円

（うち平成28年度：33,653千円，平成29年度：33,653千円，平成30年度：31,970千円）

累計予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 水域生態系，水鳥調査，水草管理，昆虫調査，植生モニタリング，ドローン，ガイドライン，ロボットボート，フィールドカメラ，自動画像計測

研究体制

- (1) ロボットボートによる生態系モニタリングおよびマネジメント（東京大学）
- (2) ドローンを用いた空中からの生物相モニタリング（酪農学園大学）
- (3) センサネットワークによる地上・水面からの生物相モニタリング（北海道大学）
- (4) モニタリング技術の適正運用に向けたマニュアル・ガイドラインの作成（宮城県伊豆沼・内沼環境保全財団）

研究協力機関

バードリサーチ

1. はじめに（研究背景等）

我が国には、50ものラムサール条約湿地がある。それらの湿地や全国に点在する湖沼は、ガンカモ類等の渡り鳥の飛来地や貴重な生物の生息場として機能しており、生物多様性の重要なスポットである。また、水資源、防災、観光資源、環境教育などの生態系サービスを提供している貴重な自然資源でもある。一方で、干拓や護岸工事、水質汚濁、外来生物の移入に見られる人間活動の影響により、多くの湿地の生態系は消滅するか、消滅を免れても劣化が進行しており、先の生物多様性の場や生態系サービスという機能が失われつつある。そうした湿地の保全・再生のためには、絶えず変化する生態系をより広い視野で精密に監視すること、その結果を順応的管理に迅速に反映させることが望ましい。しかし、生態系の監視には、時間と労力という面で莫大なコストがかかることから、十分な情報が得られずに保全や再生の推進に支障をきたす場合が多い。

近年、ロボットおよび情報通信技術の進歩は目覚ましく、それらの生態系監視技術への活用が注目を集めている。しかし、機器やアプリケーションの扱いが煩雑で容易に使用できず、なおかつ高価であることから管理や調査レベルでの実用化が遅れている。そのような障害を無くし、現場管理者や調査者と最新技術をシームレスに繋ぐためには、現地調査、機器開発、情報処理の専門家の連携によって監視・管理技術の開発を推進することが肝要である。

本研究では、保全や再生の推進とフィールド調査と最新技術をシームレスに繋ぐことを目標として、1)低コスト化・効率化を実現するための監視・管理技術の開発、2)安全で簡便な監視や管理を実現するためのガイドライン・マニュアル作成を行う。これらにより、全国の湿地でのモニタリングへの展開が容易になり、保全・再生活動の促進に寄与できるものと考えている。

2. 研究開発目的

サブテーマ1の目的は、最新のロボット・情報通信技術を応用し、保全現場にとって扱いやすい水生植物の刈払い用ロボットボートを開発し、開発したロボットボートによる自動管理作業の有効性を実証することである。ここで開発するロボットボートは、刈払いだけでなく、画像処理を用いた近接リモートセンシング技術により障害物回避や水草の種判別を行う

研究期間における刈払い対象は夏季の伊豆沼に生育するハスとするが、最終目的としては日本全国の湖沼、ため池、河川等のハスやヒシ、オオカナダモなどの水生植物の低コストな管理手法を提供することである。

サブテーマ2では水鳥類および生息域の周辺植生を対象として、ドローンを用いた効率的なモニタリングシステムの開発、検証を行うことを目的とした。

水鳥類や植生のモニタリングに適したドローンのセンサやカメラの設定、撮影方法などの検証、個体数の計測やインベントリーの作成を自動化する水鳥のモニタリングシステムの開発・検証、湿地生態系の劣化要因である開放水面の減少や外来植物の侵入など植生を含めた周辺の土地被覆の把握とデータの蓄積、そして、今回開発するモニタリングシステムの実用可能性について、利用可能性、ユーザビリティ、機器の汎用性から検討する。

サブテーマ3では湿地の代表的な生物である水鳥、昆虫類、水生生物を対象として、高解像度のネットワーク型全周魚眼カメラと画像処理による自動個体数計測を組み合わせたモニタリングシステムの開発を行うことを目的とした。その際、最新のセンサおよび通信モジュールを用い、小型で低コスト、なおかつ、耐久性、ユーザビリティの高いシステムの開発を目指した。

サブテーマ4では、サブテーマ1から3で開発される各システムの構築に資する環境情報の収集やハス刈りロボットポートやネットワークカメラの開発初期段階の試験におけるシステム運用に関する情報収集、ドローンによる監視が水鳥などの野生生物に及ぼす影響の評価、またそれに基づく「ドローンを活用したガンカモ類調査ガイドライン」の作成を目的とした。

3. 研究開発の方法

(1) ロボットポートによる生態系モニタリング及びマネジメント

サブテーマ(1)では、ハスを対象として、その省力的かつ低コストな管理手法としてロボットポートの開発を行い、その有効性について検証することを目的として下記の項目を実施した。

① ロボットポートの開発

RTK-GNSSにより高精度な自動航行が可能な小型軽量の電動ロボットポートを開発した。

② 画像処理を用いた近接リモートセンシングによる植物種の判別および障害物検出

ロボットポートのさらなる知能化を目指し、その視覚部としてカメラを設置し、深層学習の手法を使って水草の種判別や障害物の検出を行った。

③ ロボットポートの性能検証実験

開発したロボットポートの性能を検証し、改良を行うため、伊豆沼やほかの湖沼で試験航行や、刈払い実験を行った。

(2) ドローンを用いた空中からの広域生物相モニタリング

サブテーマ(2)では、水鳥類および植生を対象として、ドローンを用いた効率的なモニタリングシステムの開発、検証を行うことを目的として下記の項目を実施した。

① ドローンを用いた効率的なモニタリングシステムの検討

水鳥類や植生のモニタリングに適したドローンのセンサやカメラの設定、撮影方法、などの検証を行った。

② 水鳥のモニタリングシステムの開発・検証

マガンを対象として、①で検討した方法により得られた画像から個体数をカウントするプログラムを開発した。水鳥全般についても、①で検討した方法により得られた画像からインベントリーを作成する方法について検討した。また、ハクチョウやチュウサギの種を特定した場合についても、生息状況の把握手法を検討した。

③ 植生など湿地生態系のモニタリングシステムの開発・検証

湿地生態系の劣化要因である開放水面の減少や外来植物の侵入など植生を含めた周辺の土地被覆の把握を行い、データを蓄積した。

④ ドローンを用いた効率的なモニタリングシステムの運用・評価

今回開発したモニタリングシステムの実用可能性について、利用可能性、ユーザビリティ、機器の汎用性から検討した。

(3) センサネットワークによる地上・水面からの生物相モニタリング

サブテーマ(3)では、水鳥は主にマガンを、昆虫類は主に水辺を利用するトンボ類を、水生生物は主に魚類を対象とした遠隔モニタリングから画像処理による自動計数までを実行できる全天候型監視システムを開発した。

① モニタリング用ネットワークカメラの開発

湿地生物の自動遠隔監視法の確立のため、遠隔での操作・データ取得が可能な全天候型監視システムを開発した。このシステムは、人のアクセスが困難な水域などの場所において、定点カメラで撮影された生物の映像を基地局に送信し、画像処理により生物の検出と個体数の計測を行い、計数結果をウェブサイト等で公開するものである。基地局PCをインターネットに接続することで、基地局以外のPCやスマートフォンから操作すること、画像や計数結果を閲覧することも可能である。達成目標のひとつである低コスト化を目指して、安価な民生品を用いてシステムを構成した。カメラや通信デバイス等の部品の選定にあたっては、現地性能試験を実施した上で、用途に適したものを選定した。選定した部品を組み込み試作品の性能試験を繰り返したうえで改良を施した。最終的に、マガンとトンボ類用はアクションカメラやワイパー、冷却装置を搭載したシステムにした。魚類用は高解像度カメラを搭載したスマートフォンとワイパー付きの防水ケースを用いてシステムを構築した。

伊豆沼・内沼(宮城県)、宮島沼(北海道)、出水(鹿児島県)、鹿島台(宮城県)で試験運用を実施した。その過程で発生した問題を克服してシステムの完成度を高め、最終的に内沼(宮城県)、宮島沼(北海道)で運用を開始した。

② 画像処理によるマガン、トンボ類、魚類の検出およびカウント

画像処理やディープラーニングを用いたマガン、トンボ類、魚類の検出および計数法を開発した。その際、低コスト化や普及性を考慮して、オープンソースで、なおかつ、ユーザーの多いプラットフォーム、ライブラリを開発環境として用いることとした。

(4) モニタリング技術の適正運用に向けたマニュアル・ガイドラインの作成

サブテーマ4では、サブテーマ1から3で開発される各システムの構築に資するため、モニタリング対象となる生物種の環境情報を収集するとともに、開発初期段階の試験運用でシステム運用に関する情報の収集を行うとともにドローンによる監視が水鳥などの野生生物に及ぼす影響を明らかにする。

① モニタリング対象となる生物種に関する情報収集

サブテーマ1から3で開発される各システムの構築に資する環境情報を収集するため、伊豆沼・内沼の代表的な動植物種である、マガンやオオセスジイトンボをはじめとするトンボ類の個体数、ハスの分布調査を行った。

② 開発初期段階の試験におけるシステム運用に関する情報収集

ハス刈りロボットボート、ネットワークカメラの試験段階において、動作状況をはじめとする運用時の情報を収集するとともにシステムの正確性を担保するための検証用のデータの蓄積を行った。

③ ドローンによる監視が水鳥などの野生生物に及ぼす影響の評価

鳥類の個体数調査でドローンを適用することを想定し、比較的広い範囲に大きな群れで分布するガンカモ類を対象に各種接近試験を行ったほか、ドローンの接近時、ガンカモ類に影響を与える要因が機体本体の視覚的なものか、プロペラ音による聴覚的なものかを評価するための騒音反応試験を行った。それらの結果をまとめてドローンを活用したガンカモ類調査ガイドラインを作成した。

4. 結果及び考察

(1) ロボットボートによる生態系モニタリング及びマネジメント

① ロボットボートの開発

RTK-GNSSにより高精度な自動航行が可能な小型軽量の電動ロボットボートを開発した。重量は100 kg、幅及び長さは1.2 m×2.4mで小型トラックによる運搬が可能である。電力消費は、刈払と駆動系の合計で最高400 Wであり、リチウムリン酸鉄バッテリーを使用することで、一日8時間の運用が可能であることが明らかとなった。携帯電話回線を使う事で操作者とロボットボートの距離に関わらず監視や操作を行えることがわかった。

② 画像処理を用いた近接リモートセンシングによる植物種の判別および障害物検出

ロボットボートの視覚部として、RGBDカメラを用い、組み込みコンピュータによりリアルタイムで植物種の判別（ハスとアサザの識別）や、を行うことが可能となった。深層学習を応用した畳み込みニューラルネットワークにより画像の1ピクセル毎のセグメンテーション分類を行った。ポールやアサザ、ハス、水面など主なクラスについては90%の正解率が得られた。晴天時の照度が高い状態でも曇天時と同様の分類を行えることがわかった。

③ ロボットボートの性能検証実験

開発したロボットボートの性能を検証し、改良を行うため、伊豆沼やほかの湖沼で試験航行や、刈払い実験を行った。設定経路に対する横方向偏差の精度は、最もハスが繁茂して刈払が困難な場合でも0.99 m(RMS)となった。また、設定区画に対する刈払面積率は90%以上となった。刈払の時期は、ハスの成長後期である8月末が効果的であることがわかった。

(2)ドローンを用いた空中からの広域生物相モニタリング

① ドローンを用いた効率的なモニタリングシステムの検討

ドローンによるマガンのカウントに関しては、撮影方法および自動カウント方法の確立ができた。マガンをカウントするには高度120～145 m程度の高度からの撮影でも十分に可能であり、1回の飛行で約30～50 haまでの沼の撮影することが可能であり、自動カウントについては10%以内の誤差で検出が可能であった。

目視で検知、識別できる画像の解像度を把握した結果、比較的大型の水鳥（マガン）では、検知に約1.7 cm/pixel、識別に約0.9 cm/pixelの解像度が必要であると推定された。中型のカモ類（マガモ・コガモ）では、検知に約0.9 - 1.2 cm/pixel、識別に約0.7 - 0.8 cm/pixelの解像度、小型のカモ類（カイツブリ幼鳥）では、検知に約0.7 cm/pixel、識別に約0.5 cm/pixelの解像度が必要であると推定された。また、薄暗い環境下における撮影方法の検討した結果、日の入り後15分から30分の時間帯にマガンを判別できる画像を撮影するためには、ISO感度6400、露出時間1/10が目安であることが明らかになった。

② 水鳥のモニタリングシステムの開発・検証

水鳥類のインベントリーを作成するためのカメラの撮影方法について検討した結果、カメラは直下から30度（-60度）に設定し撮影した場合に最も判別に適切であると考えられた。また、図鑑により得られた画像やUAVの撮影結果から種の判別プログラムを検討した結果、判別はある程度可能であることが示唆されたが、高性能のUAVやPC環境を必要とし、プログラムの調整にも多くの労力が必要であることも明らかになった。

特定種についてはチュウサギとハクチョウについて検討した結果、両種ともにUAVにより生息状況を把握することが可能であり、チュウサギについては体系的なサンプリングデザインを実行することで、効率的なチュウサギのモニタリングを実施することが可能であると考えられた。また、ハクチョウについては、高度150mからの撮影でも十分に個体を把握できることが明らかになったが、オオハクチョウ、コハクチョウの分類ができないため、画像分析から得られた体長などから種を分類する手法を開発するという課題が残された。

③ 植生など湿地生態系のモニタリングシステムの開発・検証

UAVにより撮影した画像から作成した宮島沼の開放水面、水生植物群落の面積は、開放水面は23.8ha、水生植物群落は2.15haであることが明らかになり、近年宮島沼の開放水面の縮小速度が速くなっていることが示唆された。また、外来種については面積や分布状況を把握することができ、宮島沼におけるオオハンゴンソウなどの外来種対策は北側の草原を中心に実施することがまず重要であると考えられた。また伊豆沼でこれまで明らかになっていないハスに関する時系列データやサブテーマ1でのハス刈り取りの効果に関するデータを取得、蓄積することができた。今後既存のモニタリング手法だけでなく、UAVを用いたモニタリングを実施することで、湿地生態系に関する正確で最新のデータを収集することができ、より効果的・効率的な保全対策の実施が可能となると考えられた。

④ ドローンを用いた効率的なモニタリングシステムの運用・評価

今回開発したモニタリングシステムの実用可能性について、利用可能性、ユーザビリティ、機器の汎用性から検討した。マガンのカウントに関しては、調査地が大面積である場合への対応には課題が残るが、ドローンやPCなども機器の一般的な機器で対応できるため汎用性も比較的高く、実用可能性は高いと考えられた。水鳥のインベントリーに関しては、利用可能性はあるが、ユーザビリティはとても低いと考えられ、実用可能性は低いと考えられた。特定の種に関する調査ではこれまで得られていなかったデータや知見が今回開発したドローンに

よるモニタリングシステムで新たに得られることが明らかになった。湿地生態系のモニタリングについては、実用可能性も高いと考えられ、現時点でデータも着実に蓄積できることが明らかになった。以上より、開発したドローンを用いたモニタリングシステムによりマガンや生息環境については既存の調査などを効率化、省力化することは可能で、さらに新たな知見を得られる可能性も高いことが明らかになった。特にマガンや湿地生態系のモニタリングについては、本研究の成果を活用し、現地の専門家と主に民間企業によるドローン調査の共同体制を構築することにより、調査の省力化・効率化・継続性の確保が可能になると考えられた。

(3) センサネットワークによる地上・水面からの生物相モニタリング

伊豆沼・内沼(宮城県)、宮島沼(北海道)で運用した結果、マガン用システムは冠水や氷点下の気温の環境下での約5カ月間の運用、トンボ類用は夏季の高温過湿環境下での6カ月間の運用に成功し、両システムで100万枚以上の画像を取得した。画像処理を用いたマガン計数は、ポイントセンサによって得られた計数に近い値を得ることが可能となった。トンボ類では画像処理のほかディープラーニングを用いた検出を試行し、画像上に小さく写るトンボの検出と精度の高い計数に成功した。魚類については、スマートフォンを用いた監視システムを構築した。これにより水中の状態を遠隔地でリアルタイムに監視することが可能となった。さらに、画像処理を用いた魚類検出と計数では、画像処理アルゴリズムの改良に加えて、機器側の撮影間隔を変更できるプログラムに変更したことにより検出および計数精度が向上した。

(4) モニタリング技術の適正運用に向けたマニュアル・ガイドラインの作成

マガンやオオセシイトンボをはじめとするトンボ類の個体数、ハスの分布などについてモニタリング対象となる生物種に関する情報収集を行ったほか、ロボットボートや鳥類モニタリングカメラについて、監視者・管理者の視点から開発初期段階の試験におけるシステム運用に関する情報収集を行った。さらにこうした技術が野生生物へ与える影響を評価する一環として、ガンカモ類を対象に、ドローン運用時の影響評価を行った。ガンカモ類の群れに対し、水平、垂直、離陸地遠近実験を行い、マガンはカモ類やハクチョウ類と比較してドローンの接近に対してより警戒したことや陸上、水面など環境によって警戒の強さが異なることを明らかにした。また、警戒する要因が視覚的なものか聴覚的なものか明らかにするため、騒音試験を行い、視覚的要因が強いことを明らかにした。サブテーマ(2)や上述した情報を取りまとめ、ドローンを活用したガンカモ類調査ガイドラインを作成し、印刷物やホームページなどで公開した。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

(サブテーマ1)

これまで、ハスの刈り取りは主に手刈りによって行われてきた。しかし、手刈りは重労働であり、広い面積を効率的に刈り取りすることは非常に困難であり、有効な手段がなかった。本研究では電動のパドルで駆動される小型ボートにバリカンタイプの水草カッターを取り付けてGPSで自動航行可能なロボットボートの開発を行った。これにより、ハスの刈払いの省力化や低コスト化、省エネルギー化が実現した。また、畳み込みニューラルネットワークを用いた画像処理により、水面の植物の種類認識や障害物の検知がリアルタイムで行うことが可能となった。

(サブテーマ2)

これまでに日の出前や日没後の低照度の時間帯にドローンからの撮影画像を用いて個体数をカウントする研究は殆どなかった。本研究で提案する方法によりマガンを対象とし、個体数カウントが可能であることを示した。また、ハクチョウやチュウサギなど特定の種のサンプリング調査、植生など湿地生態系のモニタリングについては、開放水面面積の把握、外来種のマッピング、等、環境保全対策の実施に有効な調査方法についても確立することができた。

(サブテーマ3)

定点カメラを用いた監視法が普及しつつあるが、遠隔での映像の取得から個体群の定量化までを自動で実

行できる統合されたシステムはない。また、本研究成果であるねぐら入りマガンの自動モニタリングは世界初の試みである。そのモニタリングシステムを実用レベルまで進歩させたことは、モニタリング技術としてだけでなく、監視機器技術としても意義深い。これまでに画像処理による水鳥や昆虫類、魚類の自動検出・計数は実用化には至っていない。本研究では、生物の検出のほか、従来のポイントセンサスで得られる個体数に近い値を得ることに成功しており、画像処理の研究分野に対しても貢献度が高いと言える。本成果のモニタリング技術を全国に展開し、マガン中継地や越冬地のデータを連携させることでフライウェイ上での移動量の把握など個体群管理に重要な知見を提供する可能性がある。

(サブテーマ4)

モニタリング対象生物の量的な情報を収集したことにより、ハス刈りロボットボートの活用範囲や作業効率、ネットワークカメラやドローンによる監視システムの有効性等の検証が可能となった。また、各種接近試験によりドローンに対するガンカモ類の忌避反応を明らかにし、その結果を踏まえて、離陸地から群れまでの距離、水平飛行高度及び垂直接近高度の目安を提示した。鳥類を対象としたドローンの接近試験としては、国内では過去最大規模の試験である。さらにドローンを活用したガンカモ類調査ガイドラインを発行し、ドローンを使ったガンカモ類モニタリング調査の指針を示した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

サブテーマ1, 2, 4については特に記載すべき事項はない。

(サブテーマ3)

公益財団法人日本野鳥の会から環境省委託業務の「保護計画に関するモニタリング手法の情報収集」として鹿児島県出水市への派遣依頼およびヒアリングを受け、本研究成果をもとに助言を行った。北海道美唄市「宮島沼の水環境の保全と再生に関する検討会議」の委員として参画し、本研究成果をもとに宮島沼保全のためのモニタリング法について助言を行った。北海道美唄市と公益財団法人宮城県伊豆沼・内沼環境保全財団で、本研究成果であるモニタリングシステムの運用が実施された。鹿児島県出水市クレインパークとの共同試験を実施し、カメラを用いたツル類のモニタリング法について助言を行った。

<行政が活用することが見込まれる成果>

(サブテーマ1)

本研究で開発したロボットボートは、小型で運搬が容易で、製造コストが安く、省エネルギーである。電動のため、環境負荷も少ない。その一方で通常の船では航行不可能な水草の密集した中を独自のパドル機構によって航行可能である。本研究成果は、今後日本全国の水草の異常繁茂問題に困っている湖沼の管理に活用が見込まれる。自動航行が可能のため、人手をかけずに水草の管理を行うことが可能である。ハスだけではなく、ヒシやオオカナダモの刈払いにも適用可能である。

(サブテーマ2)

湿地生態系の保全対策に必須であるモニタリングにおいて、本研究で開発した各種の手法が活用し、ドローンが有効である局面を示すことができた。今後の実際の活用にあたっては現場へのドローンの配備を行い、現場で定期的な撮影を実施したうえで、本研究の成果を活かすことが可能と考えている。システムの導入が進めば、全国の状況をリアルタイムで共有することが期待できる。また、水鳥モニタリングについては、アジア地域のネットワークを通じて国外への展開も期待できる。

(サブテーマ3)

本研究では、無線通信を用いた遠隔操作と自動的なモニタリングを可能とする低コストで耐久性の高いモニタリングシステムを開発した。さらに、画像処理を用いて時間分解能の高い個体数の自動計測を可能にした。人口減少時代に突入し、監視者不足や労働コスト削減が懸念されるなか、モニタリング対象やサイトが増大するという行政のジレンマに対して、本研究で開発したシステムや手法はその打開策のひとつとなると見込まれる。

(サブテーマ4)

ラムサール条約湿地などガンカモ類が多く越冬する重要な湿地においてドローンを用いたモニタリングをする際に、今回発行したガイドラインを配布することで、ガンカモ類へ影響を与えずに省力的かつ効率的に調査することが可能となる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) 木塚俊和, 中村雅子, 牛山克巳, 山田浩之: 湿地研究, 6(1), 33-48(2016), 収支の計算残差を用いた渡り性水鳥による過栄養湖への栄養塩負荷量の推定
- 2) 平澤孝介, 山田浩之, 木塚俊和, 中村雅子, 牛山克巳: 湿地研究, 6(1), 25-32(2016), 宮島沼飛来マガン排泄物からの栄養塩類の溶出
- 3) 藤本泰文・山田浩之・倉谷忠禎・嶋田哲郎: 応用生態工学 21:171-179(2018)全周魚眼スマートフォンカメラを用いた水生生物の遠隔モニタリング.
- 4) 高橋佑亮・藤本泰文: 伊豆沼研報 12:17-25(2018)2007年の航空写真より計測した伊豆沼・内沼の水面形状および面積.
- 5) 藤本泰文: 応用生態工学 21:37-43(2018)葉柄の刈払いがハス*Nelumbo nucifera* の枯死に及ぼす影
- 6) 【予定】横山諒, 山田浩之, 木塚俊和, 海津裕, 遊佐健, 牛山克巳: 湿地研究(印刷中)農業活動がラムサール条約湿地宮島沼の水質の時空間変動に及ぼす影響

<査読なし>

- 1) Kenta OGAWA, Yutaka KAIZU, Hiroyuki YAMADA, Toru SUZUKI, Tetsuo SHIMADA, Katsumi USHIYAMA, Kazuo KOYAMA: Proceedings of International Symposium on Remote Sensing 2017, P-144, 903-906 (2017), Initial Trials to Semi-Automated Counting Wild Birds on Water Surface Using UAV.
- 2) 小川健太, 松田亜希子, 鈴木透, 丸山樹, 三品未和, 藤若燈, (2017)「UAV画像による水鳥の自動検出の試み」, 日本リモートセンシング学会学術講演会論文集, 第63回(平成29年度秋季), P. 7-8, 2017
- 3) 山田浩之: 釧路叢書, 第37巻 (2017) 阿寒の大自然誌, さまざまなセンサで面として阿寒湖を診る, 157-168.
- 4) 矢部和夫, 山田浩之, 牛山克巳監修: 湿地の科学と暮らし—北のウェットランド大全 (2017) 北海道大学出版会, p.364.
- 5) 山田浩之: 図説日本の湿地 (2017) 湿原の再生, 朝倉書店, 178-179.
- 6) 鈴木透, 長倉有理: 酪農学園大学紀要 42(1)(2017)水鳥のモニタリングにおけるUAVの利用可能性の検討
- 7) 鈴木透, 牛山克巳: 酪農学園大学紀要. 自然科学編,43(1),13-19(2018)UAVを用いた湿地生態系のモニタリング

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 山田浩之, 九間啓士朗, 村田祥子: 日本湿地学会2016年度大会(2016)無線通信360度カメラを用いたマガンモニタリング
- 2) 山田浩之: 応用生態工学会20周年記念大会東京大会自由集会「応用生態工学でUAVを活用する！」(2016) UAVを使ったちょっと変わった調査法
- 3) 山田浩之: 日本鳥学会自由集会「ドローンを使った鳥類調査」(2016)ちょっと変わったドローンの活用法
- 4) 遊佐健, 海津裕, 芋生憲司, 農業食料工学会関東支部第53回年次報告(2017)湖沼の植生管理用ロボットボートの開発
- 5) 遊佐健, 海津裕, 芋生憲司, 第76回農業食料工学会年次大会(2017)湖沼の植生管理用ロボットボートの開発
- 6) 海津裕, 農業IoTシンポジウム(2018)環境保全におけるロボット・センサ・通信技術の活用
- 7) 山田浩之, 九間啓士朗, 村田祥子, 日本鳥学会2017年度大会自由集会「フィールド調査とロボット・センサ・

通信技術をシームレスに連結する水域生態系モニタリングシステムの開発」(2017)全天空監視システムの開発と画像解析を用いたマガン飛来数の推定

- 8) 山田浩之, 九間啓士朗, 村田祥子: 第11回伊豆沼・内沼研究集会(2017)全天空監視システムの開発と画像解析を用いたマガン飛来数の推定
- 9) 鈴木 透・小川健太: 第11回伊豆沼・内沼研究集会(2017)ドローンを用いた空中からの生物相モニタリング
- 10) 遊佐健, 海津裕, 芋生憲司: 第11回伊豆沼・内沼研究集会(2017)ロボットボートによる生態系モニタリング及びマネジメント
- 11) 山田浩之, 横山諒, 九間啓士朗, ELR2017(日本緑化工学会・日本景観生態学会・応用生態工学会3学会合同大会)研究集会「ロボット・UAV・ネットワークカメラを用いた湿地生態系の監視と管理」(2017)遠隔監視システムと画像処理を用いたマガン飛来数の推定
- 12) 山田浩之, 横山諒, 牛山克巳, 嶋田哲郎, 第12回バードリサーチ大会(2017)全天空遠隔監視システムと画像解析を用いたマガン飛来数のモニタリング
- 13) 山田浩之, 安部晋吾, 上田紘司, 嶋田哲郎, ELR2017(日本緑化工学会・日本景観生態学会・応用生態工学会3学会合同大会)(2017)自動撮影全周魚眼カメラを用いたトンボ類の遠隔モニタリング
- 14) 山田浩之, 九間啓士朗, 村田祥子: 石狩川流域湿地・水辺・海岸ネットワーク設立記念フォーラム・ウェットランドセミナー(2017)無線通信360度カメラを用いたマガンモニタリング
- 15) Kenta OGAWA, Yutaka KAIZU, Hiroyuki YAMADA, Toru SUZUKI, Tetsuo SHIMADA, Katsumi USHIYAMA, Kazuo KOYAMA, ISRS2017 (2017) INITIAL TRIALS TO SEMI-AUTOMATED COUNTING WILD BIRDS ON WATER SURFACE USING UAV
- 16) 小川健太, 鈴木透, 松田亜希子, 日本鳥学会2017年度大会(2017)ドローンを用いた空中からの生物相モニタリング
- 17) 鈴木透, 松田亜希子, 小川健太, ELR2017 (2017)水鳥モニタリングにおけるドローンの利用可能性
- 18) 藤本泰文, 嶋田哲郎, 山田浩之, ELR2017(日本緑化工学会・日本景観生態学会・応用生態工学会3学会合同大会)(2017)全周魚眼スマートフォンカメラを用いた水生生物の遠隔モニタリング
- 19) 山田浩之, 横山諒, 牛山克巳, 嶋田哲郎, 日本湿地学会2017年度大会(2017)全天空遠隔監視システムと画像解析を用いたマガン飛来数のモニタリング
- 20) 小川 健太, 松田 亜希子, 鈴木 透, 丸山 樹, 三品 未和, 藤若 燈, 日本リモートセンシング学会第63回(平成29年度秋季)学術講演会(2017)UAV画像による水鳥の自動検出の試み
- 21) Takeshi YUSA, Yutaka KAIZU, Kenji IMOJU, 9th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering (ISMAB) in Korea(国外)(2018) DEVELOPMENT OF A ROBOT BOAT FOR AQUATIC WEED MANAGEMENT IN A SHALLOW POND
- 22) Keishiro Kuma, Takeshi Yusa, Yutaka Kaizu, Kenji Imou, 9th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering (ISMAB) in Korea(国外)(2018) Image Recognition of Natural Scene Using Deep Learning for Autonomous Vegetation Management Robot Boat in Lake
- 23) 九間啓士朗, 遊佐健, 海津裕, 芋生 憲司, 農業環境工学関連5学会2018年合同大会(2018) ハス刈りロボットボートの自律走行化に向けた画像処理による走行環境認識
- 24) 藤本泰文, 山田浩之, 山中登生, 倉谷忠禎, 嶋田哲郎, 2018年度日本魚類学会年会(2018)スマートフォンを用いた淡水魚介類の遠隔モニタリング
- 25) 山田浩之, 小西哲也, 横山諒, 安部晋吾, 山中登生, 日本湿地学会 2018年度大会(2018)遠隔操作デジタルカメラを用いた湿地生物モニタリングの課題
- 26) 小川健太, 第55回酪農公開講座(2018)スマート酪農の展開～ドローンや衛星画像技術の農地管理へ利活用について
- 27) Kenta Ogawa, 2018 International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Environment(2018) Semi-automated counting wild birds on water surface using UAV: An application of machine learning
- 28) 松田亜希子, 鈴木透, 小川健太, 第65回日本生態学会(2018)薄暗い条件でのドローン撮影: マガン検知に

必要な露出時間とISO感度は？

- 29)小練文弥, 小川健太, 牛山克己, 日本写真測量学会北海道支部第37回学術講演会(2019) 機械学習を用いたUAV画像からのマガン係数精度の向上
- 30)新谷奈津光, 岡田啓嗣, 山田浩之, 鮫島良次, 日本農業気象学会2019年全国大会(2019)スイートコーンの収穫適期推定に関する研究
- 31)山田浩之, 小西哲也, 横山 諒, 牛山克己, 高橋佑亮, 嶋田哲郎, 第13回伊豆沼・内沼研究集会(2019)遠隔操作監視カメラシステムと画像処理を用いたマガン飛来数の推定
- 32)小練文弥, 小川健太, 牛山克己, 日本写真測量学会北海道支部第37回学術講演会(2019) 機械学習を用いたUAV画像からのマガン係数精度の向上
- 33)小川 健太, 鈴木 透, 小練 史弥, 第13回 伊豆沼・内沼研究集会(2019)ドローンを用いた空中からの生物相モニタリング
- 34)鈴木透, 高橋佑亮, 嶋田哲郎, 第13回 伊豆沼・内沼研究集会(2019)ドローンを用いたチュウサギの生息地利用に関するモニタリング手法の開発
- 35)遊佐健, 九間啓士朗, 海津裕, 芋生 憲司, 第13回伊豆沼・内沼研究集会(2019)水草刈払いロボットボートの開発と伊豆沼・内沼における運用事例
- 36)九間啓士朗, 遊佐健, 海津裕, 芋生 憲司, 第13回伊豆沼・内沼研究集会(2019) ハス刈りロボットボートの自律航行のための画像処理による環境認識

7. 研究者略歴

※記載する研究者の範囲は、課題代表者のほか、サブテーマ代表者等の主要なメンバー数名のみとし、経歴について簡潔に記載すること。

研究代表者

海津 裕

東京大学農学部卒業, 東京大学大学院農学研究科修士課程修了, 株式会社クボタ, 東京大学大学院農学生命科学研究科助手, 北海道大学大学院農学研究院准教授, 農学博士, 現在東京大学大学院農学生命科学研究科准教授

研究分担者

※研究分担者とは応募申請書・研究計画書に記載された研究者を指す。

1) 小川健太

早稲田大学教育学部理学科地学専修卒業, 東京大学大学院工学研究科修士課程修了, 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了, 株式会社日立製作所, 酪農学園大学エクステンションセンター特任准教授, 現在, 酪農学園大学農食環境学群准教授

2) 鈴木 透

北海道大学農学部卒業, 北海道大学大学院農学研究科修士・博士課程修了, 酪農学園大学環境システム学部助手, 現在, 酪農学園大学農食環境学群准教授

3) 山田浩之

岡山大学工学部卒業, 岡山大学大学院工学研究科修士課程修了, 北海道大学大学院農学研究科博士課程修了, 京都大学防災研究所研究員, 北海道大学大学院農学研究科助手, 現在, 北海道大学大学院農学研究院講師

4) 嶋田哲郎

東京農工大学農学部卒業, 東邦大学大学院理学研究科修士課程修了, (公財)宮城県伊豆沼・内沼環境保全財団研究員, 現在, 同総括研究員

II. 成果の詳細

II-1 ロボットボートによる生態系モニタリング及びマネジメント（サブテーマ1）

東京大学

大学院農学生命科学研究科生物・環境工学専攻

海津 裕

平成28～30年度累計予算額：30,501千円

（うち平成28年度：12,353千円，平成29年度：9,308千円，平成30年度：8,840千円）

累計予算額は、間接経費を含む。

【要旨】

近年、日本全国また世界各国の湖沼において、水草の異常繁茂が問題となっている。富栄養化や外来植物の侵入などがその主な原因とされている。かつては肥料や飼料、食料として有効利用されている事例もあったが、現状では自治体が積極的にコストをかけて除去作業を行う場合を除いて放置されている。水草を放置することで、悪臭やヘドロの堆積、漁業やリクリエーションへの悪影響、水質悪化、生物多様性の喪失などの環境への悪影響がある。水草を刈り取る方法としてはこれまで、手刈りによるものや、大型機械によるものがある。手刈りは重労働であり広い面積を行うことができない。また、大型機械はコストがかかり、その運用も手間がかかるため、適用可能な場所が限られる。本研究では、比較的面積が狭い湖沼において繁茂した水草のモニタリングと刈払いによる植生管理をドローンとロボットボートを用いて行った。ドローンを用いた空中撮影により水草の繁茂状況の確認や場所の特定、刈払いによる効果の評価等を行えることが明らかとなった。また小型軽量で自動航行可能なロボットボートにより、省力的かつ低コストに刈払いを行うことが可能となった。作業効率は0.6ha/hと1.4ha/hの間であり、刈り取り面積率は90%以上という結果が得られた。また、ロボットボートの知能化を図るため、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を用いた画像処理によるシーン解析を行った。ボートの前部に取り付けられたカメラにより、竹杭や鉄管などの障害物の位置検出や、ハスとアサザの識別および位置検出をリアルタイムで行うことが可能となった。溶存酸素濃度の計測を行い、刈払った場所ではDOの数値が上がっていることが確認された。また、刈払った場所には、マガンが来ることが確認できた。

【キーワード】

水草管理，モニタリング，ロボットボート，自動航行，省力化

1. はじめに

1970年代以降、世界的な人口増加や都市化、農業の工業化といった人為的活動によって湖沼、河川、沿岸域に富栄養化が発生し、水生生態系にリスクをもたらしている。継続的な栄養成分の増加は植物バイオマスの増加をもたらし、水生生態系は光の利用において比較的優位なより大型の水生植物にとって有利になる傾向がある。水生植物は小型魚類の生息地になる、有毒な光合成細菌の発生を抑制する、波浪を抑制することによって底泥のまき上げを防止するなど様々な生態系サービスを提供するが、その一方で過剰な繁茂は景観の悪化や、漁業やレクリエーションといった水域における経済活動の阻害、溶存酸素の低下といった水質の悪化とそれがもたらす生物多様性の減少、有機物の堆積による浅底化などといった悪影響を及ぼすことが知られている。そのため、水生植物の適切な管理をすることが、生物多様性保全のために重要であると認識されている。

水生植物を管理する手法は歴史的に数多く提案され、それらは機械的及び物理的手法、化学的手法、生物学的手法に分類されている。機械的及び物理的手法とは機械や設備、人力によって植物体や水、底泥を操作することにより水生植物の管理をする手法である。化学的手法とは薬剤散布によって水生植物

を管理する手法である。生物学的手法とは生態系における天敵を利用した水生植物の管理手法である。一般に、化学的手法、生物学的手法は実施するうえで費用が安く、労力をそれほど要しないという利点がある一方で、薬剤や天敵として利用した生物は対象とする水域に影響を留めることが困難である。また、昨今では薬剤や外来種に対する世間の厳しい見方もあり、実施することに困難が伴う場合がある。それらと比較して機械的・物理的手法は周辺環境への影響を抑えられる管理手法であり、特に欧州・北米などで水生植物の管理において重要な役割を果たしている。

既往の水生植物の機械的管理手法は大きく刈取りと刈払いの2種類の方法による事例が古くから見られる。これらに属しない技術としては寸断や引抜き、ロータリー耕耘といったものがある。主要な2種類の機械的管理手法について言及する。刈取りとは、生育している水生植物を切断し、断片を回収して水域の外に出す作業体系である。刈払いとは、水生植物を切断し、断片を回収せず水中に捨てる作業体系である。切断した植物体を回収するかしないかという点が両者の差異である。比較した場合、刈取りは切断した植物体（残渣）が水中に残らないため短期的に景観を悪化させたり水路を詰まらせたりする心配がなく、残渣が水中に栄養素を放出する懸念がなく、堆積物の増加を招かないと考えられるため、よい手法であると捉えられている。しかしながら、水生植物は大量に存在するため植物体の切断と回収を行うことができる水生植物の刈取り機は大型で高価なものになりがちである。また、回収した植物体は重量の95%が水分であるため苦勞のわりに利用可能な箇所が少なく、その利用法も一般的に費用対効果の高いものはない。そのため、刈取り以外に処分費用も見積もる必要がある。すなわち、水生植物の大規模な機械的刈取りは高コストな管理手法であるため、予算の制約が厳しいサイトでは実現できない管理手法である。刈払いは前述の刈取りにおける植物体を回収することによる利点はすべて懸念点となるが、回収した植物体の処分コストは必要なく、作業も植物体の切断のみであるため機械はそれほど大型で高価とならない。よって、刈払いは比較的lowコストな水生植物の機械的管理手法であり、予算の制約下にあるサイトにおいて機械的植生管理を行う場合に現実的に選択できる手法として重要であるといえる。

本研究を行ったサイトの宮城県伊豆沼・内沼は日本国内2番目のラムサール条約登録湿地で、マガンやハクチョウの有数の越冬地として知られている。伊豆沼・内沼はかつて多様な動植物が生息する湖沼であったが、2016年には湖面の約85%に至るハスの繁茂が確認されている（図(1)-1）。また、2018年においてCOD数値が11 mg/l であり日本で最も富栄養化が進んだ湖沼の一つである。伊豆沼・内沼においても同様にハスの繁茂によって水の貧酸素化、沈水生植物群落の消滅、小魚の減少、マガンのねぐらの縮小などが報告されており、自然再生事業においてハスを減らすことが目標とされている。現在は有人のボートに固定された鎌によりハスの刈払いが行われている¹⁾。



図(1)-1 夏季の間、湖面を埋め尽くすハス（伊豆沼）

わが国では人口減少や高齢化といった社会情勢から省力・省人を目的としたロボットなどの自動化技術の開発が様々な分野で進んでおり、ドローンやAI、IoTといった新技術、最先端の情報通信技術の発展・活用が加速しているという状況はわが国のみにとどまらず世界の潮流となっている。ロボット技術の環境分野への応用は過去に数多くの研究事例があり、水質・水深調査用のロボットボート、アオコ除去用のロボットボート、ウキクサ回収用のロボットボートといった事例が報告されており、水質・水深調査用途のロボットボートは既に市販されているものもある。しかしながら、水生植物の刈払い作業は機械

的な負荷が比較的高いという点が先に示した事例と異なるものであり、本研究を除いて他に水生植物の刈払い用途のロボットボートに関する研究事例は見られない。既存の水生植物管理用の機械はすべて人による操作を必要とし、労働コストの効率化には限界があるという問題がある一方、水生植物の刈払い作業のように単純であるが負荷の高い作業を代替することは従来からロボット研究の対象であることから知見が蓄積されているため応用できる技術は多いと考えられる。そのため、既往の研究事例こそないが先に列挙した研究開発段階のロボットよりも一歩進めた形の実用化を目指した技術の実証を行うことができる状況下にある。

2. 研究開発目的

本サブテーマの目的は、最新のロボット・情報通信技術を応用し、保全現場にとって扱いやすい水生植物の刈払い用ロボットボートを開発し、開発したロボットボートによる自動管理作業の有効性を実証することである。ここで開発するロボットボートは、刈払いだけではなく、画像処理を用いた近接リモートセンシング技術により障害物回避や水草の種判別を行う

研究期間における刈払い対象は夏季の伊豆沼に生育するハスとするが、最終目的としては日本全国の湖沼、ため池、河川等のハスやヒシ、オオカナダモなどの水生植物の低コストな管理手法を提供することである。

3. 研究開発方法

(1) ロボットボートの開発

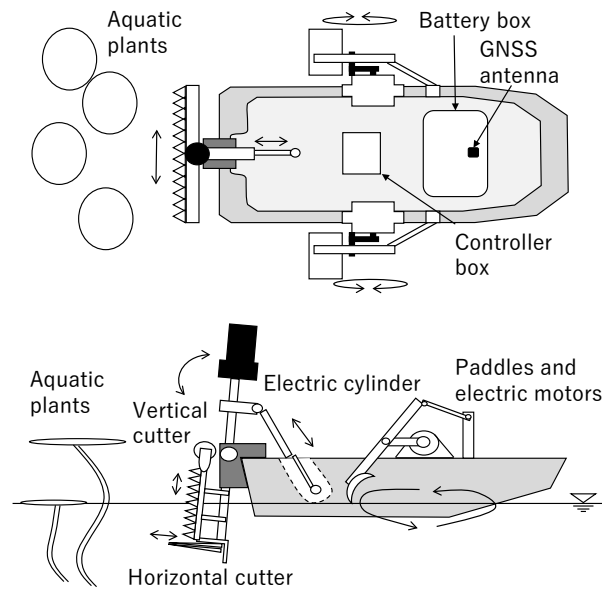
水生植物の刈払い用途であるため、ボートタイプのロボットを開発した。一般的に有人の船は船舶安全法に基づく船舶検査義務など規制がなされているが、全長3 m以下、出力2 馬力以下の船については対象外とされている。ロボットボートのコストや扱いやすさ、安全性を考慮してもこの範囲内に収めることが望ましいと考えられたため、船体は3 m以下とし、総出力は2 馬力(およそ1500 W) 以下とする制約条件の基に設計がなされた。

ロボットボートの設計について、機械、電気、ソフトウェアそれぞれの領域に関して以下に記載する。

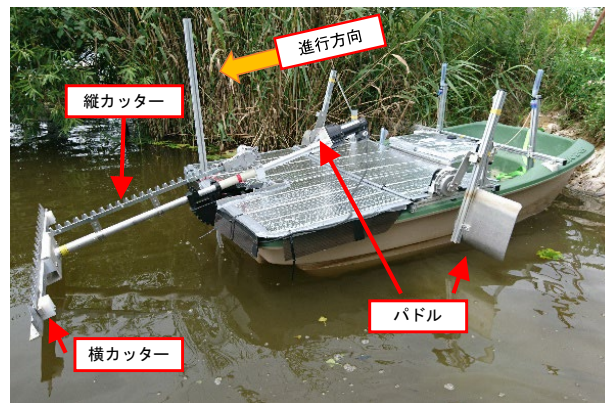
① ロボットボート本体

ロボットボートは船体に推進と刈払い作業をするための装置を取り付けることによって自動的な刈払いが実現される。以下、船体と推進装置、作業機の機械設計について説明する。図(1)-2にロボットボートの概要図、図(1)-3にカッター部を水面にはね上げた状態の外観写真を示す。

船体は全長2.4 m、全幅1.2 mのプラスチック製双胴船 (Sportyak 245, Bic Sport, Vannes, France) を使用した。本船体は人が搭乗した場合、定員2名程度のものである。寸法上、1 tトラックの荷台に積載して運搬することが推奨される。軽トラックの荷台に積載して安全に運搬ことも可能であるが、全長が2.4 mであるため現在一般的な軽トラックの荷台に積載して公道走行をする場合は道路交通法に基づく届け出と表示を必要とする。



図(1)-2 ロボットボートの概要図



図(1)-3 ロボットボートの外観写真（カッター部を水面にはね上げた状態）

② 推進方法

推進方法はプロジェクト計画段階では水中プロペラ式または空中プロペラ式を検討していた。伊豆沼の水域をプロジェクト初期（平成28年6月）に現地視察したところ、大量のハスとボートの走行を妨げるヒシ群落が繁茂していることが確認され、視察時に搭乗していた15馬力船外機を搭載したボートもハス、ヒシの群落内では植物体のプロペラへの絡みつきによって停止を余儀なくされる状況が確認された。また、群落の密度も想定していたより濃く、生育範囲が広域にわたることが分かった。水中プロペラ式はプロペラへの植物体の絡みつきを防止することが難しい。また、空中プロペラはエネルギー効率が悪く、消費エネルギーあたりの推進力が小さいため刈払い作業に適していない。そのため推進方式を変更することとし、外輪式とメカニカルリンク式を検討した。外輪式は船体に取り付けた水車を駆動する方式で、メカニカルリンクパドル式はリンク機構によりパドルを駆動する方式である。検討の結果、外輪式は重量が重くなり、パドル車輪の体積が大きくなるおそれがあるのに対し、メカニカルリンクは軽量であり、試作や調整が容易であることからメカニカルリンクパドル式を採用した。メカニカルリンクには様々なリンク機構の中から、最も一般的な四節リンク機構を採用した。以下、本機の推進方式を四節リンクパドル方式とする。これにより、ハスやヒシ等の水草がパドルに絡みついても動けなくなることは実験期間を通して一度も観察されなかった。このことは、ロボットボートの実運用上非常に重要である。ロボットボートは一日数時間の自動運行が望まれる。水草が絡まって停止することは最も避けなければならない。四節リンクを駆動するモーターは定格出力180Wの車いす用電動ブラシレスギアモーターを採用した。採用したモーターは軸のロック機構が装着されており、これによって陸揚げする時にパドルが地面と干

涉しない位置で固定することができ、扱いやすいものとなっている。本機以外に四節リンクパドル方式に類する推進方式を採用した船体には米国で市販されている水草刈払い機（HC-10H, Hockney Company, Wisconsin, USA）がある。

③ 刈払い切断機構

刈払いのためのカッター作業機（横カッター）は米国で市販されている水草刈払い用バリカン型カッター（Jenson Lake Mower, Jenson Technology, Texas, USA）を採用した。のちに実験により明らかになったが、本機は出荷時の状態で、主にオオカナダモなどの沈水性かつ茎の細い水生植物を刈払い対象としているため、茎の太い生育中のハスを切断すると、バリカンの刃同士が衝突して停止するという現象が見られた。そのため、もともと刈刃の可動刃と固定刃を隔てるプラスチック製スペーサが出荷時4枚装着されていたものを16枚に増設し、厚さを1.6 mmから2.0 mmに変更した。また刈払い作業中にカッターの縦のシャフトへの水草の絡みつきがあり、作業速度を低下させていたため水草刈払い用バリカンカッターのシャフトに平行して縦に電動ヘッジトリマ（BH-600, iDech, Hyogo, Japan）（縦カッター）を固定し、シャフトへ絡みつく水草を切断した。伊豆沼をはじめとして湖沼には様々な水生植物が生育しており、水深も浅い箇所があるため、カッターは自動的に上げ下ろしでき、刈払いするか否か選べることが望ましい。このためカッターのシャフトに電動シリンダを装着し、電動シリンダを伸縮させることによってカッターの上げ下ろしを制御することとした。

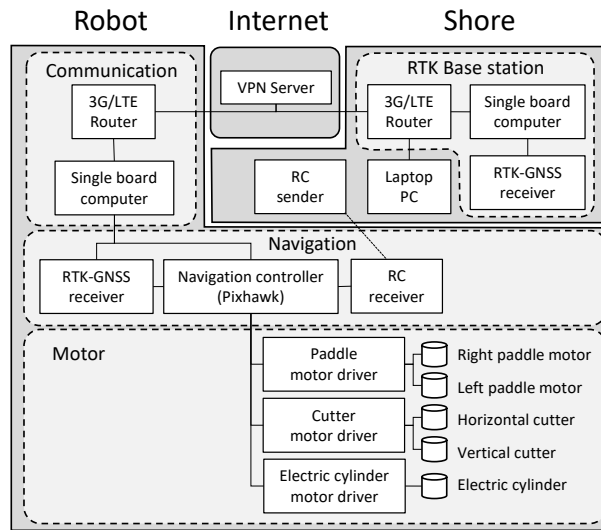
④ 動力

ロボットボートの動力源は完全電動と、発電機を搭載したハイブリッド方式を検討した。伊豆沼では問題ではなかったがサイトによってはエンジンの使用が禁止される場所があるとの情報に基づき、全国の湖沼で使用可能な完全電動とした。バッテリーとして、実験当初2016年度は鉛蓄電池を用いたが、重量が重く、取り扱いに難があるため、より軽量なりチウムリン酸鉄電池（LiFePO₄）を使用した。単位エネルギーあたりの重量が、鉛蓄電池の約半分である。その中でも現在流通しているもののうち性能に優れ、ケースの安全性が高く、国内にて入手が可能な0' cell社製のバッテリーを採用した。バッテリーは24Vのものと、12Vのものを使用した。24Vはパドル駆動用、12Vは自動航行コントローラとカッターやシリンダの駆動に使用した。バッテリーの重量は、24V20Ahが5.5kg、12V40Ahが6kgである。

⑤ 制御系

ロボットボート本体の制御系は3階層に分かれ、上位から主に通信関係の制御を担うシングルボードコンピュータ（BH3, Bizright, Hokkaido, Japan）及び携帯電話ルータ（iR700B, IDY, Tokyo, Japan）、ロボットの自律制御を担う航法コントローラ（Pixhawk, mRobotics, California, USA）、モーターの回転を制御するモータードライバにより構成されている。下位から順に解説すると、推進装置であるパドル用モーターはブラシレスDCモータードライバ（HBL2360, RoboteQ, Arizona, USA）、作業機であるカッター用モーターはブラシDCモータードライバ（SDC2130, RoboteQ, Arizona, USA）により航法コントローラからのパルス幅変調（PWM）信号に基づき回転速度及び回転方向が制御される。航法コントローラは3軸加速度センサ、3軸ジャイロセンサ、3軸地磁気センサ、気温・気圧センサ及びデータ保存用SDメモ리카ードスロットを名刺サイズの基板に搭載した組み込み制御基板で、ドローン用コントローラとして市販されている。航法コントローラと安価で高精度な1周波リアルタイムキネマティック衛星測位システム（RTK-GNSS）受信機（C94-M8P, uBlox, Thalwil, Switzerland）を組み合わせ、自律制御システムを構築した。RTK-GNSSは位置の計測精度が水平方向で2.5cmである。本機器を航法コントローラに採用したことは近年の技術の進歩をロボット開発に取り入れたことを意味している。機体に専用のコントローラを新たに開発するのではなく汎用コントローラを使用することにより既存の技術を流用した信頼性の高いシステムが少ない開発コストで実現できる。航法コントローラは外部に対し計測データ及び制御コマンドの送受信を行うことができる。Universal Asynchronous Receiver /Transmitter（UART）インターフェースにより航法コントローラとシングルボードコンピュータを接続し、Ethernetによってシングルボード

コンピュータと携帯電話ルータを接続した。これらのシングルボードコンピュータ及び携帯電話ルータの採用もIoT, M2Mといった近年の技術動向を反映したものである。



図(1)-4 ロボットボート制御システムのブロック線図

ロボットボートは電源に12Vバッテリーと24Vバッテリーの2系統を搭載した。24V系電源はパドル用モータードライバに接続し、12V系電源は直接カッター、シリンダ用モータードライバに、DCDCコンバータを介して変換した5V系電源を携帯電話ルータと航法コントローラに、同じく変換した12V系電源をシングルボードコンピュータに接続した。作業中の電力消費を調べるため、バッテリーとドライバーの間に電流、電圧を0-5 Vの電圧に変換するユニット (AttoPilot 90A) を入れ、データロガー (T&D, MCR-4V) によって連続的に計測を行った。

RTK-GNSSによる高精度測位を実現するために地上に固定した基準局が必要となる。ロボットボート本体に使用したものと同一のシングルボードコンピュータ及び携帯電話ルータ、RTK-GNSS受信機を防水筐体に組み込み、基準局とした。基準局は、稼働するボートから10km圏内の、周囲に衛星を遮る高い構造物や地形がない場所に設置することが望ましい。伊豆沼における実験では、岸の鋼管の上に基準局のアンテナを設置した。



図(1)-5 伊豆沼の岸に設置したRTK-GNSS基準局の設置状況

⑥ ソフトウェア

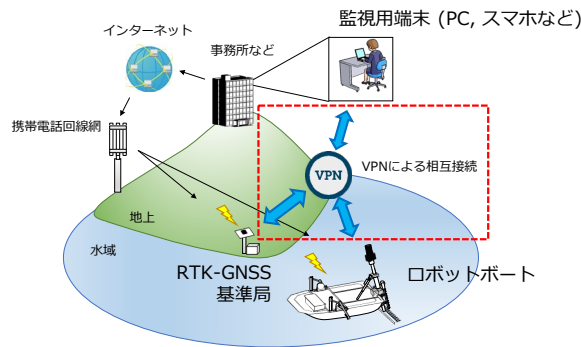
ロボットボートのソフトウェアに関して説明する。前述した3階層の制御系において、シングルボードコンピュータ、航法コントローラ、パドル用モータードライバにロボットとして必要なソフトウェアを組み込んだ。航法コントローラのファームウェアはロボットの主要な動作を実現するものであり、これにオープンソースソフトウェアのArdupilot/Roverを採用した。Ardupilotはドローン用制御ソフトウェアとして知られるが、期待に応じて固定翼機、ヘリコプター、マルチコプター、地上ビークル等それぞれに対応したファームウェアが存在している。RoverはArdupilotの地上ビークル向けファームウェアである。本システムではRoverのバージョン3.1.0を改造し、ロボットボートに必要とされる機能を実現した。主要な改造箇所はRover 3.1.0で未対応であったRTK-GNSSの測位状況の取得と、手動操縦時にカッター及びシリンダが動作しない不具合の対策であり、改造箇所はわずかに留まった。シングルボードコンピュータでは湖外にある遠隔監視・操作用端末とネットワーク接続をするためにVirtual Private Network (VPN)クライアントソフトウェアであるSoftether VPNを動作させ、航法コントローラからUARTインターフェースを介して送受信する計測データや制御コマンドを専用転送ソフトウェアのMavproxyによってUser Datagram Protocol (UDP)に変換し遠隔監視・操作用端末に転送した。また、オープンソースソフトウェアのRTKLIB/str2strによりRTK-GNSSの補正情報をRadio Technical Commission for Maritime service (RTCM3)フォーマットで基準局からロボットボート本体に組み込まれた移動局にVPN経由で送信した。

ボートの操作は、ラジコンの送信機とパソコンを用いて行う。岸からの出発時や、帰着時は送信機を使って行い、自動航行中はパソコン上で監視と操作を行う。操作ソフトウェアは、グラウンドコントロールソフトウェア (Ground Control Software) と呼ばれ、MissionPlannerやAPMPlanner, QGroundControlなどがよく知られている。これらのソフトウェアは、Mavlinkという標準プロトコルを使ってロボット内のコントローラとの通信を行う。具体的には、ウェイポイント (中継地点) の設定や、コントローラへの送信、制御パラメータの送受信、機体の位置や方位、速度といったステータス情報の受信などを行い、画面に表示することが可能である。図(1)-6(a)にMissionPlannerの監視操作画面、(b)にウェイポイントの設定画面を示す。ウェイポイントは、緯度、経度、標高、動作で定義される。



図(1)-6 グラウンドコントロールソフトウェアMissionPlannerの操作画面, (a)監視操作画面, (b)ウェイポイント作成画面

図(1)-7に実運用のイメージを示す。操作者はインターネットの通じる場所であれば、どこからでも操作可能である。



図(1)-7 実運用のイメージ

(2) 画像処理を用いた近接リモートセンシングによる植物種の判別および障害物検出

本研究で開発したロボットボートは、GNSSの衛星測位により自己位置を計測している。また、地磁気を用いて方位を計測している。設定した経路上に竹の杭やブイなどの障害物がなければ問題が無いが、実際の湖沼では漁業のために杭が設置されていることが多い。これらの障害物に衝突すると、前に進めなかったり、カッターが破損したり、ロボットボート自体が破損したりする可能性がある。ロボットボートはその性質上、できるだけ停止せず自動で長時間作業を続けることが望ましい。実運用において、ロボットボートが予期せぬ事態により停止した場合は、人が別のボートによって対応にあたらなければならないと効率の悪いと言えない。そこで、ロボットボートは障害物を回避する性能を備えていることが望ましい。

また、湖沼によっては、刈り払ってはいけない種類の水草が存在する場合がある。伊豆沼においては、ハスやヒシは刈払の対象だが、アサザやガガブタは保護すべき対象となっている。これらの水草は繁殖範囲が異なる場合と、重なっている場合がある。そこで、ロボットボートは水草を選択的に刈り払うことが出来ることが求められている。本研究で開発したロボットボートは、電動シリンダによりカッター部を跳ね上げることが可能となっている。またカッターを任意のタイミングで作動、停止させる機能を備えている。これらの機能を用いれば、刈り払うべき水草のみを選択的に刈り払うことが可能であると考えられる。

そして、経路が設定されており、ロボットボートが自動航行をしたとしても、風や水の流れ、水草の抵抗により規定の経路から外れる可能性がある。このときロボットボートはできるだけ速やかに経路に戻ろうとするが、経路から外れている間の水草は刈り残してしまう。水草は繁殖能力が高いため刈り残しがあると再び繁茂する可能性が高い。刈り残しをなくすためには、いったん規定の経路を走行したあと、再びその範囲を刈り払うことが望ましい。しかし、すでに刈り払った場所を再び航行することは時間の無駄となる。そこで、2回目の刈り払では、水草が存在する場所を狙ってロボットボートを誘導すれば効率的かつ確実に刈り払を行うことが可能となる。

これら3点、1)障害物の回避、2)刈り払う水草の種判別、3)効率的な刈り払のための誘導、を実現するための基礎技術として、ディープラーニングと画像処理を用いたシーン認識システムの開発を行った。

① 実験装置

画像の入力装置として、RGB画像と深度情報も取得可能なRGBDカメラ (Microsoft Kinect V2) を用い、船首に水面から約1mの位置に俯角15度をつけて設置した (図(1)-8)。また、データの記録および画像処理用にGPU(Graphics Processing Unit)を搭載したロボット組込み用シングルボードコンピュータ (NVIDIA Jetson TX2) を用いた。また、ロボットボートの位置および方位はロボットボートのコントローラより取得した。



図(1)-8 画像入力用RGBDカメラを設置したロボットボート

② 画像処理プログラム

画像処理には、ディープラーニングを用いた。畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Networks (CNN)）を用いて、画像内の各画素を「水面」や「ハス」、「杭」などのオブジェクトクラスに分類するセマンティックセグメンテーションを行った。オープンソースのディープラーニングフレームワークであるPyTorchを用いて実装を行った。ニューラルネットワークモデルにはリアルタイム性に優れたESPNetV2を採用した。

③ 実験方法

ロボットボートを手動または自動で航行させながら、RGBカメラからディープラーニングのトレーニング及びテスト用のデータを取得した。また、セグメンテーション画像および深度情報から障害物の地理座標を推定するために、沼に障害物として竹の杭と鋼の単管パイプ（以下合わせてポールとする）を打ち込み、その座標をRTK-GNSSで正確に計測した。ポールに手動操縦でロボットボートを近づけ、その間の機体の姿勢、位置情報、映像をロボットオペレーティングシステム（Robot Operating System (ROS)）の機能を用いて記録した。

（3）ロボットボートの性能検証実験

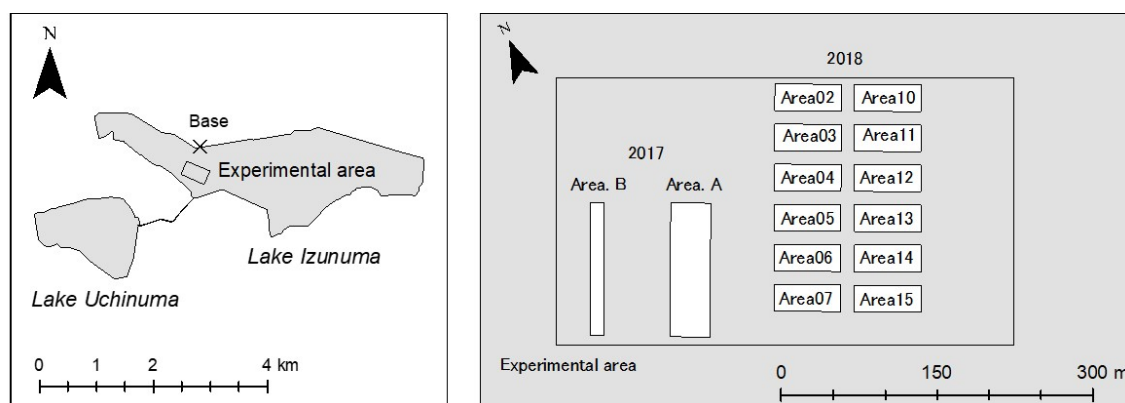
開発したロボットボートの性能を検証し、改良を行うため、研究期間中に複数回伊豆沼および東京近郊の沼で実験を行った。平成28年度は主にボートの開発を行い、試験航行を行いながら基本機構の決定を行った。平成29年度は試験的に刈払いを行いながら改良を行った。平成30年度は、3週間おきに決められた区画を刈払いし、刈払いの回数や時期による作業能率の違いやハスの抑制効果の違いについて検討を行った。また、同時に画像処理による水草、障害物の識別のためのデータ収集を行った。ハスの繁茂状況や、刈払い後の再生状況を確認するためドローンによる撮影をサブテーマ（2）、サブテーマ（4）と連携して行った。

表(1)-1に試験期間中の実験を行った期間と場所、試験項目を示す。また、図(1)-9に試験を行った区画を示す。H29年度とH30年度はそれぞれ違う場所を刈り払った。表(1)-2に各区画の設定条件を示す。

表(1)-1 試験期間中の実験期間と場所、試験項目

実験期間	場所	実験項目
H28/6	宮城県伊豆沼	ハスの繁茂状況の確認
H28/8	宮城県伊豆沼	パドル機構の確認、横カッターによるハス、ヒシの切断、手動遠隔操縦による航行
H28/11	宮城県伊豆沼	自動航行制御の精度検証
H29/2	宮城県伊豆沼	自動航行制御の精度検証、電動シリンダの動作検証
H29/3	宮城県伊豆沼	自動航行制御の精度検証、風速、風向データの取得

H29/6	宮城県伊豆沼	自動航行によるハスの刈払い
H29/6	千葉県ごんぶくろ池	スイレンへの適用性の確認, 手動遠隔操縦による航行
H29/7 1回目	宮城県伊豆沼	自動航行によるハスの刈払い, 画像処理による水草, 障害物の識別システムのためのデータ収集
H29/7 2回目	宮城県伊豆沼	自動航行によるハスの刈払い, 画像処理システムのデータ収集
H29/8	宮城県伊豆沼	自動航行によるハス, ヒシの刈払い, 画像処理システムのデータ収集
H29/11	宮城県伊豆沼	自動航行実験
H30/6	千葉県手賀沼	自動航行によるハスの刈払い
H30/6	宮城県伊豆沼	自動航行によるハスの刈払い, 画像処理システムのデータ収集, ドローンによる空撮
H30/7	宮城県伊豆沼	自動航行によるハスの刈払い, ドローンによる空撮
H30/8	宮城県伊豆沼	自動航行によるハスの刈払い, 画像処理システムのデータ収集, ドローンによる空撮
H30/8 2回目	宮城県伊豆沼	自動航行によるハスの刈払い, 画像処理システムのデータ収集, ドローンによる空撮



図(1)-9 刈払実験を行った区画

表(1)-2 区画設定条件一覧

年度	区画名	区画寸法	パス間隔	刈払い回数	面積合計 (含重複)
H29	Area. A	30 × 100 m	1.2 m	1回	0.3 ha
H29	Area. B	10 × 100 m	1.0 m	1回	0.1 ha
H30	Area02~15	20 × 50 m	0.6 m	1, 2, 3回	1.2 ha (2.1 ha)

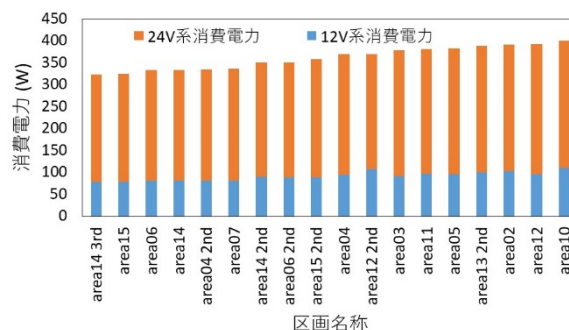
4. 結果及び考察

(1) 電力消費率

本研究で開発したロボットボートは、電動モーターによって駆動されるため、電力の消費率を正しく把握することが重要である。例えば、一日一定時間の連続作業が要求されている場合は、作業途中のバッテリー交換が不要となる十分な容量のバッテリーを搭載する必要がある。図(1)-10に、各試験区画で得られた平均電力消費率を示す。24 V系は、推進動力、12 V系はカッターの動力である。区画によって値が異なるのは、各区画でハスの繁茂状況が異なっていたためである。たとえば、最も消費電力の低いarea14 3rdは、3回目の刈払でハスの密度が低い状況だった。また、消費電力の最も高いarea10は、8月後半の最も繁茂した状態での1回目の刈払だったため、ハスの抵抗が最も大きかったと考えられる。消費電力は、最も少ない時で、24 Vが245 W、12 Vが78 W、最も多い時で、24 Vが289 W、12 Vが110 Wであった。このことより、ハスの最盛期に一日8時間バッテリーの交換なしに作業を行うためには、24 Vシステムの電力量は、289 W×8 h=2312 Whとなり、バッテリー容量としては、24 V 96 Ah必要となる。また、12Vシステムの電力量は、110 W×8 h=880 Whとなり、バッテリー容量としては、12 V 73 Ah必要となる。本実験

で、搭載した24 Vバッテリーは、40 Ahだったため、およそ2.5倍の容量アップが必要と考えられる。また、12 Vバッテリーは80 Ahだったので、十分な容量であった。

ロボットボートは、前後のバランスを取るために20 kgの砂利を船尾に積載している。今回使用したO' cell社製のリチウムリン酸鉄バッテリーでは、追加の60 Ah分の重量は16 kgである。砂利の代わりに24 Vバッテリーを積載することは、ボートの機動性を損なう重量増加を招くことなく、稼働時間を延ばせることから、現実的な対策であると考えられる。

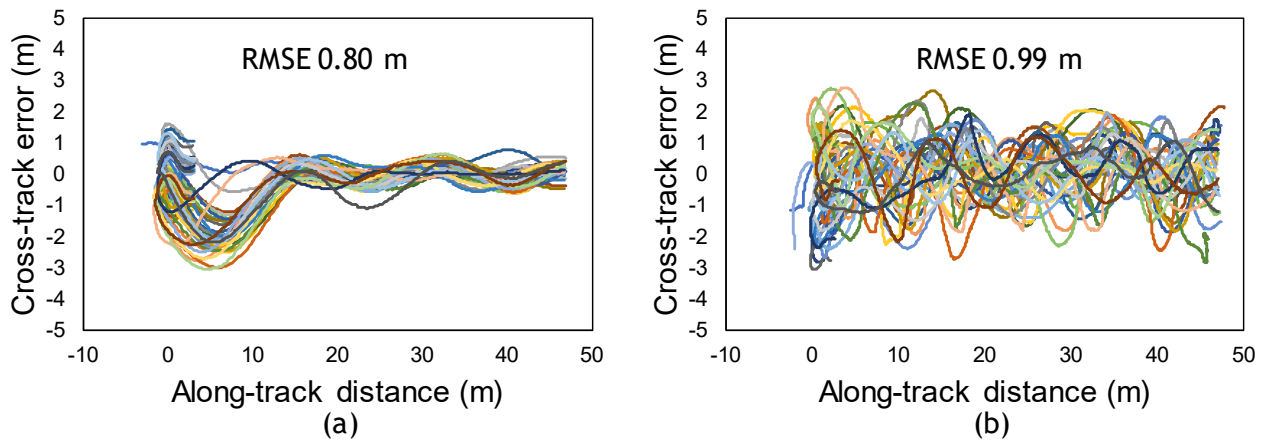


図(1)-10 刈払実験を行った区画

(2) 自動航行の精度

ロボットボートにおいて、最も重要な性能の一つが、自動航行の精度すなわちどれだけ経路から外れないかということである。経路から外れることで刈り残しが生じてしまう可能性が高い。前述の通り、ロボットボートの位置は誤差2.5 cmのRTK-GNSSによって計測されるが、風や水の抵抗、ハスの抵抗などが外乱となり経路から離れる恐れがある。また、方位誤差に対する左右パドルの回転差の付け方(制御ゲイン)やパドルの制御の遅れなどによって、自動航行の精度は大きく左右される。本研究においては、多くの区画において、ボートの走行データを取得したが、その中でもいくつかの特徴的な結果を示す。図(1)-11に、ボートの経路に対する横方向偏差を示す。縦軸は横方向偏差で、横軸はある経路に沿ったスタートからの進行距離である。線の色の違いは、一つの区画で、複数の経路があったため、それらを区別している。経路の数は、1区画当たり20m(区画の幅)÷0.6m(経路の間隔)=33経路となった。Area06は、2018年6月30日に1回目の刈払を行った箇所、立葉が出始めの頃である(図(1)-12(a))。このグラフより、ボートはスタート直後最大3m程度離れるが、その後は経路に沿って航行を行ったことがわかる。ハスの抵抗が少ないため、ボートの挙動は安定している。走行精度の目安となる二乗平均平方根(Root Mean Square Error(RMSE))は0.8 mであった。

また、Area10は、2018年8月28日に1回目の刈払を行った箇所、ハスの葉の最盛期である(図(1)-12(b))。この時は、ハスの葉は水面より高く持ち上がり、6月と比較して面積当たりの茎の密度が高かった。この時の横方向偏差を見ると、Area06の結果と比較して、安定しておらず、パス毎に異なる軌跡を通ったことがわかる。その一方で、最大誤差は3m程度と、Area06と差がなかった。また、RMSEは0.99 mとなり、やはり、Area06と大きな差は見られなかった。このことより、本ボートの構造上、ハスの刈払いにおいて、ハスの抵抗によりボートが左右に蛇行することは避けることはできないことがわかった。水中でハスの茎がカッターに当たると中心からの距離に比例したモーメントが生じる。これにより、ボートの進行方向が変わってしまう。この問題を解決するには、1) ボートの重量を重くし、慣性モーメントを大きくする、2) カッターのモーターの回転速度を上げ、ハスの茎が抵抗になる前に切断を行う、3) パドル制御を細かく行い、ハスの抵抗によるモーメントに瞬時に対抗する、等の対策が挙げられる。



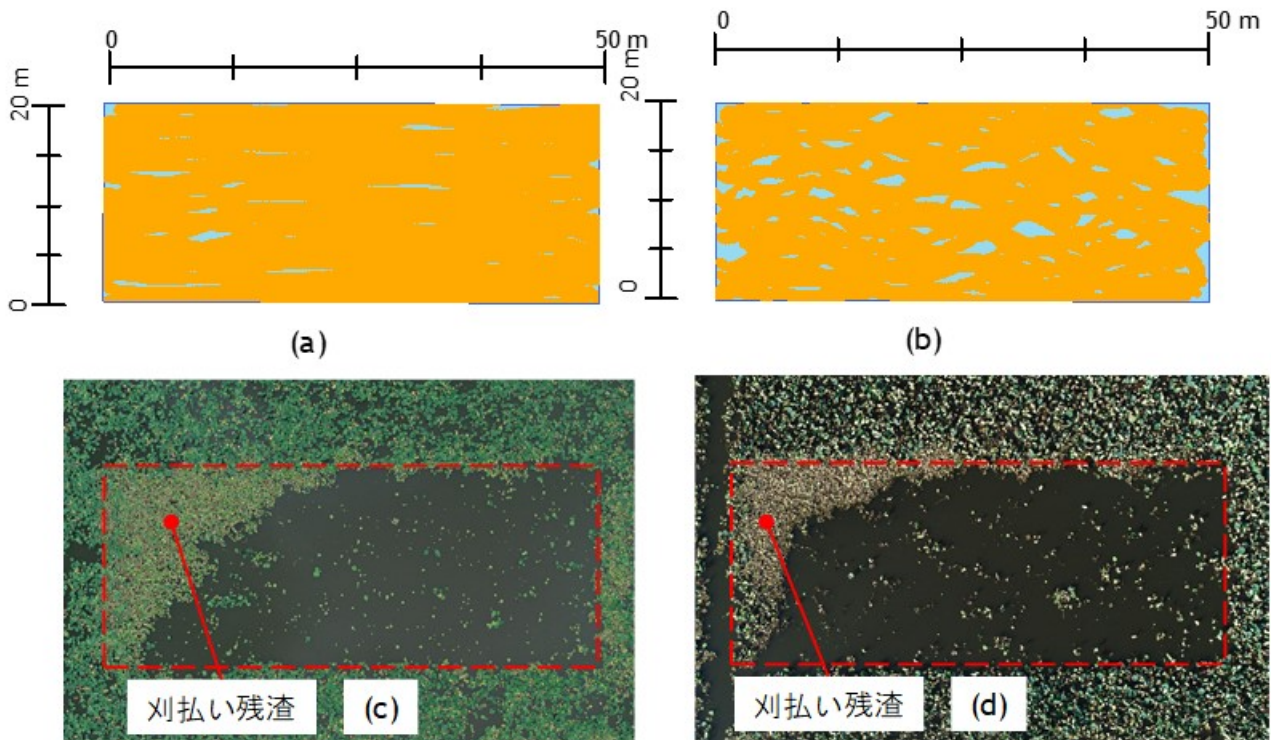
図(1)-11 ロボットボートの横方向偏差(a)Area06 (b)Area10



図(1)-12 ハスの繁茂状況の違い(a)Area06を刈り払いした6月30日, (b)Area10を刈り払いした8月28日

(3) 刈払い面積率と作業効率

ロボットボートの横カッターの刈幅は1.2mである。ボートの航跡と設定経路との誤差が無ければ経路の間隔は刈幅と等しい時に最も作業効率が高くなる。しかしながら自動航行の結果で示した通り、必ず誤差は生じる。2017年度の実験では、経路間隔を1.2mにしたところ、約30%の刈残しが生じた。そこで、2018年度は経路間隔を0.6mとしてサイドラップ（経路に並行した横方向の重なり）を設け、刈残しを10%以下に減らすことが可能となった。図(1)-13にArea06とArea10の航行軌跡から算出した刈払い領域と、刈払い1週間後のドローンによるオルソ画像を示す。図(1)-13(a), (b)で、オレンジ色で塗りつぶされている領域は、カッターが幅1.2mで通った後である。Area06では、97%、Area10では91%の領域の刈払いが行われた。1週間後でも刈払われた残渣は水面に浮かび、風に吹き寄せられて端に溜まっていることがわかる。また、オルソ画像で、刈払い領域内に残っているハスは刈残したものである。



図(1)-13 航行軌跡から算出した刈払い領域と、刈払い後のドローンによるオルソ画像(a)Area06の刈払い領域、(b)Area10の刈払い領域、(c)Area06の刈払い後、(d)Area10の刈払い後

また、それぞれの領域の10 aの作業に要した時間、作業能率を表(1)-3に示す。ハスの密度が低い時と濃い時で約2倍の違いが出た。最もハスが繁茂している状況では、作業能率は0.06ha/hとなった。1日8時間作業すると、最小でも一日当たり0.5haの作業を行える能力を有していることがわかった。ロボットボートは、ターンの際にかなりの時間を要するため、実際の運用では、できるだけ直線部を長くした経路を設定することが望ましいと考えられる。

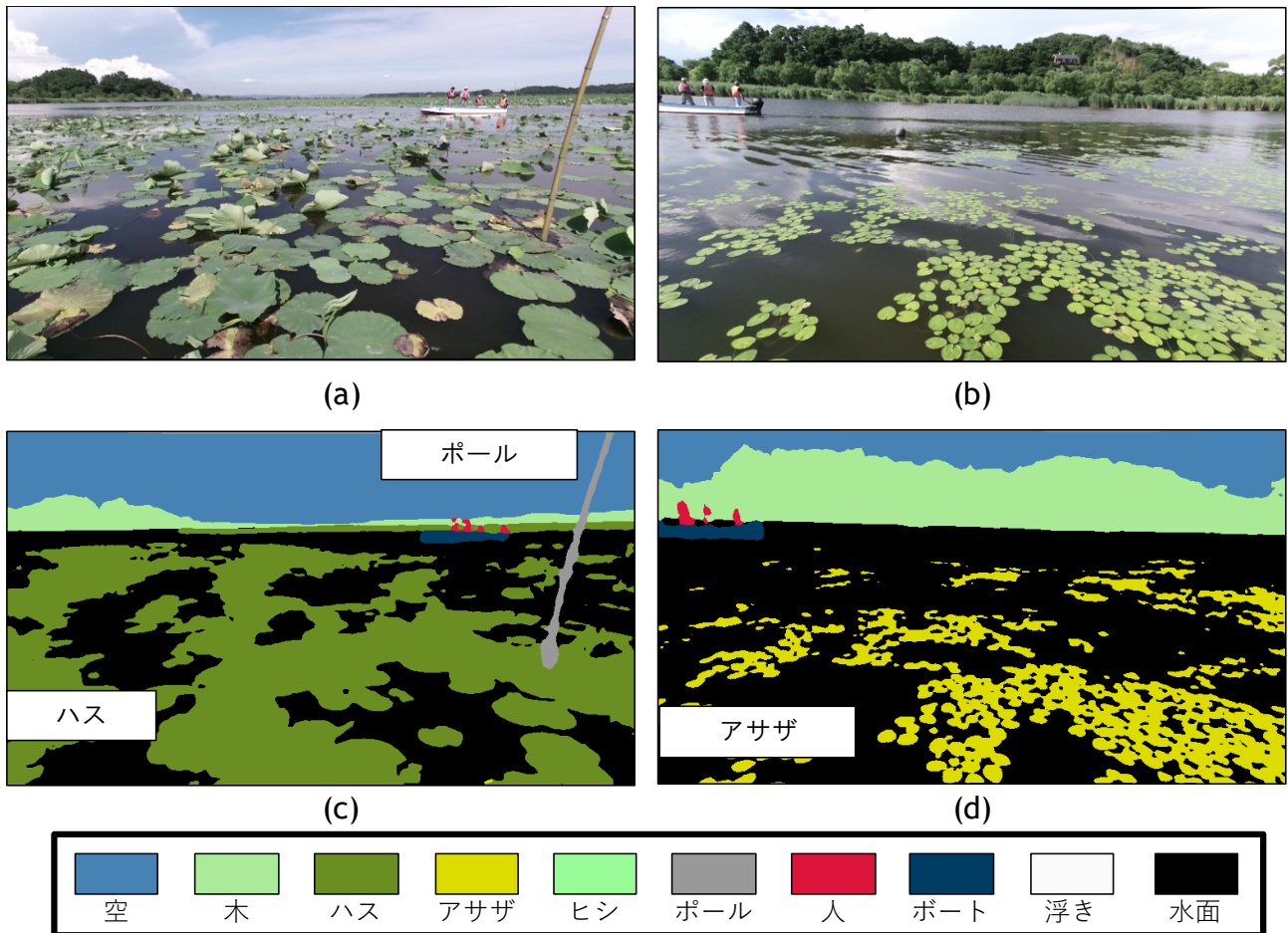
表(1)-3 作業時間と作業能率

	Area06 2018/6/30	Area10 2018/8/28
作業時間(s)	2556	4991
作業能率(ha/h)	0.14	0.06

(4) 画像処理を用いた近接リモートセンシングによる植物種の判別および障害物検出

① 分類精度

CNNを使ったセグメンテーションによって、ロボットボートから見たシーンを「ポール」「木」「アサザ」「ハス」「ヒシ」「空」「人」「ボート」「浮き」「水面」の10クラスに分類した。図(1)-14に元画像とCNNによって分類されたセグメンテーション画像の一例を示す。(a)は、水面に主としてハスがあるシーンで画像の右側にポールが一本見える。(c)のセグメンテーション結果において、ポールを始め、空、遠くに見える木、遠くハス群落、人、ボート、水面、近くハスがおおよそ正しく識別できていることがわかる。また、(b)は、水面に主としてアサザがあるシーンである。ハスとアサザはともに緑色であり、似ているが、CNNによって正しく識別できていることがわかる。また、水面に映った木を誤って木と判断することがなかった。水面に雲や空が反射している部分についても正しく水面と判断することが可能となった。



図(1)-14 CNNによるシーンのセグメンテーション結果，(a)元画像（ハスとポールが含まれている），(b)元画像（主にアサザが含まれている），(c)(a)のセグメンテーション結果，(d)(b)のセグメンテーション結果

表(1)-4にクラスごとの分類精度を示す。正解率は、正解推定ピクセル数／真ピクセル数を％表示したものであり、IoU(Intersection over Union)は、正解推定ピクセル数／（真ピクセル数＋全推定ピクセル数 - 正解推定ピクセル数）を％で表したものである。ハスとアサザについては、90％の正解率で分類することができた。ヒシは、データセット中の割合が低いために正解率が低かった。しかしながら、今後ヒシ群落の画像データセットを追加すれば正解率が上がると予想される。水面に浮かぶ植物は偏光レンズをカメラに取り付けた場合でも、鏡面反射を完全に除去することができないため、RGBやHSVの値を基にした分類は容易ではない。しかし、図(1)-14を見ると、水面の反射の影響が大きいかかわらず、画像奥の分類も可能であることが分かる。CNNでは色に加えて形状などの空間情報も同時に学習するため、反射の影響を低減させていると考えられる。水面上でも植物の分類が可能であることが確認されたこのにより、将来的にこの画像処理手法を用いて刈残したハスへのロボットボートの誘導、ならびに、アサザなどの希少種の保護を目的としたロボットボートの回避行動を自動的に行える可能性が示された。

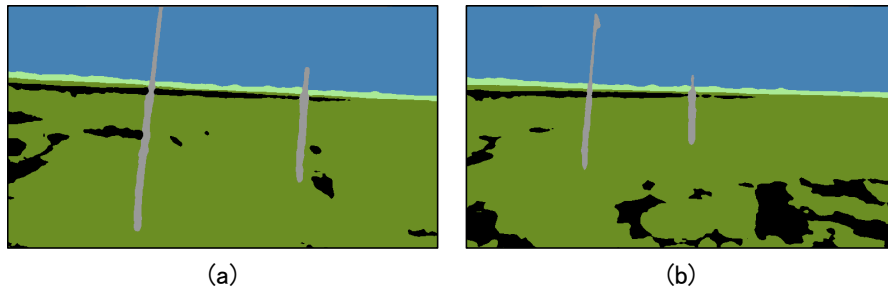
ポールに関しては、正解率が、89.3％だったが、IoUが59.5％と低くなった。これはポールの形状が細長く、境界部分で誤判定した領域が、全体に対して大きな割合になるためである。しかしながら、画像上において部分的でもポールが検出されればロボットボートはそれに対して回避行動をとることが可能である。よって、IoUの低さは問題とはならないと考えられる。

表(1)-4 クラス別分類精度

	ポール	木	アサザ	ハス	ヒシ	空	人	ボート	浮き	水面	平均
正解率%	89.3	95.4	88.3	91.9	14.1	99.4	52.0	88.6	0.0	86.8	70.6
IoU*	59.5	88.8	80.5	85.2	13.8	98.0	42.8	66.9	0.0	77.9	61.3

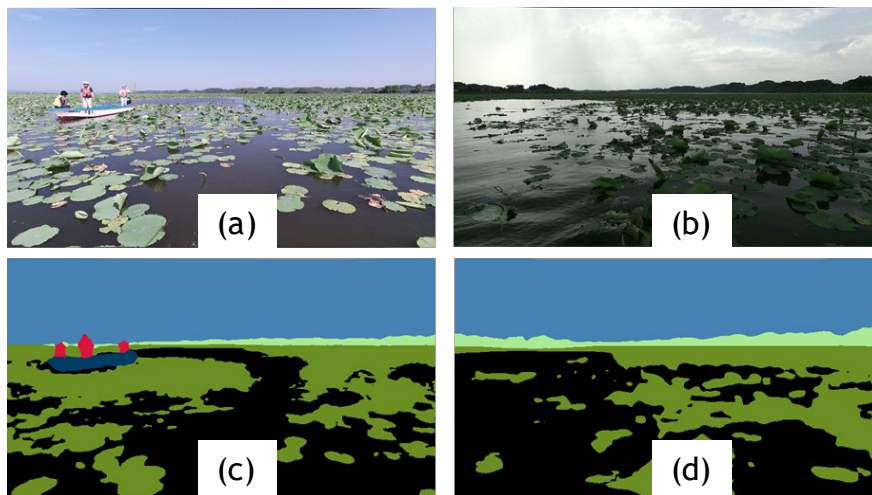
② 異なる障害物までの距離および異なる照度における推定結果

本画像処理システムでは、まずCNNによるセグメンテーションでポール等の障害物を検出し、距離画像に重ね合わせることで、障害物までに距離を推定し、ボートに対する位置を計算する。予備実験の結果距離は4mまで検出できることがわかったため、ポールまでの距離が1mと4mの場合で結果を比較した。図(1)-15に異なる障害物までの距離における推定画像を示す。この結果より、距離が離れてもポールの検出が可能であることが明らかとなった。



図(1)-15 異なる距離における推定画像 (a)左のポールまで距離1m, (b)左のポールまで距離4m

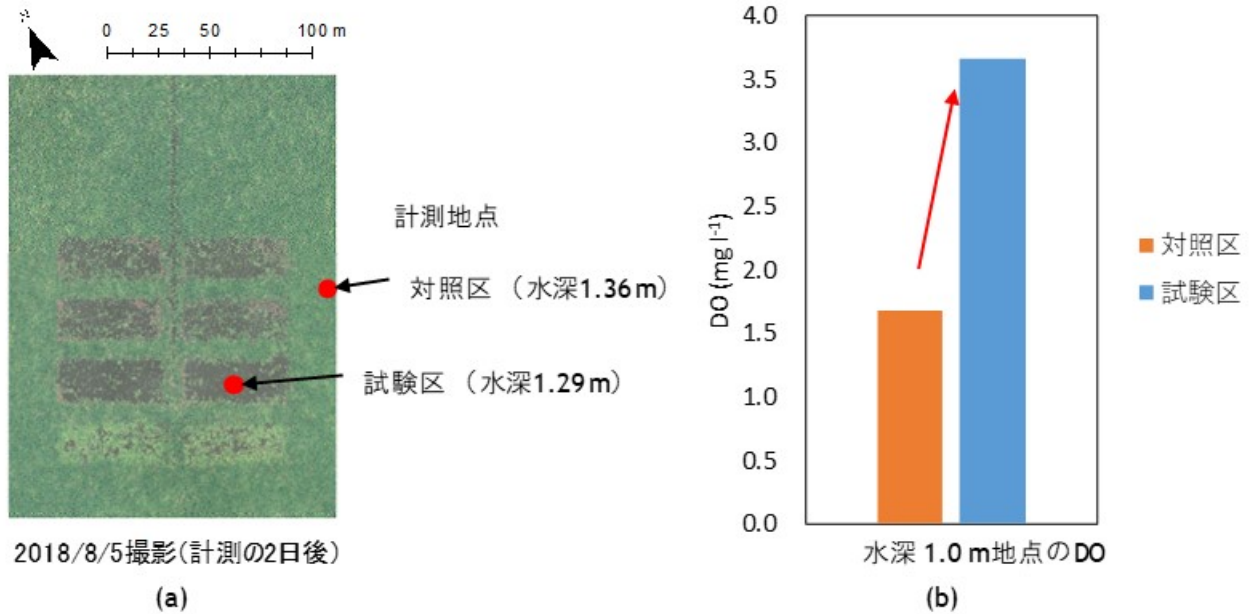
また、水面では天候により照度が大きく変化する。照度に対するロバスト性を検証するため、晴天(約10万ルクス)と曇天(約1万ルクス)の場合の推定結果を比較した。図(1)-16に異なる照度における推定画像を示す。この結果より、どちらの条件でも大きな違いなく分類が可能であることがわかった。



図(1)-16 異なる照度における推定結果 (a)晴天時の元画像, (b)曇天時の元画像, (c)晴天時の推定結果, (d)曇天時の推定結果

(5) 刈払いによる水質への影響

安野ら²⁾はハスが繁茂することにより、湖水が貧酸素化し、底生動物の生息が困難になることを明らかにした。ロボットボートによる刈払いによって、溶存酸素濃度が変化するか計測した。2018年8月3日の晴天時に図(1)-17(a)で示すように試験区と対照区で溶存酸素濃度(Dissolved Oxygen(DO))を計測した。その結果、図(1)-17(b)で示すように、刈払いを行った試験区で酸素濃度の著しい向上が見られた。



図(1)-17 刈払いによる溶存酸素濃度の変化, (a)計測地点, (b)溶存酸素濃度の変化

(6) 刈払いによる水鳥への影響

伊豆沼においては、ハスを刈払うことにより開水面が増え、マガンのねぐらが増えることが予想される。マガンはできるだけ岸より離れた開水面を好むことが観察されている。そこで、2018年の10月17日から11月13日にかけて、刈払いを行った場所を定点カメラで撮影した。また、10月29日の早朝にドローンによって上空からの撮影を行った。図(1)-18に定点カメラによる画像を示す。マガンがいる領域を点線で囲んでいる。10月19日の早朝にマガンが刈払いを行った場所に来ていることがわかる。また、図(1)-19にドローンから撮影した刈払い領域の画像を示す。マガンがねぐらとして刈払い領域を使っていることがわかる。



図(1)-18 定点カメラによるマガン飛来の確認



図(1)-19 ドローンによるマガン飛来の確認

(7) 刈払いの時期による繁茂状況の変化

ハスは、地下茎が伸長してその節から茎を伸ばし、水上で葉を展開する。それゆえ、前年度にレンコンが残っていると次の年はそこから再び成長を始める。食用のレンコンの場合、10aあたり300kgの種レンコンを使用する。芦澤ら²⁾は伊豆沼において、ハスの刈払いを行い、1シーズンに2回以上刈払うことで葉柄の密度を大きく減少させられること、2年連続して刈払いを行うことで、3年目の出現を抑えられ

ることなどが明らかとなった。ここでは、2018年度に単年度で行った結果と、2017, 2018年度に複数年で行った結果を示す。

① 刈払い回数と時期による違い（単年度）

表(1)-5に刈払い時期を示す。また、図(1)-20に2018年9月6日に撮影した刈払い試験区のオルソ画像を示す。各区域の横に振られたアルファベットは、刈払いを行った時期を示してある。例えば、Cは、時期Cに1回だけ刈払いを行った場所であり、ABCは、時期A, B, Cに合わせて3回刈払いを行った場所である。

この結果を見ると、まず、1回だけ刈払いを行った個所に注目すると、第一に時期Aに刈払いを行った場所については、刈払いを行っていない場所と比較しても、あまり違いがない。刈払い後2か月経過すると、かなり再生することがわかった。B, C, Dも1回だけの刈払いだが、時期が遅れるにしたがって再生の度合いが低下していることがわかる。

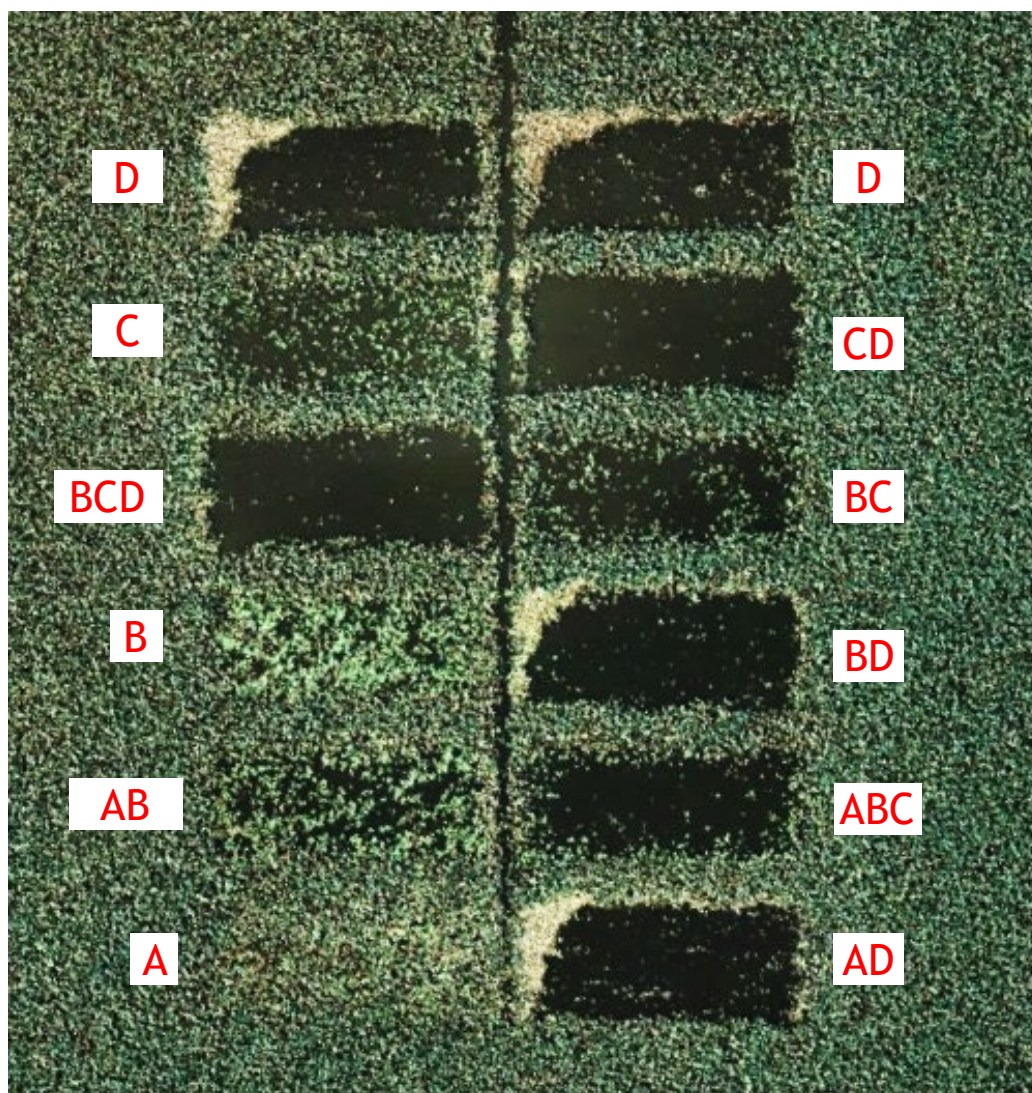
次に2回刈払いをおこなった個所に注目する。ABは、Aに比べて当然ながら葉の面積が少ない。その一方でBに比べても少なくなった。また、BCは、Bに比べて少なく、Cと比較しても少ない結果となった。AD, BD, CDはDを行ったあと5日しか経過していないため、Dとの違いは見られなかった。しかし、地下茎がどれくらい育っているかについてはわからないため、今後の観察が必要と考えられる。

3回刈払いを行った個所については、ABCは最後に刈払いを行ってから1か月経過しているが、Dの時期に刈払った個所と大きな差が見られない。このことから、3回刈払いを行うと最も再生を抑えられることがわかる。ABCとBCを比較すると、最後の刈払いの時期は一緒だが、ABCの方が成長が抑制されていることがわかる。しかし、3回刈払いをおこなうと作業時間が3倍かかることになる。作業コストや作業面積を考慮に入れて刈払いの計画を立てる必要があると考えられる。

以上の結果より、単年度であれば、Dの時期に1回だけでも刈払いを行うことで、ハスを外見上減らすことに効果的であることがわかった。また、ABCの3回刈払うことで、最盛期であるDに刈払うのと同じ効果が得られることがわかった。芦澤らが用いた、ボート取り付け型の刈払い装置では、ハスの成長後期における刈り取りが困難であった。しかし、その作業効率 0.21 ha/h と、ロボットボートの6月30日の結果と比較して1.5倍高くなった。一方で本研究において開発したロボットボートはハスの成長後期の最盛期であっても刈り払いが可能であり、刈払いの作業期間を延長することが可能である。そこで、効率的にハスの管理を行うためには、どちらか一方ではなく、二つの手法を同時並行的に使用し、ハスの密度が低い初期段階では主に有人ボートによる刈払いを行い、ハスの密度が高くなってきたら主にロボットボートによる刈払いを行うことが望ましい。

表(1)-4 クラス別分類精度

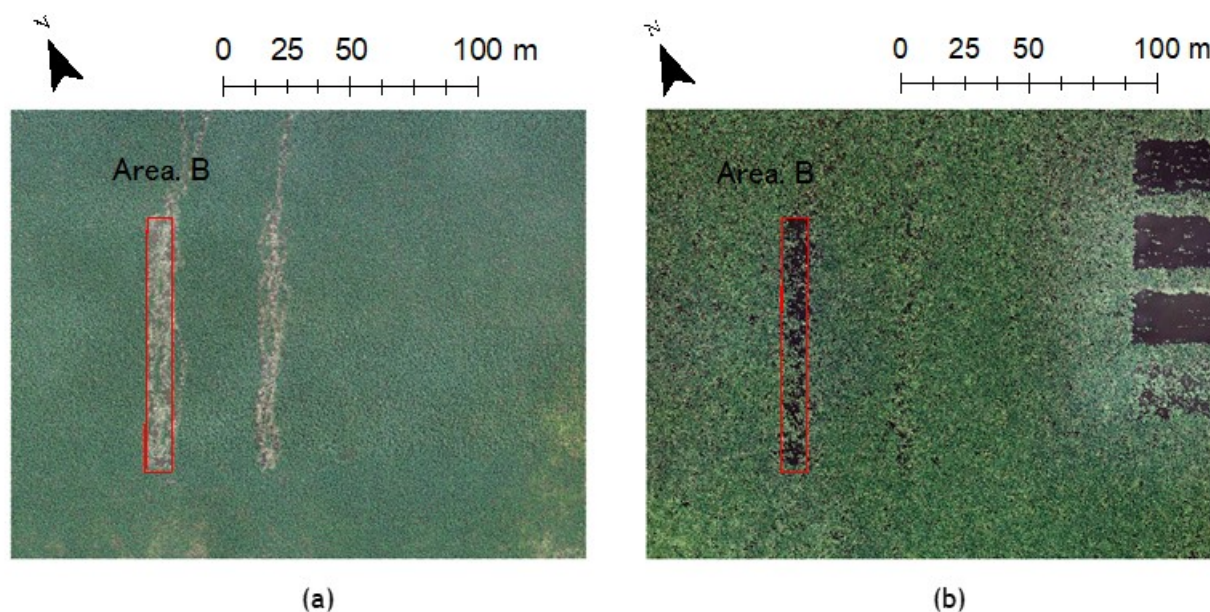
ラベル	刈払い時期
A	2018/6/29-30
B	2018/7/20-23
C	2018/8/5-7
D	2018/8/28-9/1



図(1)-20 刈り払い時期と回数による違い

② 刈り払い回数と時期による違い（複数年度）

2017年度はロボットボートの性能改良が主なテーマだったため、2018年度のように多くの試験区を設定して実験を行うことはできなかった。2017年8月28日に刈り払いを行った個所と翌年7月22日の同一個所の画像を図(1)-21に示す。7月22日の時点では、前年度に刈り払い場所での抑制効果が確認できる。このことから、刈り払いが1回でなおかつ、成長の後期であっても刈り払いによるハスの抑制効果があることが明らかとなった。しかしながら、8月には周囲から成長してきたハスにより、前年度の刈り払いの後は目視では確認できない状態となった。刈り払いを行う場合は、できるだけ面積に対して、周辺の刈り払っていない場所との境界線の長さが短くなるように留意すべきである。これにより、ハスの侵入を防ぐことが可能となる。



図(1)-21 刈り払い時期と回数による違い(複数年度) (a)2017年8月28日刈り払い後 (b)2018年7月22日の同一個所

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまで、ハスの刈り取りは主に手刈りによって行われてきた。しかし、手刈りは重労働であり、広い面積を効率的に刈り取りすることは非常に困難であり、有効な手段がなかった。本研究では電動のパドルで駆動される小型ボートにバリカンタイプの水草カッターを取り付けてGPSで自動航行可能なロボットボートの開発を行った。これにより、ハスの刈り払いの省力化や低コスト化、省エネルギー化が実現した。従来開発されてきたロボットボートは、監視や測深、水質の測定、アオコの回収、浮草の回収などの軽作業が主であった。一方、本研究で開発したロボットボートは小型軽量でありながら、4節リンクによるパドル機構により水草の繁茂した水面を水草に絡まることなく航行可能である。これは、今後このロボットボートが、通常のボートでは水草がスクリューに絡まって航行が不可能な湖沼において、水域生態系モニタリングのプラットフォームとして有効であることを示唆している。

また、近接リモートセンシングによる湖面のシーン解析を行った。畳み込みニューラルネットワークを用いた画像処理により、水面の植物の種類を認識できることが可能となった。また、同時にロボットボートの航行の障害となる杭の検出も可能となった。今後ロボットボートをより智能化させることが可能となるであろう。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

日本各地の湖沼において、水草の異常な繁茂が問題となっている。外来植物だけではなく、在来植物の繁茂も報告されている。特定の水生植物が過剰に繁茂することで、生物の多様性が失われ、希少種が駆逐されたり、悪臭の原因となったり、また、漁業、レジャーの妨げとなっている。しかし水草の刈り取りには、大きなコストと労力を要する。また、大型の機械が入れない場所も多い。本研究で開発したロボットボートは、小型で運搬が容易で、製造コストが安く、省エネルギーである。電動のため、環境負荷も少ない。その一方で通常の船では航行不可能な水草の密集した中を独自のパドル機構によって航行可能である。本研究成果は、今後日本全国の水草の異常繁茂問題に困っている湖沼の管理に活用が見

込まれる。自動航行が可能のため、人手をかけずに水草の管理を行うことが可能である。ハスだけではなく、ヒシやオオカナダモの刈払いにも適用可能である。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 【予定】横山諒, 山田浩之, 木塚俊和, 海津裕, 遊佐健, 牛山克巳: 湿地研究(印刷中) 農業活動がラムサール条約湿地宮島沼の水質の時空間変動に及ぼす影響

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない

(2) 口頭発表(学会等)

※発表済みのもの又は確実に発表する予定のものにとどめること。

- 1) 遊佐健, 海津裕, 芋生憲司, 農業食料工学会関東支部第53回年次報告(2017) 湖沼の植生管理用ロボットボートの開発
- 2) 遊佐健, 海津裕, 芋生憲司, 第76回農業食料工学会年次大会(2017) 湖沼の植生管理用ロボットボートの開発
- 3) Takeshi YUSA, Yutaka KAIZU, Kenji IMOU, 9th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering (ISMAB) in Korea(国外)(2018) DEVELOPMENT OF A ROBOT BOAT FOR AQUATIC WEED MANAGEMENT IN A SHALLOW POND
- 4) Keishiro Kuma, Takeshi Yusa, Yutaka Kaizu, Kenji Imou, 9th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering (ISMAB) in Korea(国外)(2018) Image Recognition of Natural Scene Using Deep Learning for Autonomous Vegetation Management Robot Boat in Lake
- 5) 九間啓士朗, 遊佐健, 海津裕, 芋生 憲司, 農業環境工学関連5学会2018年合同大会(2018) ハス刈りロボットボートの自律走行化に向けた画像処理による走行環境認識
- 6) 遊佐健, 九間啓士朗, 海津裕, 芋生 憲司, 第13回伊豆沼・内沼研究集会(2019)水草刈払いロボットボートの開発と伊豆沼・内沼における運用事例
- 7) 九間啓士朗, 遊佐健, 海津裕, 芋生 憲司, 第13回伊豆沼・内沼研究集会(2019) ハス刈りロボットボートの自律航行のための画像処理による環境認識

(3) 知的財産権

特に記載すべき内容はない

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 第11回伊豆沼・内沼研究集会「環境研究総合推進費 推進課題 1-1602フィールド調査とロボット・センサ・通信技術をシームレスに連結する水域生態系モニタリングシステムの開発特集」(主催: (公財)宮城県伊豆沼・内沼環境保全財団, 2017年2月18日, 宮城県伊豆沼・内沼サンクチュアリセンター, 観客54名)にて成果紹介
- 2) 海津裕・小川健太・山田浩之・嶋田哲郎, 平成29年度伊豆沼・内沼自然再生協議会及びラムサールトラリアングル関係者現地視察(宮城県主催, 2017年8月29日, 宮城県栗原市内沼及びサンクチュアリセンターつきだて館, 60名参加)にて公開デモンストレーションを実施
- 3) 嶋田哲郎・海津裕・遊佐健・松田亜希子・山田浩之, 日本鳥学会2017年度大会(2017年9月16日, 茨城県つくば市筑波大学, 40名参加)にて自由集会「ロボットやネットワークカメラ, ドローン

を活用した湿地生態系の監視・管理システムの構築」を実施

- 4) 山田浩之・海津裕・遊佐健・鈴木透・高橋佑亮・横山諒, ELR2017 (日本緑化工学会・日本景観生態学会・応用生態工学会主催, 2017年9月22日, 愛知県名古屋市名古屋大学, 50名参加) にて研究集会「ロボット・UAV・ネットワークカメラを用いた湿地生態系の監視と管理」を実施
- 5) 海津裕, 農業IoTシンポジウム(2018)環境保全におけるロボット・センサ・通信技術の活用 (主催: NPO法人M2M・IoT研究会, 2018年2月24日, 東京大学弥生講堂アネックス・セイホクギャラリー, 聴講者70名)
- 6) 海津裕, 第17回世界湖沼会議, (2018), ノダック株式会社ブースにてロボットボートの展示 (主催: 茨城県, 公益財団法人国際湖沼環境委員会, 2018年10月15日~19日, 茨城県つくば国際会議場)
- 7) 第13回伊豆沼・内沼研究集会 (宮城県伊豆沼・内沼サンクチュアリセンター, 2019) にて推進費関連発表6本。

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 朝日新聞 (2017年6月7日宮城県内版, 「ハス刈り, ロボット船が助っ人 伊豆沼などで実験」)
- 2) 河北新報 (2017年8月30日, 「伊豆沼・内沼 最新機器が生態系守る 東大開発の無人ボートで水草刈り」)
- 3) 毎日新聞 (2017年9月6日, 「伊豆沼・内沼 無人小舟などで湖沼湿地の環境保全めざす」)
- 4) NHK首都圏ニュース (2017年6月22日, 首都圏版, 「ロボットで外来種のスイレン駆除」)
- 5) 毎日新聞 (2017年6月26日, 全国版, 「スイレン駆除東大大学院准教らロボットボートで切断実験」)
- 6) 東京新聞 (2017年7月1日, 千葉県版, 「ロボットボートでスイレン刈り取り 柏・ごんぶくろ池自然博物公園」)
- 7) 朝日新聞 (2018年6月15日, 千葉県版, 「手賀沼の群生ハス, ロボットボートで刈り取り」)
- 8) 読売新聞 (2018年6月15日, 千葉県版, 「ハスの大量繁殖防げ!…手賀沼」)
- 9) 毎日新聞 (2018年6月15日, 千葉県版, 「ロボットで刈り取り 東大大学院開発 大量繁殖の手賀沼で初実験」)
- 10) 東京新聞 (2018年6月17日, 千葉県版, 「ロボット舟で刈り取り実験 手賀沼のハス繁茂抑えよ」)
- 11) FM西東京 (2018年8月14日, 「『食・農・森』 (食べる・作る・育む) ~東大生態調和農学機構から第37回」)
- 12) テレビ朝日 (2018年12月27日, 「羽鳥慎一モーニングショー, そもそも総研, 労働力不足を解消!? “無人化” 最前線」)
- 13) 毎日新聞 (2019年2月22日, 宮城県版, 「生態調査・保全に新技術」)

(6) その他

- 1) 農業食料工学関東支部ベスト・ペーパー奨励賞, 農業食料工学会関東支部第53回年次報告, 2017年6月9日, 遊佐健

8. 引用文献

- 1) 芦澤淳, 星雅俊, 藤本泰文, 嶋田哲郎: 伊豆沼・内沼研究報告, 9, 61-70(2015) 湖沼における刈払い装置を用いたハス群落の抑制方法に関する試験
- 2) 安野翔, 嶋田哲郎, 芦澤淳, 星雅俊, 藤本泰文, 菊地永祐: 伊豆沼・内沼研究報告, 9, 13-22(2015) 伊豆沼のハス群落拡大に伴う貧酸素化の底生動物群集への影響

II-2 ドローンを用いた空中からの生物相 モニタリング（サブテーマ2）

酪農学園大学

農食環境学群環境共生学類

小川 健太・鈴木 透

平成28～30年度累計予算額：22,925千円

（うち平成28年度：7,100千円，平成29年度：8,115千円，平成30年度：7,710千円）

累計予算額は，間接経費を含む。

【要旨】

平成30年度は，平成28，29年度に構築したドローン・システムについて伊豆沼での実用試験を行い，実用可能性を検証し，マニュアルを作成した。マガンのカウントに関しては，ドローンによるマガンの撮影方法，カウント・プログラムを改良し，確立した。ドローンやPCなども機器の一般的な機器で対応できるため，実用可能性が高いドローン・システムを構築することができ，構築したマガン・カウントを行うためのドローン・システムのマニュアルも作成した。水鳥のインベントリーに関しても，ドローンによる撮影方法や分類手法について検討した結果，利用可能性はあると判断された。しかし，分類手法には様々な調整が必要であり特別な知識・経験が必要となり，ドローンやPCについても高機能の機器を用いる必要があるため，現時点では特定のユーザーのみ利用できる状況であり，一般のユーザーが使える実用レベルには達していないと考えられた。また，構築したドローン・システムを応用し，チュウサギやハクチョウ等特定の種に関する調査を行った結果，種ごとに労力や高度な分析技術が必要である場合もあったが，一般的な機器でも対応可能であり，これまで得られていなかったデータや知見を構築したドローン・システムにより新たに得られることが明らかになった。湿地生態系のモニタリングについては，多少データの分析に労力がかかる部分はあるが，ドローン・システムの実用可能性は高く，伊豆沼や宮島沼のハスなど植生や開放水面の変化，外来植物の現況などのデータを蓄積することができた。以上の成果より，現地の専門家とドローンの調査を担う担当者あるいは民間企業などが協力する体制を構築したうえで，今回開発・確立した撮影手法および画像解析手法等を技術を統合したドローン・システムを応用することにより，モニタリングの省力化，効率化を図り，湿地生態系に関する調査を継続的，広域に実施できると考えられる。

【キーワード】

UAV，個体数カウント，機械学習，インベントリー

1. はじめに

我が国には50ものラムサール条約湿地があり，それらの湿地や日本全国に点在する湖沼はガンカモ類やその他渡り鳥の飛来地であるとともに，貴重な動植物の生息地である。また，農業用水や観光，環境教育などの各種生態系サービスを提供している貴重な自然資源でもある。その一方で，埋め立てや干拓による自然湿地の減少や護岸工事による生育域の消滅，外来植物，外来生物の移入などの影響を受けている。湿地や湖沼の生物多様性を維持し，自然再生を図っていくためには，詳細な生態系のモニタリングと精密な管理が必要とされる。しかし，これには非常に大きなコストと労力がかかるため実施が難しい場合が多い。本研究においては，近年発達著しいロボットおよび情報通信技術を用いて，湖沼環境のモニタリングおよび管理を低コスト，省労力で行う事を目的とする。

サブテーマ（2）では，近年小型化，性能向上が進むドローンに搭載した高感度カメラやサーモグラフィを活用し，GPSによる自律飛行により，対象地域を撮影しマッピングすることが可能なことに着目し，行政課題の解決に資するデータの収集・分析が可能か，について研究を行った。図(2)-1に本サブテーマにて取り組むイメージを示す。

水鳥類および生息域の周辺植生を対象としてドローンを用いた効率的なモニタリング・システムの開

発を行った。モニタリング・システムでは、各種生物相のモニタリングに適したドローンのセンサ、操作方法、システムの評価に加え、ドローンの適正な運用方法や他地域への適用方法の検討も検討し取りまとめた。



図(2)- 1 水鳥モニタリングにおける課題解決のアプローチ

2. 研究開発目的

水鳥類および生息域の周辺植生を対象として、ドローンを用いた効率的なモニタリングシステムの開発、検証を行うことを目的として下記の項目を実施した。

(1) ドローンを用いた効率的なモニタリングシステムの検討

水鳥類や植生のモニタリングに適したドローンのセンサやカメラの設定、撮影方法などの検証を行った。

(2) 水鳥のモニタリングシステムの開発・検証

個体数が多くモニタリング調査で大きな労力を要するマガンを対象として、(1)で検討した方法により得られた画像から個体数をカウントするプログラムを開発した。水鳥全般についても、(1)で検討した方法により得られた画像からインベントリーを作成する方法について検討した。また、ハクチョウやチュウサギの種を特定した場合についても、生息状況の把握手法を検討した。

(3) 植生など湿地生態系のモニタリングシステムの開発・検証

湿地生態系の劣化要因である開放水面の減少や外来植物の侵入など植生を含めた周辺の土地被覆の把握を行い、データを蓄積した。

(4) ドローンを用いた効率的なモニタリングシステムの運用・評価

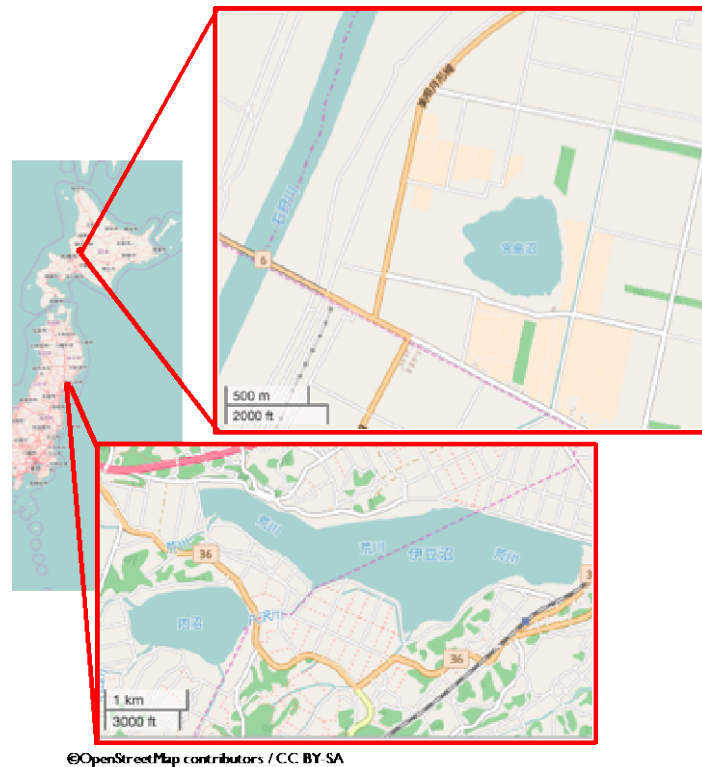
今回開発したモニタリングシステムの実用可能性について、利用可能性、ユーザビリティ、機器の汎用性から検討した。

3. 研究開発方法

(1) ドローンを用いた効率的なモニタリングシステムの検討

① センサの検討

空中からの水鳥の個体数カウントおよび行動モニタリング、沼周辺の植生のマッピング等、各種の生物相モニタリングに適した各種候補センサ(可視、近赤外カメラ、熱赤外カメラ、マルチスペクトル・カメラ、高感度カメラ等)とそのセンサ・サイズと重量に適したドローンを選定・設計する。自律飛行・地上操作・地上での映像確認を可能とするドローンモニタリングシステムを設計し、検証に必要な部分を試作する。北海道美唄市の宮島沼および宮城県伊豆沼を主な対象値として試験を実施する。また、安全な運用を目指して、ドローン関連の法規との整合性についても検討する。



図(2)- 2 研究対象地とした北海道宮島沼および宮城県伊豆沼・内沼

② 解像度 (GSD; Ground Sampling Distance) の検討

現在日本で行われている水鳥のモニタリングは主に種のインベントリーや種組成の把握、マガンやハクチョウ類といった渡り鳥の飛来数の把握を目的として実施されている。そのため、ドローンを水鳥のモニタリングに利用する際には、まず対象とする種を“検知”・“識別”するために必要な画像の解像度を把握し、ドローンの利用可能性も含めたフライトプランの検討が必要である。ここでは、鳥の姿を判別できることを検知 (detection) とし、種を判別できることを識別 (identification) と表現し (下写真を参照)、マガンやハクチョウ類といった渡り鳥の飛来数の把握には鳥を“検知”、種のインベントリーや種組成の把握には種を“識別”できる画像が必要となる。“検知”・“識別”に必要な解像度は、大きさの異なるガンカモ類のデコイや剥製について、異なる高度でドローンから撮影し、目視で検知、識別できる画像の解像度を把握することにより推定した。

なお、ここで「解像度」という用語を用いているが厳密には、Ground Sampling Distance (地上アンプリング距離=地上での位置画素のサイズ) を元に議論することとする。解像度は大気の状態やコントラストなどにも影響される一方でGSDは物体との距離とカメラ仕様により一意に決定できるので、より簡便で実用性が高い指標を提示可能である。

③ 撮影時間の検討

マガンの飛来数のカウントは、一般的に湖沼でマガンの休息している時間帯である日の出前 (ねぐら立ち前)、もしくは日の入り後 (ねぐら入り後) に実施する。そのため、マガンの撮影は日の出前、日の入り後といった薄暗い環境において実施する必要がある。ドローンに搭載されている標準のカメラはRGBカメラであり、薄暗い環境においてマガンを判別できるような明るい画像を撮影するためには、ISO感度を高くする、もしくは露出時間を長くすることが一般的なカメラの設定方法である。しかし、ISO感度や露出時間を必要以上に高くしすぎると“明るすぎる”画像となる。また、一般的にはISO感度を高くした画像はノイズが発生しやすくなり、ISO感度を高くしすぎるとノイズによりマガンの判別が困難になる。さらに、ドローンは完全に固定された状態での撮影はできないため、露出時間を長くするとドローンやカメラの動揺により画像が不鮮明となる恐れがある。そのため、薄暗い環境においてマガンを判別できる画像を取得できる“適度な”カメラ設定の検討が必要である。そこでまずマガンのねぐら入りについて、動態を把握し、ほぼねぐら入り完了する時間帯を調査した。さらにその時間帯においてよい画像が撮影できるカメラ設定 (ISO感度、露出時間) の検討を行った。

(2) 水鳥のモニタリングシステムの開発・検証

① マガンのカウント

開発したドローン・システムを用いて、北海道宮島沼にて適切な撮影方法等を検討を行い、実用可能性を評価した。水鳥のカウント・プログラムの精度検証を目視との比較、従来法による地上からの個体数カウントと比較することにより実施した。さらに、伊豆沼・内沼でも撮影を行い、目視カウントとの比較により評価を行った。

② 水鳥類のインベントリー

水鳥類のインベントリーを作成するために、まずUAVを用いた撮影方法の検討を行った。ここでは、カメラの撮影する角度を変化させ、上空からの画像でも体の模様が認識できるカメラの撮影方法の検討を行った。種の判別については、まず図鑑などにある写真から種を判別するプログラムを検討し、種の判別可能性やプログラムの設定について検討した後、UAVにて撮影した画像の判別可能性について検討した。判別プログラムは、畳み込みニューラルネットワーク (CNN)、Capsule Network (CapsNet) について検討した。使用したPC環境はLinux, Keras, tensorflowである。なお、UAVで撮影した画像を判別することを目的としているため図鑑の画像をUAVで撮影する画像に合わせた画素数に調整した。

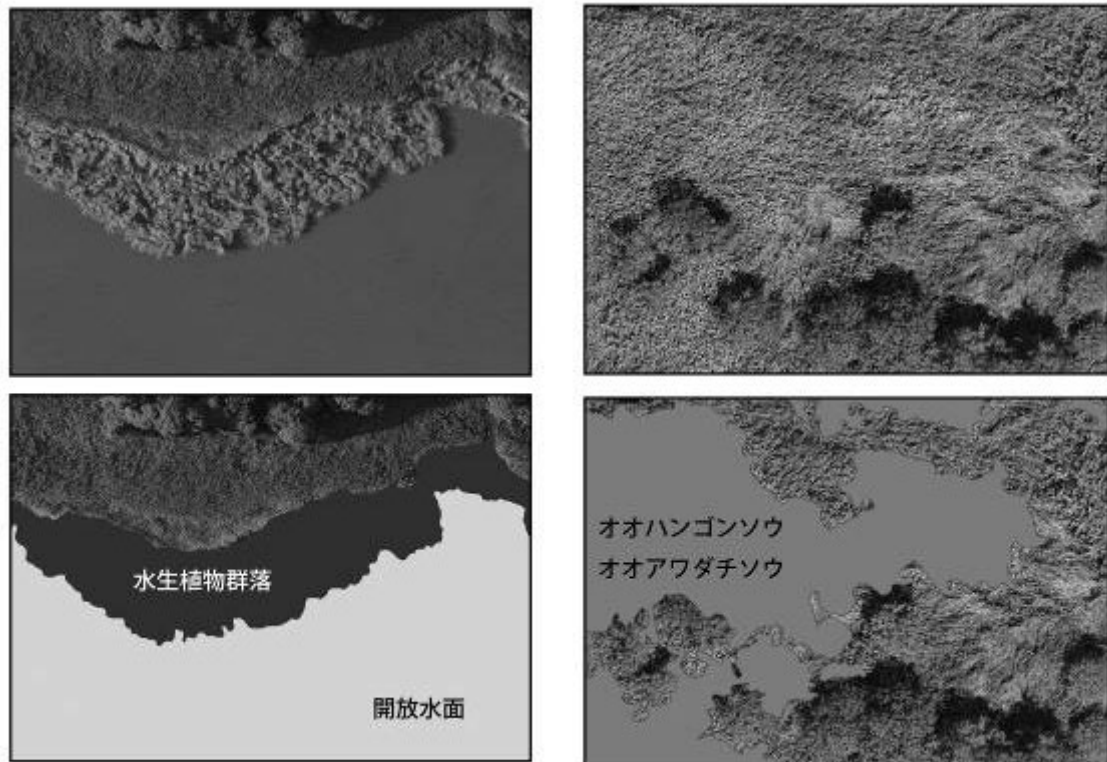
③ 特定種の調査

マガンのカウントや水鳥のインベントリー作成以外へのUAVの実用可能性を検討するために、ハクチョウ類とチュウサギの調査を行った。

チュウサギは水田などの農耕地で主に魚類や両生類を採餌しているサギ類である。宮城県伊豆沼・内沼においても、7月下旬から9月にかけて、湖沼内で魚類を採餌するチュウサギが多く観察される。しかし、湖沼におけるチュウサギの利用場所などの詳細な位置を調査することはハスの繁茂のため困難であり、湖沼内におけるチュウサギの生息地利用やハスの拡大による影響などの実態は明らかになっていない。そこで、UAVを用いたチュウサギの生息地利用に関するモニタリング手法を検討した。調査は伊豆沼内にハスやヒシの生育状況が異なるように南北に設定した7本のライン上で行った。UAVによる撮影は、各ラインの両サイド約25mの位置に平行に設定した2本のラインにおいて、上空45mから行った。使用したUAVはPhantom 4 Pro (DJI社製) であり、上空45mからの画像解像度は約1.2cm/pixelである。撮影は2018年9月8日・12日・16日・23日の計4回実施した。チュウサギやその利用環境の把握におけるUAVの利用可能性は、撮影した画像を用いたチュウサギの判別の可否、把握できた個体数から検討したサンプリングの効率性、ハスやヒシなどの植生の判別可能性について検討した。ハクチョウ類は北海道宮島沼でUAVを用いた撮影を行い、判読の有無について検討した。

(3) 植生など湿地生態系のモニタリングシステムの開発・検証

調査は北海道美唄市の西部に位置する北海道宮島沼と宮城県伊豆沼を対象とした。宮島沼は草地と森林に囲まれており、その周囲には農用地が広がっている。UAVによる画像の撮影はM. Zuiko 25mm f1.8 (オリンパス社製) のカメラを搭載したInspire 1 pro (DJI社製) を用いて、2017年9月5日、8日に実施した。開放水面と水生植物群落の判読を目的とした画像は、高度120m (画像解像度 約3.9cm/pixel) から宮島沼全域を撮影した。オオハンゴンソウ・オオアワダチソウの判読を目的とした画像は、高度50m (画像解像度 約1.2cm/pixel) から宮島沼とその周辺の草原・森林を撮影した。画像間のオーバーラップは80%、サイドラップを60%とした。UAVの操作アプリはDJI GS Pro (DJI社製) を用いた。撮影した画像について、目的ごとにSfm技術を用いてオルソ画像を作成した。オルソ画像に作成にはPhotoscan Professional (Agisoft社製) を用いた。開放水面と水生植物群落について、作成したオルソ画像から判読した例を図(2)-3に示した。本研究では、宮島沼の境界は水生植物群落もしくは開放水面が水生植物以外の植物群落と接した境界とし、宮島沼の面積は水生植物群落と開放水面の面積の合計値とした。なお、水生植物群落はヨシ群落とマコモ群落の合わせた植物群落と定義した。オオハンゴンソウやオオアワダチソウの特徴である黄色の花 (図では白色) を判読の基準とした図(2)-3。なお、撮影時には黄色の花が開花している他の種は生育していない。また、オオハンゴンソウとオオアワダチソウの区分は撮影した画像の解像度 (約1.2cm/pixel) では困難であったため2種をまとめたデータを作成し、面積を集計した。各種データの作成にはArcGIS (ESRI社製) を用いた。宮城県伊豆沼では、ハスやヒシの分布について、撮影方法を検討し、全域の撮影を実施した。その結果、ハスやヒシといった湖沼内における植生の分布データを作成することができました。UAVによる画像の撮影はM. Zuiko 25mm f1.8 (オリンパス社製) のカメラを搭載したInspire 1 pro (DJI社製) を用いて、2018年7月と11月に実施した。



図(2)- 3 UAVより得られた画像の判読例 (左：開放水面・水生植物, 右：外来植物)

(4) ドローンを用いた効率的なモニタリングシステムの運用・評価

今回開発したモニタリングシステムの実用可能性について、利用可能性、ユーザビリティ、機器の汎用性から評価し、水鳥・湿地生態系のモニタリングにおける効率的な運用体制を検討した。

4. 結果及び考察

(1) ドローンを用いた効率的なモニタリングシステムの検討

① センサの検討

センサの検討を行うにあたり8枚翼のドローンを開発し、高感度カメラ（ソニーα7S II）およびサーモグラフィ（FLIR Vue R）を搭載し、テストを実施した。次図は開発したドローンである。



図(2)- 4 本研究で開発した8枚翼のドローン

プロジェクト期間中は主にこのドローンとその他より汎用性の高い市販ドローンを使って画像を取得した。表(2)-1は宮島沼および伊豆沼・内沼にて撮影を行った日のリストである。初期のころはより広域の撮影を行うためにドローンを移動させながらの撮影を試みたため、1/30秒程度の露出時間での撮影を行っていた。そのため画像の明度が十分ではなく、日の出前や日の入り後の低照度時の撮影の多くは失敗に終わった。

初めて撮影に成功したのは、13回目の2017年9月22日 金曜日早朝である。この日はα7S IIの露出時間を思い切って長くし、1/2程度の露出時間での撮影を行った。図(2)-5は、日の出前の4:55に撮影した画像の拡大図である。このように露出時間を長くすることにより低照度時のマガンの撮影が成功し、カウントを行う可能性が見えた。その後露出の調整をする方法を改善し、ほぼ確実に撮影することが可能となった。

さらに、このような長い露出時間で撮影を行うことにより、市販のInspire2 に搭載するX5S(撮影素子はマイクロフォーサーズ)のようなカメラでも撮影が可能であることを見出した。可視カメラの撮影条件の詳細については③に述べる。

RTK-GPS等の高精度なGNSSの利用についても検討を行い、実際に開発機に搭載してデータも取得した。通常のGPSとのズレは約1m程度であり、水鳥モニタリングのためには必須ではないが、今後精度向上が必要な場合に利用ができることが分かった。高精度姿勢推定についても開発機へのカメラの搭載により可能であることが分かった。

表(2)-1 宮島沼および伊豆沼・内沼での撮影実施リスト（このリストと別に2017年11月、2018年2月/11月、2019年2月にも伊豆沼・内沼にて撮影を実施している。）

		場所	UAV	備考
1	20150928	宮島沼		プロジェクト開始前
2	20160418	宮島沼		
3	20161012	宮島沼		
4	20161017	宮島沼		地上から観測
5	20170216	伊豆沼・内沼		
6	20170217	早朝 伊豆沼・内沼		
7	20170218	早朝 伊豆沼・内沼		
8	20170413	宮島沼		
9	20170414	早朝 宮島沼		
10	20170906	宮島沼		飛行コース確認用、昼間撮影
11	20170920	宮島沼		
12	20170921	宮島沼		
13	20170922	早朝 宮島沼		
14	20170922	宮島沼		
15	20170927	宮島沼		
16	20171002	宮島沼		
17	20171010	宮島沼		
18	20171019	宮島沼		
19	2018/3/29	宮島沼		
20	2018/4/4	宮島沼		
21	2018/4/13	宮島沼		
22	2018/4/17	宮島沼		
23	2018/4/24	宮島沼		
24	2018/4/26	宮島沼		
25	2018/4/27	宮島沼		
26	2018/5/1	宮島沼		
27	20180913	宮島沼		
28	20180925	宮島沼		
29	20180928	宮島沼		
30	20181003	宮島沼		
31	20181004	宮島沼		
32	20181016	宮島沼		
33	20181018	宮島沼		

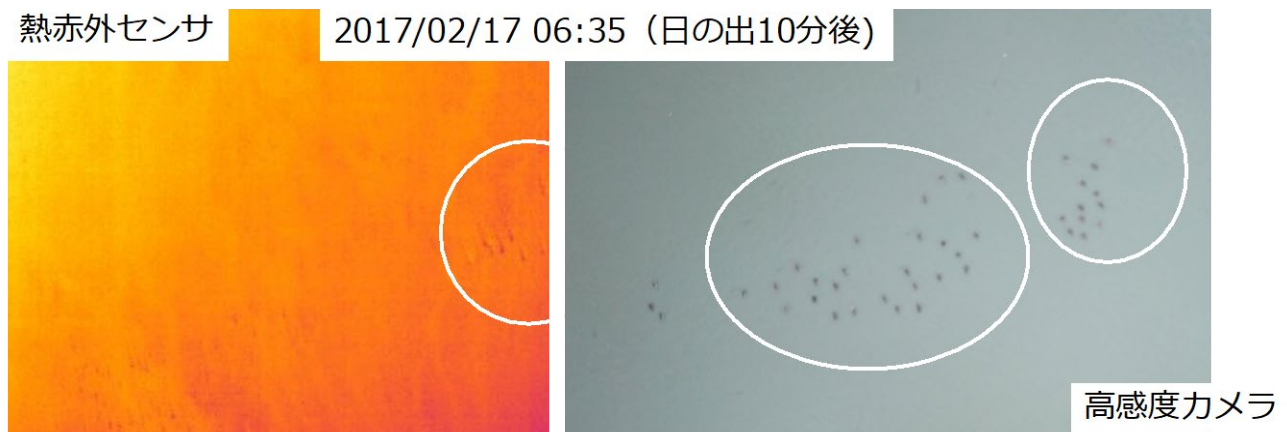


図(2)- 5 2017年9月22日 金曜日 4:55に撮影した画像のうちの1枚の拡大図。マガンを捉えることができる。

一方でサーモグラフィー（熱赤外センサ）による撮影も繰り返し実施したが、図(2)- 6に示されるように、可視カメラ（高感度カメラ）では捉えることができたマガンを熱赤外センサでは捉えることができなかった。これはマガンの体表面温度と水面表面温度に大きな差異が無いためと考えられる。またマルチスペクトルカメラ（近赤外カメラ）については、地上解像度が可視カメラの4倍程度に粗くなることから個体数カウントには向かず、周辺植生のマッピング等に適していることが分かった。

また降雨時の対応については市販品ドローンにて検討を行った。DJI社のInspire2で撮影中に降雨に見舞われることがあったが、特に問題なく無事に帰還することができた。またDJI社のMatris200シリーズは防水性を保持しているため多少の降雨があっても撮影を継続することが可能である。

法規面について、日没後や日の出前の夜間の飛行の申請にあたっては、国土交通省に事前に申請を行い、許可を得る必要がある。許可の有効期間は最長で1年間であるが、本研究において、宮島沼では年間を通じて、伊豆沼・内沼では、撮影の都度、申請を行い、許可を得たうえで実施した。また、沼を管理する関係機関には事前に連絡のうえで飛行を実施した。



図(2)- 6 熱赤外センサを用いた画像の取得例

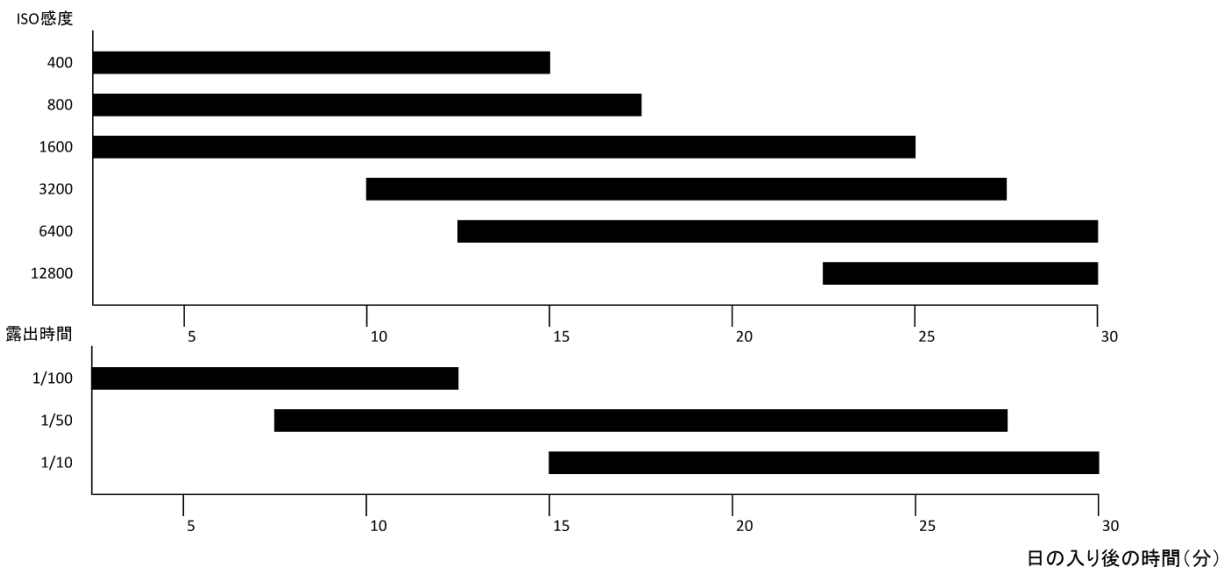
② 解像度の検討

大きさの異なるガンカモ類のデコイや剥製について、異なる高度でドローンから撮影し、目視で検知、識別できる画像の解像度を把握した。その結果、比較的大型の水鳥(マガン)では、検知に約1.7 cm/pixel、識別に約0.9 cm/pixelの解像度が必要であると推定された。中型のカモ類(マガモ・コガモ)では、検知に約0.9 - 1.2 cm/pixel、識別に約0.7 - 0.8 cm/pixelの解像度、小型のカモ類(カイツブリ幼鳥)では、検知に約0.7 cm/pixel、識別に約0.5 cm/pixelの解像度が必要であると推定された。なお、この値は目視による判別の有無から推定した値であり、鳥の模様など身体的な特徴や撮影条件(背景や天気など)により検知・識別に必要な解像度は多少変わることやデコイは実際より多少大きめに作成されていること、測定している体サイズは体長でないことを考慮した上で参照とすることが望ましい。

③ 薄暗い環境下における撮影方法の検討

マガンは日の出前後にねぐら立ちし、日の入り前後にねぐら入りする。今回北海道宮島沼のねぐら入りの動態を調査した結果、総ねぐら入り数の95%の個体がねぐら入りを完了する時間帯は日の入りから平均15分後(6分~23分)であった。ドローンでの撮影を約10分から15分と想定すると、日の入り後15分から30分の時間帯にマガンを判別できる画像を撮影できることがカメラ設定の条件であると考えられた。

ISO感度、露出時間についてマガンを判別できる画像を取得できた撮影時間を図(2)-7に示した。日の入り後15分から30分の時間帯に安定した画像が取得できるカメラ設定はISO感度6400、露出時間1/10が目安であることが明らかになった。



図(2)-7 ISO感度・露出時間別の撮影可能時間(線の範囲が撮影可能時間)

(2) 水鳥のモニタリングシステムの開発・検証

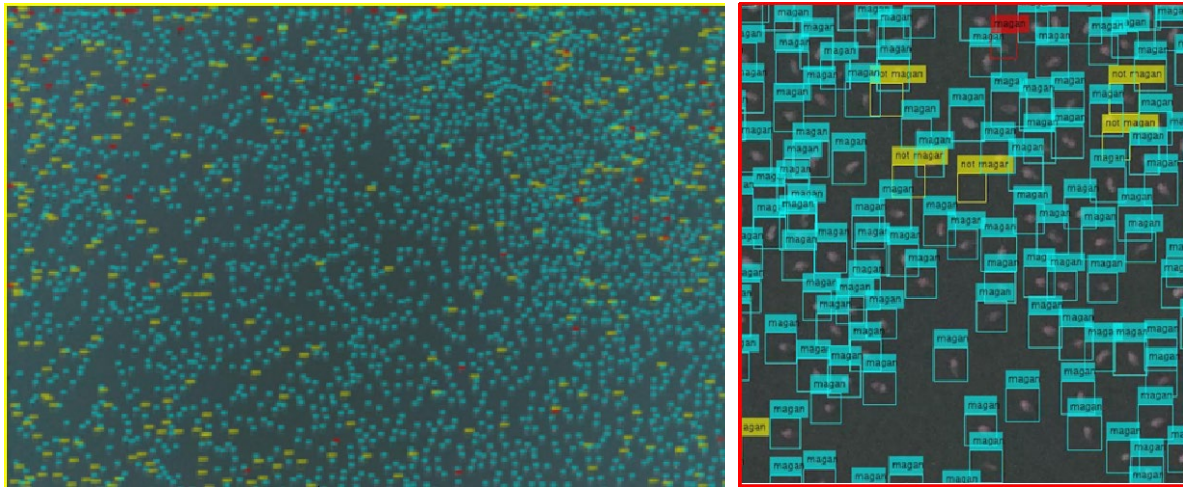
① マガンのカウント

多数のマガンをUAV画像からカウントするためには、人手による作業では多大な時間を要するので計算機による自動カウントが必要と考えた。本研究では、物体検出によく使われるカスケード分類手法(Dollar et al., 2012)を利用し、自動カウントを試みた。

なお、物体検出の方法として、例えばより単純な適応的閾値処理(2値化)を利用することも考えられるが、事前のテストでは個別の画像ではうまく処理ができて、複数の画像に渡ってうまくマガンと背景を分離できるパラメータを決定することが困難であった。その原因は対象となるUAV画像が前述のように低照度の時間帯に撮影されていることからノイズが大きいことと太陽の照射方向とその逆の方向で背景となる水面や波の明るさが異なることと考えられる。そのため適応的閾値処理(2値化)により様々な撮影条件で安定した性能を発揮させるのは困難と考えられる。

そこで本研究では、品質が良くかつ十分な数の画像を学習させれば安定して物体を検出できる可能性のある機械学習によるアプローチを採用した。

その結果を図(2)-8に示す。



図(2)-8 マガン自動検出の結果例。左は画像全体であり、右は拡大図。枠の色は、水色が正解、黄色は誤検出、赤は検出漏れを示す。

表(2)-2は、2種類の検出器を作成するために使用した学習画像データおよびその評価結果である。表(2)-3は、前表で作成した検出器1, 2を用いた検証結果。LBPを用いた検出器1は検出器2と比較して安定して良好な結果が得られることが分かった。

表(2)-2 2種類の検出器を作成するために使用した学習画像データおよびその評価結果

検出器	Data	False AlarmRate	True PositiveRate	Feature Type	学習に使用した羽数	TruePositive 検出成功	FalsePositive 誤検出	FalseNegative 検出漏れ	Manual count	Machine learning count	F	誤差
1	2017/10/19 2018/04/24 2018/04/27	0.4	0.83	LBP	45,002	13,892	514	651	14,543	14,406	0.960	1.0%
2	2017/10/19 2018/04/24 2018/04/27 2018/10/16 2018/10/18	0.3	0.93	Haar	56,628	21,325	694	1,874	23,199	22,019	0.943	5.4%

表(2)- 3 前表で作成した検出器 1, 2 を用いた検証結果。

検出器	feature Type 特徴	Data	falseAlarmRate	truePositiveRate	Type	TruePositive 検出成功	FalsePositive 誤検出	FalseNegative 検出漏れ	Manual count	Machine learning count	F	誤差
1	LBP	2018/4/26	0.4	0.93	検証	46,930	1,773	1,850	48,780	48,703	0.963	0.2%
1	LBP	2018/10/3	0.4	0.93	検証	22,201	1,613	2,700	24,901	23,814	0.911	4.6%
1	LBP	2018/10/4	0.4	0.93	検証	15,244	1,302	2,405	17,649	16,546	0.892	6.7%
2	Haar	2018/4/26	0.3	0.93	検証	45,947	409	2,833	48,780	46,356	0.966	5.2%
2	Haar	2018/10/3	0.4	0.93	検証	20,626	720	4,275	24,901	21,346	0.892	16.7%
2	Haar	2018/10/4	0.3	0.93	検証	14,113	331	3,536	17,649	14,444	0.880	22.2%

なお、カスケード分類による自動検出に加え、いわゆるAI、Deep Learningによる自動物体検出を応用したマガンの自動検出についても開発を行った。アルゴリズムとしてDetNetを使用した。精度検証については、まだ十分に行えていないが、カスケード分類と同等かそれ以上の精度を達成することができた。また、DetNetによる自動検出は処理時間も早く、約2千万画素の画像に対し、10秒程度で処理が可能である。例えば、宮島沼は40枚弱で全域の撮影が可能であるので、撮影画像取り込み後、処理完了までの時間はわずか7分程度である。



図(2)- 9 DetNetによるマガン自動検出結果

一方、これらのセンサを用いた飛行計画についても検討した。図(2)- 10の左は宮島沼での撮影を行う際の飛行ルートである。概ね500 m 四方の宮島沼であれば1機のドローンにより10分程度の飛行で全領域を撮影することが可能である。

伊豆沼・内沼は面積が広く1機のドローンでは全域を撮影することはできない。そこで2019年2月には2機を同時に飛行させ分担してモニタリングする実験を行った(図(2)- 10の右)。東西方向で分担することによりそれぞれ10数分の飛行により約50 haをマッピングし、内沼の全域を撮影することができた。カウントの精度について宮島沼での実験値は前述のとおりであるが、伊豆沼・内沼ではハスの茎が画

像に明るく写ることによる誤検出がカスケード分類には多く見られた。地域別に教師データを多く作成するなどの方策が必要となる。



図(2)- 10 左は宮島沼で撮影を行う場合の飛行ルート（赤線）で、右は内沼を2機で分担して撮影する際の撮影範囲分担（2019年2月実施）。

② 水鳥類のインベントリー

カメラの撮影方法について検討した結果、カメラは直下から30度（-60度）に設定し撮影した場合に最も判別に適切であると考えられる画像を取得することができた（図(2)- 11）。



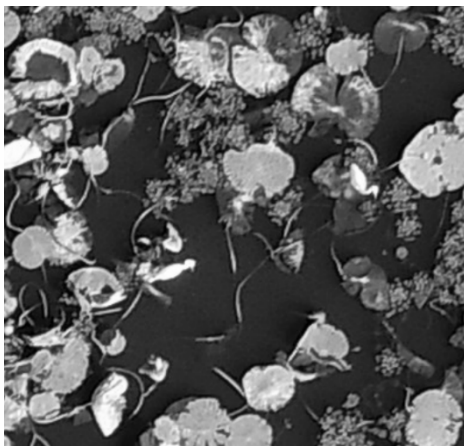
図(2)- 11 -60度でUAVから撮影した画像の例

図鑑により得られた画像から、種の判別プログラムを検討した結果、宮城県、北海道に生息する種全体を対象とした場合は、分類精度は約30%と低い結果となった。そのため、地域、季節別に種をグループ化し、それぞれのグループで判別プログラムを作成した結果、平均約70%と判別精度を向上することができた。精度が非常に高くない理由としては、UAVにより撮影した画像（解像度約1cm/pixel）を想定しているため画像の粗いことが精度に影響していると思われた。また、使用したプログラムによる違いはほぼ認められなかった。さらに、UAVにより得られた画像について開発した判別プログラムを適用した結果、UAVにより得られた画像全体では約20%の精度となった。この精度の低さはUAVでは様々な方向から種を撮影するため、判別に必要な模様が含まれない画像が多くあることに理由であると考えられる。そこで模様が取得できた画像のみを対象として判別プログラムを適用した結果、約60%の画像を判別することができた。地域や季節別に判別プログラムを作成し、解像度が高い画像を利用することにより、精度は向上することが示唆されたが、高性能のUAVやPC環境を必要とし、プログラムの調整にも多くの労力が必要であることも明らかになった。

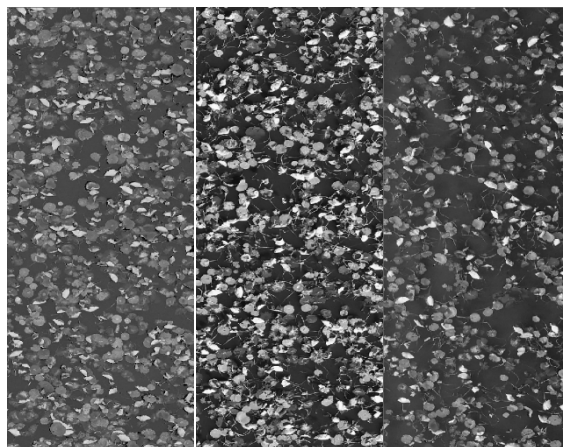
③ 特定種の調査

チュウサギについて、まず取得した画像から目視によるチュウサギの判別の可否を検討した結果、判別が可能であることが明らかになり（図(2)- 12）、UAVにより得られた画像からチュウサギは把握することが可能であると考えられた。次にサンプリングの効率性について検討した。伊豆沼全域を撮影することは、チュウサギを判別するために比較的低い高度（45m）で撮影する必要があることにより、非常に

時間がかかり現実的なサンプリングデザインではない。今回はラインセンサスによる体系的なサンプリングデザインを用いて、4回の調査で計172羽（8日：69羽，12日：45羽，16日：29羽，23日：29羽）のチュウサギを確認することができた。確認された個体数は生息地利用の分析が実施可能なサンプル数であり，体系的なサンプリングデザインを実行することで，効率的なチュウサギのモニタリングを実施することが可能であると考えられた。最後にハスやヒシなどの植生の判別可能性について検討した。UAVにより撮影した複数の画像からオルソ画像を作成し，目視で植生の判別可能性を検討した。目視では，ハスやヒシなど種の区分だけでなく，ハスの生育状況（枯葉・浮葉・枯死）やその変化を捉えることが可能であった（図(2)-13）。これよりUAVによるモニタリングではこれまで捉えられていなかった植生の生育状況やその動態に関する情報を得ることができると考えられた。



図(2)-12 判別できたチュウサギの画像例



図(2)-13 ハスの変化例（左から刈り取り後，8日・16日・23日）

ハクチョウ類について北海道宮島沼で撮影した結果，オオハクチョウ，コハクチョウ共に大型であり，特徴的な白色をしているため，150mからの撮影でも十分に個体を把握できることが明らかになった。一方，上空からのではくちばしの模様などからオオハクチョウ，コハクチョウの分類ができないため，画像分析から得られた体長などから種を分類する手法を開発するという課題が残された。

(3) 植生など湿地生態系のモニタリングシステムの開発・検証

UAVにより撮影した画像から作成した宮島沼の開放水面，水生植物群落の面積は，開放水面は23.8ha，水生植物群落は2.15haであった。本研究で定義した宮島沼の境界全体の面積は開放水面と水生植物群落を合計した25.3haとなり，宮島沼全体の約8.3%が水生植物群落となっていることが明らかになった。美唄市によると，宮島沼の開放水面の面積は1947年に33.6ha，2007年には25.1haと報告されている（美唄

市 <http://www.city.bibai.hokkaido.jp/jyumin/docs/2016080200023/files/miyajimanuma.pdf>)。本研究を実施した2017年の画像から判読した開放水面の面積は23.8haであり、2007年からの10年間で約5%、1947年からの70年間で約29%の開放水面が縮小していることが明らかになった。過去の報告では水生植物群落の面積が明らかになっていないため正確な解釈は困難であるが、開放水面の面積変化の結果のみからは、近年宮島沼の開放水面の縮小速度が速くなっていることが示唆された。

UAVにより撮影した画像から作成した宮島沼の合計面積は約1.2haであった。また、宮島沼周辺に広く分布し、特に宮島沼の北側の草原に多く生育していることが明らかになった。オオハンゴンソウは地上部のみの刈り取りだけでは再生し、機器などによる抜き取りを複数年続けることが根絶には有効であるとされている。しかし、抜き取りは非常にコストがかかるため、効率的な対策を実施する必要がある。本研究で作成したデータはオオアワダチソウも含まれているが、宮島沼の北側において多く生育していることが明らかになった。そのため、宮島沼におけるオオハンゴンソウなどの外来種対策は北側の草原を中心に実施することがまず重要であると考えられた。

また伊豆沼で2018年7月と11月に撮影した結果から、ハスやヒシといった湖沼内における植生の分布データを作成した(図(2)-14)。UAVによる複数時期のデータを作成したことにより、これまで明らかになっていない時系列データやサブテーマ1でのハス刈り取りの効果に関するデータを取得、蓄積することができた。



図(2)-14 伊豆沼で撮影したハスの分布状況(左:2018年7月,右:2018年11月)

以上のように、UAVを用いて宮島沼、伊豆沼の湿地生態系について現状把握を行った。UAVとSfm技術を用いた調査は比較的成本・労力をかけずに実施することが可能である。今後既存のモニタリング手法だけでなく、UAVを用いたモニタリングを実施することで、湿地生態系に関する正確で最新のデータを収集することができ、より効果的・効率的な保全対策の実施が可能となると考えられた。

(4) ドローンを用いた効率的なモニタリングシステムの運用・評価

今回開発したモニタリングシステムの実用可能性について、利用可能性、ユーザビリティ、機器の汎用性から検討した(表(2)-4)。

表(2)-4 開発したモニタリングシステムの実用可能性の検討
(◎:高 ○:中 △:低 ×:無)

モニタリング	実用可能性	利用可能性	ユーザビリティ	機器の汎用性
マガンのカウント	◎	◎	◎	○
水鳥のインベントリー	△	○	×	△
特性種の調査	○	◎	○	◎

マガンのカウントに関しては、撮影方法の確立やカウントプログラムの自動化手法が確立され、サブテーマ(4)にあるようにマニュアルも作成したため、利用可能性、ユーザビリティは共に高いと考えられた。調査地が大面積である場合への対応には課題が残るが、ドローンやPCなども機器の一般的な機器で対応できるため汎用性も比較的高く、実用可能性は高いと考えられた。水鳥のインベントリに関しては、分類手法について利用可能であると判断されたが、手法には様々な調整が必要であり特別な知識・経験がユーザーに求められるため、利用可能性はあるが、ユーザビリティはとて低いと考えられた。さらにドローンやPCについても高機能の機器を用いる必要があるため、現時点では特定のユーザーのみ利用できる状況であり、実用可能性は低いと考えられた。特定の種に関する調査では労力や分析技術が必要である場合もあるが、一般的な機器でも対応可能であると考えられ、これまで得られていなかったデータや知見が今回開発したドローンによるモニタリングシステムで新たに得られることが明らかになった。湿地生態系のモニタリングについては、多少労力や分析技術が必要であるが、機器の汎用性が高く、実用可能性も高いと考えられ、現時点でデータも着実に蓄積できることが明らかになった。

以上より、開発したドローンを用いたモニタリングシステムによりマガンや生息環境については既存の調査などを効率化、省力化することは可能で、さらに新たな知見を得られる可能性も高いことが明らかになった。一方インベントリに関しては機器などが一般のユーザーが使える実用レベルには達していないと考えられた。特にマガンや湿地生態系のモニタリングについては、本研究の成果を活用し、現地の専門家と主に民間企業によるドローン調査の共同体制を構築することにより、調査の省力化・効率化・継続性の確保が可能になると考えられた。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまでに日の出前や日没後の低照度の時間帯にドローンからの撮影画像を用いて個体数をカウントする研究は殆どなかった。本研究で提案する方法によりマガンを対象とし、個体数カウントが可能であることを示した。

また、ハクチョウやチュウサギなど特定の種のサンプリング調査、植生など湿地生態系のモニタリングについては、開放水面面積の把握、外来種のマッピング、等、環境保全対策の実施に有効な調査方法についても確立することができた。

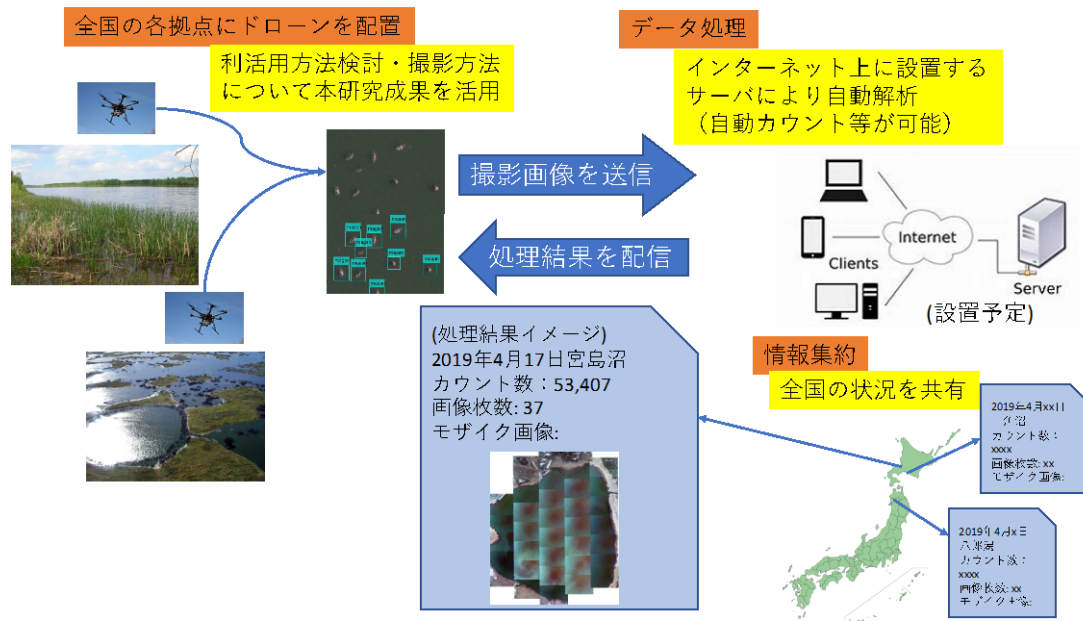
(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

湿地生態系の保全対策に必須であるモニタリングにおいて、本研究で開発した各種の手法が活用し、ドローンが有効である局面を示すことができた。今後の実際の活用にあたっては現場へのドローンの配備を行い、現場で定期的な撮影を実施したうえで、本研究の成果を活かすことが可能と考えている。さらに、Web上にサーバを設置し、現場からは画像を送信するだけで、水鳥カウントが可能となるサービスなどを実現することによりさらに活用局面が広がり、全国の状況をリアルタイムで共有することが期待できる。また、水鳥モニタリングについては、アジア地域のネットワークを通じて国外への展開も期待できる。環境政策への貢献イメージを図(2)-15に示す。



図(2)- 15 本サブテーマの環境政策への貢献のイメージ

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。(ただし投稿中・査読中の論文1本あり)

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 鈴木透, 牛山克己: 酪農学園大学紀要. 自然科学編, 43(1), 13-19 (2018) UAVを用いた湿地生態系のモニタリング.
- 2) Kenta OGAWA, Yutaka KAIZU, Hiroyuki YAMADA, Toru SUZUKI, Tetsuo SHIMADA, Katsumi USHIYAMA, Kazuo KOYAMA: Proceedings of International Symposium on Remote Sensing 2017, P-144, 903-906 (2017), Initial Trials to Semi-Automated Counting Wild Birds on Water Surface Using UAV.
- 3) 小川健太, 松田亜希子, 鈴木透, 丸山樹, 三品未和, 藤若燈, (2017) 「UAV画像による水鳥の自動検出の試み」, 日本リモートセンシング学会学術講演会論文集, 第63回(平成29年度秋季), P. 7-8, 2017
- 4) 鈴木透, 長倉有理: 酪農学園大学紀要 42(1) (2017) 水鳥のモニタリングにおけるUAVの利用可能性の検討

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 小練文弥, 小川健太, 牛山克己, 日本写真測量学会北海道支部第37回学術講演会(2019) 機械学習を用いたUAV画像からのマガン係数精度の向上
- 2) 鈴木透, 牛山克己, 山田浩之, 第65回日本生態学会(2018) UAVによるマガンのカウントに適した撮影時間の検討
- 3) 松田亜希子, 鈴木透, 小川健太, 第65回日本生態学会(2018) 薄暗い条件でのドローン撮影: マガン検知に必要な露出時間とISO感度は?

- 4) 小川健太, 鈴木透, 小練史弥, 第13回 伊豆沼・内沼研究集会 (2018) ドローンを用いた空中からの生物相モニタリング
- 5) 鈴木透, 高橋佑亮, 嶋田哲郎, 第13回 伊豆沼・内沼研究集会 (2018) ドローンを用いたチュウサギの生息地利用に関するモニタリング手法の開発
- 6) 小川健太, 第55回酪農公開講座 (2018) スマート酪農の展開～ドローンや衛星画像技術の農地管理へ利活用について
- 7) Kenta Ogawa, 2018 International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Environment (2018) "Semi-automated counting wild birds on water surface using UAV: An application of machine learning".
- 8) Kenta OGAWA, Yutaka KAIZU, Hiroyuki YAMADA, Toru SUZUKI, Tetsuo SHIMADA, Katsumi USHIYAMA, Kazuo KOYAMA, ISRS2017 (2017) INITIAL TRIALS TO SEMI-AUTOMATED COUNTING WILD BIRDS ON WATER SURFACE USING UAV.
- 9) 鈴木 透・小川健太：第11回伊豆沼・内沼研究集会 (2017) 「ドローンを用いた空中からの生物相モニタリング」
- 10) 小川健太, 鈴木透, 松田亜希子, 日本鳥学会2017年度大会 (2017) ドローンを用いた空中からの生物相モニタリング
- 11) 鈴木透, 松田亜希子, 小川健太, ELR2017 (2017) 水鳥モニタリングにおけるドローンの利用可能性
- 12) 小川 健太, 松田 亜希子, 鈴木 透, 丸山 樹, 三品 未和, 藤若 燈, 日本リモートセンシング学会第63回 (平成29年度秋季) 学術講演会 (2017) UAV画像による水鳥の自動検出の試み
- 13) 鈴木透：日本鳥学会2016年度大会 (2016・札幌) モニタリングにおけるドローン技術の利用可能性

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 小川健太, 宮島沼カントリーフェス2018 (2018), 「宮島沼ドローン画像によるマガン自動カウント」についてブースにて紹介
- 2) 山田浩之・海津 裕・遊佐 健・鈴木 透・高橋佑亮・横山 諒, ELR2017 (日本緑化工学会・日本景観生態学会・応用生態工学会主催, 2017年9月22日, 愛知県名古屋市名古屋大学, 50名参加) にて研究集会「ロボット・UAV・ネットワークカメラを用いた湿地生態系の監視と管理」を実施
- 3) 嶋田哲郎・海津 裕・遊佐 健・松田亜希子・山田浩之, 日本鳥学会2017年度大会 (2017年9月16日, 茨城県つくば市筑波大学, 40名参加) にて自由集会「ロボットやネットワークカメラ, ドローンを活用した湿地生態系の監視・管理システムの構築」を実施
- 4) 海津 裕・小川健太・山田浩之・嶋田哲郎, 平成29年度伊豆沼・内沼自然再生協議会及びラムサールトライアングル関係者現地視察 (宮城県主催, 2017年8月29日, 宮城県栗原市内沼及びサンクチュアリセンターつきだて館, 60名参加) にて公開デモンストレーションを実施
- 5) 第11回伊豆沼・内沼研究集会「環境研究総合推進費 推進課題 1-1602フィールド調査とロボット・センサ・通信技術をシームレスに連結する水域生態系モニタリングシステムの開発特集」(主催：(公財)宮城県伊豆沼・内沼環境保全財団, 2017年2月18日, 宮城県伊豆沼・内沼サンクチュアリセンター, 観客54名) にて成果紹介

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 毎日新聞 (2019年2月22日, 地方版, 「生態調査保全・調査に新技術」)

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) ZEMING LI, CHAO PENG, GANG YU, XIANGYU ZHANG, YANGDONG DENG, JIAN SUN. DETNET: A BACKBONE NETWORK FOR OBJECT DETECTION. [HTTPS://ARXIV.ORG/ABS/1804.06215](https://arxiv.org/abs/1804.06215).
- 2) DOLLAR P., WOJEK C., SCHIELE B., PERONA P. : PEDESTRIAN DETECTION: AN EVALUATION OF THE STATE OF THE ART, IEEE TRANS PATTERN ANAL MACH INTELL, 34(4), PP. 743-761, 2012.
- 3) SHAN C., GONG S., MCOWAN P. W. : FACIAL EXPRESSION RECOGNITION BASED ON LOCAL BINARY PATTERNS: A COMPREHENSIVE STUDY, IMAGE AND VISION COMPUTING, 27(6), PP. 803-816, 2009.

II-3 センサネットワークによる地上・水面からの生物相モニタリング

北海道大学大学院農学研究院

山田浩之

平成28～30年度累計予算額：22,925千円

(うち平成28年度：7,100千円，平成29年度：8,115千円，平成30年度：7,710千円)

累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

ラムサール条約湿地を含め全国に点在する湖沼は、貴重な野生生物の生息場として機能しており、生物多様性の重要なスポットでもある。一方で、さまざまな人間活動の影響により、多くの湿地の生態系は消滅するか、消滅を免れても劣化が進行している。そうした湿地の保全・再生のためには、広域的・長期的な視点で監視し、その結果を順応的管理に迅速に反映させることが望ましい。しかし、生態系の監視には時間と労力といった莫大なコストがかかることから、十分な情報が蓄積されないままに放置されている場合が多い。加えて、我が国は、人口減少時代に突入しており、労働力不足によってそれに拍車がかかることも懸念される。そうした問題を補うものとして、定点カメラの利活用に期待が寄せられており、最近では鳥獣被害対策や希少生物保護の分野での普及が進んでいる。しかし、人がアクセスし難く過湿な湿地の環境での運用や湿地に生息する生物に適した監視システムはない。これに対応するために、我々は、現地での給電が可能な耐久性の高いネットワークカメラの開発を行った。さらに、画像処理による個体数計測を組み合わせることでマガン (*Anser albifrons*)・トンボ類・魚類を対象とした自動監視システムの構築を行った。伊豆沼・内沼(宮城県)、宮島沼(北海道)、出水(鹿児島県)、鹿島台(宮城県)で試験運用を行い、その過程で発生した問題を解決してシステムの完成度を高めた。その結果、マガン用システムは冠水や氷点下の気温の環境下での約5カ月間の運用、トンボ類用は夏季の高湿過湿環境下での6カ月間の運用に成功し、両システムで100万枚以上の画像を取得できた。画像処理を用いたマガン計数は、ポイントセンサスによって得られた計数に近い値を得ることが可能となった。トンボ類では画像処理のほかディープラーニングを用いた検出を試行し、画像上に小さく写るトンボの検出と計数に成功した。魚類については、スマートフォンを用いた監視システムを構築した。撮影が中断するトラブルが発生したが、使用機器の再選定により解決することができた。これにより水中の様子を遠隔地でリアルタイムに監視することが可能となった。さらに、画像処理を用いた魚類検出と計数では、画像処理アルゴリズムの改良に加えて、機器側の撮影間隔を変更できるプログラムを開発したことにより検出と計数精度が向上した。

[キーワード]

デジタルカメラ、遠隔操作、画像処理、魚類、個体群、マガン、トンボ

1. はじめに

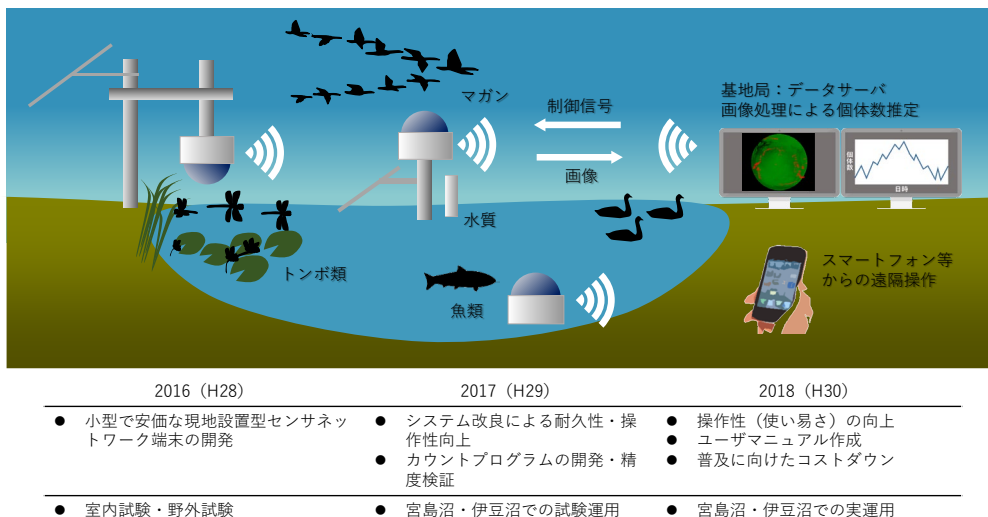
ラムサール条約湿地を含め全国に点在する湖沼は、貴重な野生生物の生息場として機能しており、生物多様性の重要なスポットでもある。一方で、さまざまな人間活動の影響により、多くの湿地の生態系は消滅するか、消滅を免れても劣化が進行している。そうした湿地の保全・再生のためには、広域的・長期的な視点で監視し、その結果を順応的管理に迅速に反映させることが望ましい。しかし、生態系の監視には時間と労力といった莫大なコストがかかることから、十分な情報が蓄積されないままに放置されている場合が多い。加えて、我が国は、人口減少時代に突入しており、労働力不足によってそれに拍車がかかることも懸念される。そうした問題を補うものとして、定点カメラの利活用に期待が寄せられており、最近では鳥獣被害対策や希少生物保護の分野での普及が進んでいる。しかし、人がアクセスし難く過湿な湿地の環境で、遠隔での映像の取得から個体群の定量化までを統合した湿地に生息する生物の監視システムはない。今後の継続的な環境保全や再生のためにもそれらに関する技術開発と普及に向

けた取り組みが急務である。

2. 研究開発目的

湿地の代表的な生物である水鳥、昆虫類、水生生物を対象として、無線で操作可能なネットワーク型の高解像度カメラと画像処理による自動個体数計測を組み合わせたモニタリングシステムの開発を行うことを目的とした。その際、最新のセンサおよび通信モジュールを用い、小型で低コスト、なおかつ、耐久性、ユーザビリティの高いシステムの開発を目指した（図(3)-1）。

地上や水面の複数地点に設置した全周魚眼カメラで、天空や水面、水中の映像や生息場の環境情報を取得し、無線通信で基地局のサーバにデータを送信する端末、各端末で得られた映像から水鳥や希少種のトンボ類、魚類の自動検出と計数を行うシステムの開発を目的とした。2016年度は、端末の開発と室内試験に集中し、年度後期には宮島沼で野外試験を実施した。2017年度は、サブテーマ（4）と共同で、試験運用を行い、現地でのトラブルシューティングを繰り返して、耐久性・操作性に優れたシステムを完成させることを目指した。また、サブテーマ（2）、（4）と共同で実施した現地試験結果との比較により、自動検出・計数プログラムの精度検証を行うこととした。2018年度には、宮島沼と伊豆沼で本格的な運用を開始し、宮島沼と伊豆沼以外での普及も目指した。



図(3)-1 モニタリングシステムの概要と年次計画

3. 研究開発方法

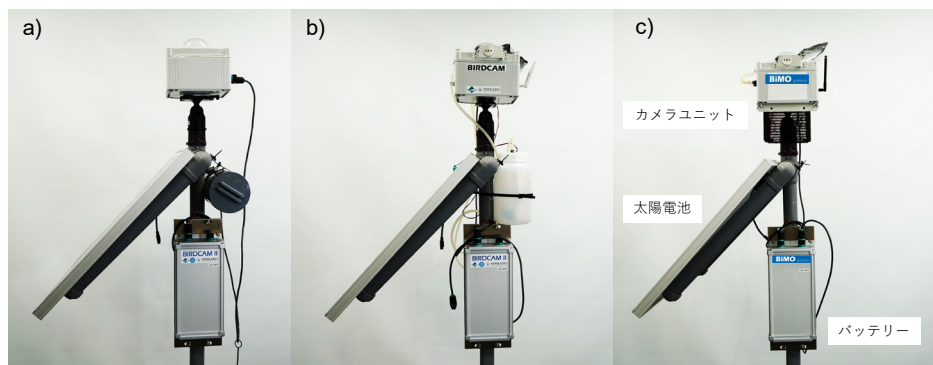
水鳥では主にマガンを、昆虫類では主に水辺を利用するトンボ類を、水生生物では主に魚類を対象とした遠隔モニタリングから画像処理による自動計数までを実行できる全天候型監視システムを開発した。

（1）マガンモニタリング

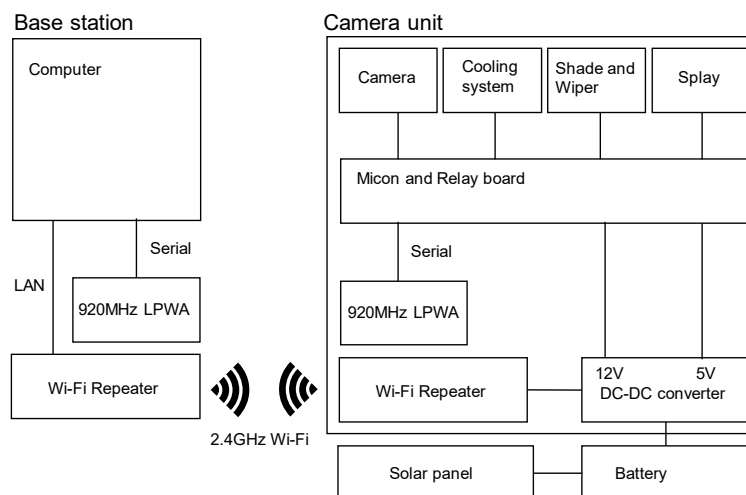
① システムの概要

飛行する水鳥モニタリング用に開発した監視カメラシステム（BiMO-WF: Biota Monitoring System for Waterfowl）は、基地局と観測地点に設置するカメラユニットからなり、基地局から見通し約2 km離れた地点のカメラユニットの撮影実行や基地局への画像転送、ワイパー作動を、無線信号を介して自動制御するものである。基地局PCでは、転送された画像上のマガン個体数を画像処理で計測し、その個体数の経時変化と総個体数を自動的に出力するようにしている。基地局PCをインターネットに接続し、ゲートウェイとして機能させることで、インターネット環境下にある基地局以外のPCやスマートフォンから操作すること、基地局PCに保存された画像や計数結果をオンラインストレージに自動でアップロードすることも可能である。

達成目標のひとつである機材のコストダウンのために、カメラユニット類の部品には安価な民生品を用いることとした。カメラや通信デバイスの選定にあたっては、現地性能試験を実施した上で、用途に適したものを選定した。開発にあたっては、試作品の性能試験を繰り返して改良することで完成度を高めた(図(3)-2)。最終的に、無線通信機能付きカメラ、Wi-Fiリピータ(Propeller2 Outdoor, HYTEC INTER Co., Ltd.)、特定小電力無線モジュール(IM920, Interplan Co., Ltd.)、水冷冷却器、ワイパー、シェード、洗浄用スプレーを搭載し、制御用マイコン(Arduino UNO R3, Arduino)とリレーシールド(Relay Shield v3.0, Seeed Technology Co.,Ltd.)で統合した機器を製作した(図(3)-3)。ユニット内部のカメラ(GoPro HERO 4 Silver, GoPro, Inc.)は、等距離射影方式の魚眼レンズ(Entaniya Fisheye 220, Entaniya Co.,Ltd.)を装着しており、視野角220°(魚眼レンズ)、最大12 Mpxの静止画の記録が可能である。理論上では、このカメラから約600 m以内のマガンサイズの対象を認識することができる。カメラユニットやバッテリーのケースは防水規格IPX6~7クラスの防水性能を有し、冠水にも耐えるように設計した。カメラユニットの電源には、リチウムイオン電池(Laptop power bank K2, MAXOAK, 185 Wh)と太陽電池モジュール(SY-M50W-12, SUNYOOO solar Limited)を採用した。満充電で約2日間連続稼働できるように設計している。



図(3)-2 マガンモニタリングカメラの改良過程。aからcに向けて通信機器、冷却器、スプレー、シェード、ワイパーが改良されている。



図(3)-3 マガンモニタリングシステムの構成

基地局は、PC(OS: Windows10)、Wi-Fiアクセスポイント(DLB Propeller 2, HYTEC INTER Co., Ltd.)、特定小電力無線モジュール(IM920, Interplan Co., Ltd.)で構成されている。マイコンには、特定小電力

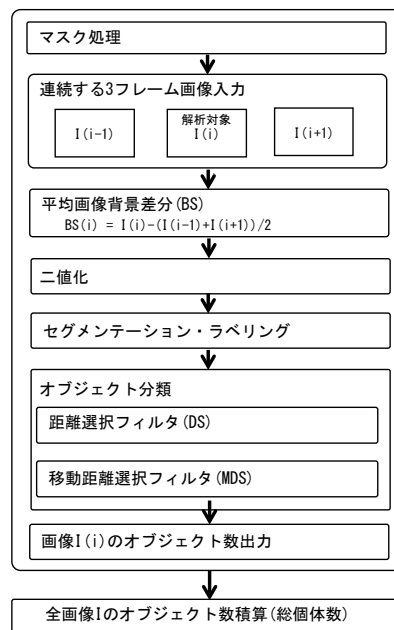
無線を介したシリアル通信の制御信号，カメラには，無線LANを介してhttpリクエストを渡すようにしている。

カメラユニットの自動制御用スクリプトは，Ruby言語を用いて作成した（開発環境: Ruby 2.6.0）。このスクリプトの実行により，撮影開始時刻と撮影期間，撮影の時間間隔の入力を行い，その開始時刻に撮影が実行されるようにしている。また，撮影後には，カメラユニットで記録された画像が基地局PCに自動的に転送されるようにしている。

② 画像処理による個体数の推定

画像処理を用いた飛行鳥類の検出や計数事例は極めて少なく，静止画での二値化 (Poon et al. 2011)，動画の背景差分法とテクスチャ特徴量を用いたオブジェクト分類，トラッキングを組み合わせた方法 (T'Jampens et al. 2017)，機械学習やCNN (Convolutional Neural Networks) による方法 (T'Jampens et al. 2017, Yoshihashi et al. 2017) を用いた事例に限られるが，どの手法も実用化までに至っていない。また，これらの方法は，ここで扱うフレームレートの小さい静止画像群の解析，何百個の小さいオブジェクトが移動する対象の処理には適していない。そこで，ここでは背景差分法による動体検出，セグメンテーションとラベリングを適用したオブジェクト解析による計数を試みることにした。この手法の欠点として，マガンだけでなく動く雲等も動体検出されること，全フレームのオブジェクト総数を積算して求めることにより複数フレームの画像上の同オブジェクトを複数回計数してしまうこと(マルチカウント)，それらによりオブジェクト総数が過大評価されることが挙げられる。

この雲の誤検出やマルチカウント問題を防ぐために，アルゴリズムを組み合わせる次のワークフローを構築した(図(3)-4)。雲の誤計数とマルチカウント対策のために，マガン検出範囲を制限したウィンドウ設定(マスク処理)，背景差分と二値化処理，その後，ラベリング処理を施し，ある領域のマガンオブジェクトを選択する距離選択フィルタ (DS: Distance Selection filter)，フレーム間の移動距離の大きいオブジェクトを選択する移動距離選択フィルタ (MDS: Moving Distance Selection filter) を施した。これらの処理を，計数対象の静止画像群全てに対して自動実行するR言語スクリプトを，画像処理パッケージのEBImageツール (Pau et al., 2010) を導入したMicrosoft R Open 3.5.1 (Microsoft) の開発環境で作成した。



図(3)-4 総個体数を求めるための画像処理ワークフロー

背景差分による動体検出には，RGBのうちマガンの輝度が相対的に大きかったB (青) 輝度を用いた。

マスク処理では、マガンが一度のみ飛行すると仮定したウインドウを設けた。ウインドウは、画像中心からのある半径 (px) と陸域との境界の間の領域として与えた。ウインドウの形状は、湖心に設置した場合は環状、湖岸に設置した場合は湖面の上空で区切った扇形とした。その半径と扇形内角は調整用パラメータとして扱い、画像上における目視でのマガンの移動、従来法計数値との整合性を確認して定めた。

画像の差分法では、検出したいオブジェクト (動体) が写るフレームの前あるいは後フレームの差分を求めるフレーム間差分法がしばしば用いられる。しかし、この方法を天空の撮影に用いた場合、マガン以外の雲なども動体として検出されてしまう問題がある。この問題に対応するには、雲の動きを考慮した背景画像を作成する必要がある。ここでは、連続した3つのフレームにおいて、解析対象の第2フレーム2の背景が、第1と第3フレームの平均値画像で与えられるものと仮定した。その背景を用いた差分後の画像に対して、マガンのみが抽出されるように二値化処理を行った。二値化の閾値は、調整用パラメータとして扱った (EBImageでは0~1の256グレイスケールを正規化した値で指定)。閾値を変化させた二値化後の計数と画像上の目視の計数の比較を行い、その平均平方二乗誤差 (RMSE) を参考に最適な閾値を定めた。

オブジェクトの実寸、カメラとオブジェクト間の距離を与えた場合、その距離におけるオブジェクトの画像上のサイズ (px) を求めることができる。距離選択フィルタ (DS) は、距離に応じたオブジェクトサイズを分類するオブジェクトサイズフィルタである。カメラを中心とする湖岸位置の境界とした球体、マガンが一度のみ写ると仮定したカメラからある距離の球体 (内側領域境界) を設け、それらの球体の間にあると判定されるマガンをオブジェクトサイズで指定した。ここでは、マガンを短軸0.75 m、長軸1.5 mとして、200 mの位置に内側領域境界を設けた。湖岸までの距離は、カメラ設置地点と湖岸までの距離を与えた。ここで、画像上のオブジェクトサイズは、EBImageのcomputeFeaturesツールで得られるオブジェクト面積s.area (px) を用いた。この処理により、その最小値より小さいノイズも除去されることとなる。

移動距離選択フィルタ (MDS) は、マガンの移動速度が雲に比べて顕著に大きい (フレーム間の移動距離が大きい) と仮定して、フレーム間での移動距離が大きいオブジェクトのみを選択する処理である。解析対象の前のフレームの画像上で得られたオブジェクトの中心座標からある範囲を設定し、同様に求めた解析対象画像のオブジェクトの中心点が前フレームのその範囲にない場合は、マガンとして選択している。その範囲は、オブジェクト中心からのマンハッタン距離 (px) で与え、調整用パラメータとして扱った。ここでは、画像上のマガンのフレーム間の移動距離を目視で確認して20 pxに設定した。

③ 撮影地点の設定と検証データの取得

本システムの運用は、宮島沼 (北海道美幌市、直径約600 m) と内沼 (宮城県栗原市、直径約1400 m) で実施した。カメラユニットは、宮島沼では南西部湖岸に、内沼では湖心に設置した。また、カメラユニットは、湖心上空が画像中心となるように設置した (図(3)-5左)。

運用期間は、宮島沼では2017年10月、2018年4月から5月、同年9月から10月、内沼では2018年10月から2019年1月である。撮影時間は、マガンのねぐら入り開始から日没までの90~120分間とし、撮影間隔は2秒とした。この撮影を概ね2日に1回の頻度で実施した (内沼では2018年12月以降2週間に1回の頻度)。操作は北海道大学農学部から行った。

このシステムをマガン以外の対象の適用性を検討するために、2018年11月より鹿児島県出水市でマナヅル (*Grus vipio*) 等のツル類を対象として試験的なモニタリングも実施した。

画像処理により得られた個体数推定値の正確度や精度を評価するために、検証用に得た個体数との比較を行った。検証用データを得るために、それぞれの湖沼でのポイントセンサスによるマガンの個体数調査を実施した。これによる個体数を従来法個体数、画像処理により得た個体数を画像処理個体数と略す。その調査の際、時間分解能の高いデータを得るために、独自に製作したタイムスタンプ機能付きカウンター (デジアナカウンター) を用いた (図(3)-5右)。調査は、調査員1名で見晴らしのよい場所で撮影時刻と合わせて実施した。回収したタイムスタンプデータは、撮影間隔と合わせるために、2秒間の

個体数に集計し直した。精度評価には、その2秒間隔の個体数のほか、調査日の合計値より得られる総個体数を用いた。調査で得られる総個体数は、撮影時間に合わせて集計した。破損した画像データが多く含まれる調査日のデータや画像にノイズが発生していた日没後のデータは以降の評価から除外した（図(3)-13b）。このほか、雨天時はレンズカバーに付着した雨滴を動体として計数してしまうことから、雨天の撮影日のデータも除外した。



図(3)-5 内沼（宮城県）の湖心にカメラユニットを設置した例（左），ポイントセンサス用に製作したデジアナカウンター（右）。

（2）トンボ類モニタリング

① システムの概要

高温多湿環境での運用や水面上トンボの撮影が可能となるように、マガン用システム（BiMO-WF）のカメラユニットの冷却装置を空冷式に改良し、トンボ用カメラユニット（BiMO-DF: Biota Monitoring System for Dragonfly）を製作した（図(3)-6）。また、トンボ用の撮影は下向きで行うことと、消費電力を下げるために、マガン用システムに搭載していたワイパー、シェード、洗浄用スプレーは除くこととした。その他の仕様は、マガン用と同じである。

② 撮影地点の設定と検証データの取得

調査は、オオセスジイトトンボ（*Paracercion plagiosum*）など多種のトンボ類が確認されている伊豆沼（宮城県）で実施した。カメラは、オオセスジイトトンボの産卵行動が確認されている湖岸A（地点は、希少種保護のために公表しない）と多種のトンボが確認されている湖岸Bの2か所に設置した。撮影対象を水面上に飛来するトンボとするため、撮影場所の湖岸に単管パイプでカメラ直下が撮影可能となるように設置した（図(3)-6）。湖岸Aでは2017年6～8月、湖岸Bでは8～10月に観測を行った。概ね毎日11時から2～10秒間隔の撮影を実施した。2018年6月からは、伊豆沼近傍の湖岸Cにて同様の撮影を実施した。なお、これらの撮影は、北海道大学農学部から遠隔操作により実施した。

③ 画像処理によるトンボ類の検出と計数

マガン計数と同様に、背景差分法による動体検知、解析対象域以外のマスク処理、セグメンテーションとラベリングによるオブジェクトの計数法を採用した。この画像処理を、解析対象の画像群について自動実行するスクリプトをR言語で作成した。開発環境には、EImage（Pau et al. 2010）とCRImage（Failmezger et al. 2012）の画像処理パッケージを導入したMicrosoft R Open 3.4.3（Microsoft）を用いた。

背景差分法による動体検知のみでは、風などにより動く水面の水生植物等も検出される問題があった。そこで、動体で、なおかつ植物の緑色以外の物体をトンボとする処理を施した。緑色の指標には、植生指標としてしばしば用いられる rG （ $rG = G/(R+B+G)$ ）を用いた（例えば、Ide and Oguma 2010）。植物と植物以外を分類するため、この rG 画像について閾値を設定し二値化処理を行った。先の背景差分の動体

検知画像とこのrG二値化画像の積によりトンボを抽出した。

チョウトンボ (*Rhyothemis fuliginosa*) などの黒色のトンボ類については、rG画像のみでは、植物の分離が困難であったことから、彩度に閾値を設け二値化処理を行った画像と背景差分の動体検知画像、rG二値化画像の積を求め、トンボを抽出した。

以上の過程で発生した数ピクセルのノイズを除去するため、モルフォロジカル処理のerodeとdilateを施した。その後、トンボとして抽出されたオブジェクトのセグメンテーションを行い、ラベリング (bwlable関数) を施し、オブジェクトサイズが2 px以上のものについて計数した。



図(3)-6 トンボ用カメラユニットと設置例。マガン用カメラユニットからシェードやワイパー類を除去し、ユニット内の冷却方式を変更した。

④ ディープラーニングを用いたトンボの検出

ディープラーニング用フレームワークDarknetの機能として提供されているオブジェクト検出用モデルのYOLO (You Only Look Once) を用いた (Redmon et al. 2016)。いくつかのバージョンのモデルを試用したが、最終的にはYOLOv3を用いた。学習および検証データとして上記③と同じ画像群を用い、トンボ類が1個体以上写っている約1,600枚の画像を抽出した。ここではトンボの種については区分しなかった。その抽出した画像群の80%を学習用データ、20%を検証用とした。画像内においてトンボの占める面積が極めて小さいことから、元画像の3,000×4,000 pxを3,000×3,000 pxにトリミングし、さらにその画像を600×600 pxで分割した画像についてアノテーション (画像中の物体の位置とクラスのラベル付け) を行い学習を行った。学習は、クラウド上GPUを使用するGoogleColaboratory環境で行った。

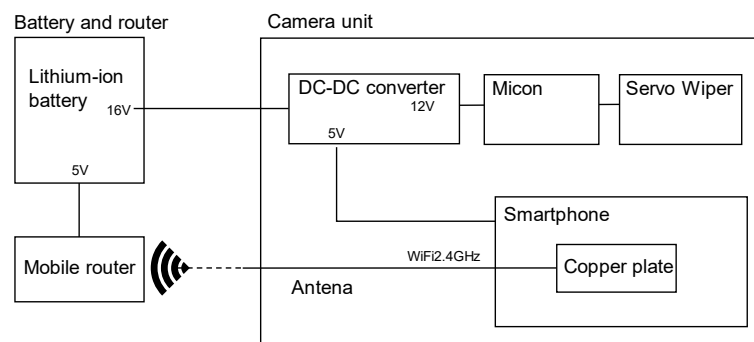
(3) 魚類モニタリング

① システム概要

本システム (BiMO-UW: Biota Monitoring System for underwater environment) は、水面下に設置したスマートフォンを遠隔操作することにより魚類をはじめとする水生生物の撮影を実行し、取得された映像を水中からの無線通信で、インターネット上のサーバ等に送信するものである。湖沼の沿岸部や河川でのモニタリングを想定し、水深1 m程度の防水性能を有すること、小型の太陽光パネルとバッテリー等の電源を確保し撮影期間に制限がないこと、遠隔操作で映像確認や撮影間隔等の撮影条件の変更が可能であること、撮影された映像を自動でオンラインストレージ等にアップロードできること、レンズカバーの汚れを防止するためのワイパーを搭載することを条件にシステムを開発した。

流通している様々な機器の中より、2017年4月時点で解像度が最も高かった24 Mpxの解像度を有するスマートフォン（SO-02J, ソニーモバイルコミュニケーションズ株式会社）を採用した。オペレーションシステムはAndroid 7.1.1（2017年8月時点）である。できるだけ広範囲の撮影を行うため、全周魚眼レンズ（MLens V2, MPOW社）をスマートフォンのレンズ部に取り付けた。水中から空中への無線通信を可能とする同軸ケーブル（3D-2V-100, KHD Electronics Co., Ltd.）を配置し、地上のWi-Fiルータ（FTJ162A-ARIA2, MAYA SYSTEM, Inc.）まで延長させた。2.4 GHz帯のWi-Fiによる通信でスマートフォンとルータ間の通信を行った。そのルータから携帯電話回線網（移動通信規格上で4Gと呼ばれる3 GHz付近の周波数帯）を介してインターネットに接続した（図(3)-7）。電源には、防水ケースに格納したリチウムイオン電池（Laptop power bank K2, MAXOAK, 185 Wh）と太陽電池モジュール（SY-M50W-12, SUNYOOO solar Limited）を採用した。DC-DCコンバータ（KID-1205A, Kaga Components Co., Ltd.）で適切な電圧に変換して、スマートフォンやワイパー制御機器、ルータに給電した。カメラ部（カメラユニット）の性能試験を繰り返して改良を施し、最終的には、ワイパーを搭載したアクリル製防水ケースを採用することとした（図(3)-8a～d）。これに合わせて水質監視システムも別途製作した。これにより得られた電気伝導率や水温、溶存酸素濃度などのデータをインターネット上のサーバに送信して、WEBサイトに公開するようにした（図(3)-8e～g）。このカメラユニットを、モニタリング地点の水中に固定し、ルータや電源類は地上に設置した（図(3)-9）。

スマートフォンと遠隔操作には、遠隔操作ソフトウェアのTeamViewerとTeamViewer Host (TeamViewer) を用いた。取得したデータの保存は、スマートフォン側にGoogle Photoを導入し、クラウドであるGoogle Driveに自動で同期するようにした。また、映像をクラウドにアップロードした後にスマートフォン内のファイルを削除する設定にした。高解像度を維持したインターバル撮影のために、撮影間隔の変更、時間予約や夜間撮影停止機能を加えた撮影用Pythonスクリプトを作成した。実行環境にはQPython3 (QPythonLab) を用いた。画像は24 Mpxで撮影し保存するように設定した。これらにより、遠隔地のPCやスマートフォンからの操作と高解像度の静止画の撮影、撮影間隔の変更、撮影画像の自動アップロードが可能となった（藤本ほか 2019）。

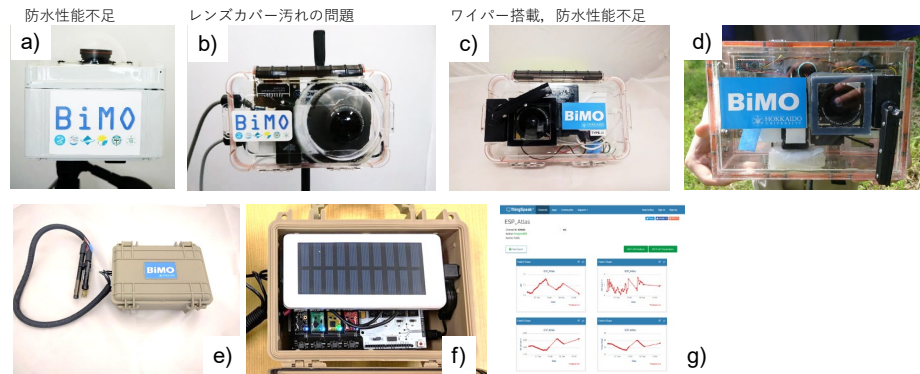


図(3)-7 スマートフォンを用いたモニタリングシステムの構成

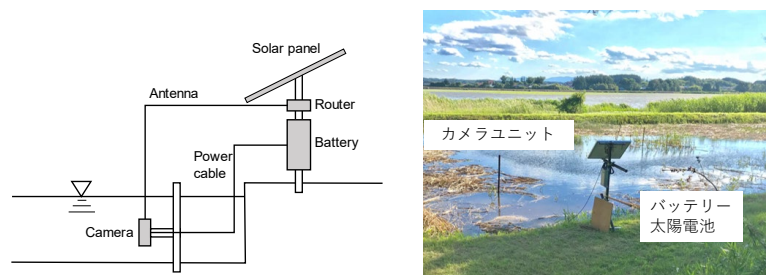
② 性能試験とモニタリング地点の設定

システム開発にあたり、伊豆沼・内沼（宮城県）の湖岸に造成された3つの小規模池で、2017年8月から10月にかけて性能試験を実施した。

モニタリングは、シナイモツゴ (*Pseudorasbora pumila*) が放流されたA池（宮城県大崎市）とゼニタナゴ (*Acheilognathus typus*) が放流されたB池（宮城県伊豆沼付近）で実施した。各種の産卵期を対象としてA池では2018年5月15日から5月20日の期間、B池では2018年6月21日から10月5日までをモニタリング期間とした。



図(3)-8 カメラユニットの改良過程と水質監視システム。aからdに向けて防水性能を高め、ワイパーを搭載した。e, fは製作した水質監視システム、gは電気伝導率や溶存酸素濃度データを無線でアップロードしてWEB上で公開した例。



図(3)-9 水中生物用カメラシステムの設置。右は伊豆沼周辺の池での設置例。

③ 画像処理による魚類の検出と計数

画像の魚類の検出と計数のために、背景差分法による動体検知、解析対象域以外のマスク処理、ノイズ除去、セグメンテーションとラベリングによるオブジェクト解析を実施した。背景差分に用いる背景には、解析対象画像の前後画像の平均値を用いた。それらの処理を、解析対象の全画像について自動実行するR言語スクリプトを、EBImage (Pau et al. 2010) を導入したMicrosoft R Open 3.5.1 (Microsoft) 環境で作成した。

背景差分による動体検出には、RGBのうちR (赤) 輝度を用い、その差分後の二値化閾値は調整して最終的に0.01 (256階調を正規化した値) を用いた。また、ノイズ除去のため、モルフォロジカル処理のerodeとdilateを施した。erodeでは、30 pxのdiscに設定した、dilateでは60 pxのGaussianに設定した。その後、抽出されたオブジェクトのセグメンテーションを行い、ラベリング (bwlabel関数) によるオブジェクトの計数を実施した。その際、5,000 pxより大きいオブジェクトを対象とした。

4. 結果及び考察

(1) マガンモニタリング

① システム運用状況

全運用期間で、約75万画像の取得に成功した。運用中、風速20~30 m s⁻¹程度の台風時の強風、湖沼の増水による冠水、積雪などがあったが、そのような過酷な環境下でも故障はなく、安定して鮮明な画像を取得できた (図(3)-13a)。電力不足によるカメラユニットの停止は生じなかったが、撮影やデータ転送が中断するトラブルがあった。これは、電波干渉による制御信号の遮断のためと考えられた。

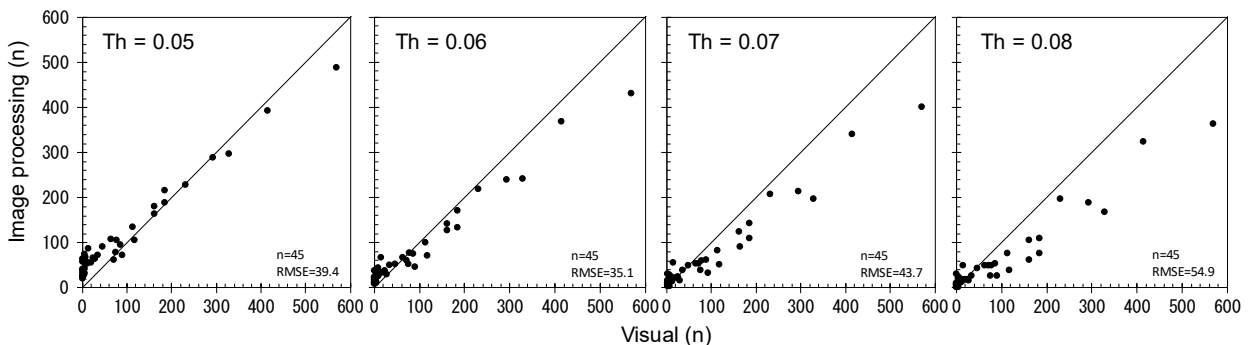
運用後に回収し機器の不具合の確認を行ったが、ゴム製のシェードが約半年の運用で劣化することがわかった。それ以外の交換が必要なパーツは見当たらなかったが、バッテリーは充電放電の繰り返しで劣化するため、1年から2年で交換したほうがよいと思われる。

マガンのほかに、オオハクチョウ (*Cygnus cygnus*) やオナガガモ (*Anas acuta*) , ヒシクイ (*Anser fabalis*) なども確認されたが、逆光条件下の撮影のために鳥と考えられるオブジェクトが黒く写りやすく、さらに、遠方の鳥は10ピクセル程度と小さいために、目視で種を同定することは困難であった。そのため、ここでは動体として検出されたオブジェクトを全てマガンと仮定して計数することとした。

同システムを用いて、鹿児島県出水市にてツル類のモニタリングを試験的に施した。マガンと同様に撮影は可能であった。しかし、カメラユニットと基地局間の通信障害が生じ、安定的に運用することができなかった。このことから、カメラユニットや基地局の設置地点は、通信試験を十分に実施した上で決定する必要があると考えられた。

② 画像処理によるマガンの検出と計数

背景差分後の二値化処理の閾値を決定するため、2017年10月10日に宮島沼で得た画像群から、連続した3フレーム45セットを選択して、背景差分・ラベリングによる計数値を求め、画像上での目視での計数値との比較を行った。ここでは、二値化後の画像に大量に発生したノイズを除去するために、オブジェクト面積3 px以上のオブジェクトを計数した。二値化閾値を変化させて画像処理による計数を行った結果、閾値が大きいほどばらつきが大きくなる傾向があったが、0.05から0.07の間で目視結果と概ね一致する傾向があり、平均二乗誤差 (RMSE) も小さかった (図(3)-10)。この閾値は、レンズの歪みやカメラのイメージセンサの感度、各調査地での太陽光の入射角等の天候によって変化するため、カメラや調査地ごとに定めることとし、機器や撮影環境に合わせて、閾値を0.05~0.07間で調整することとした。



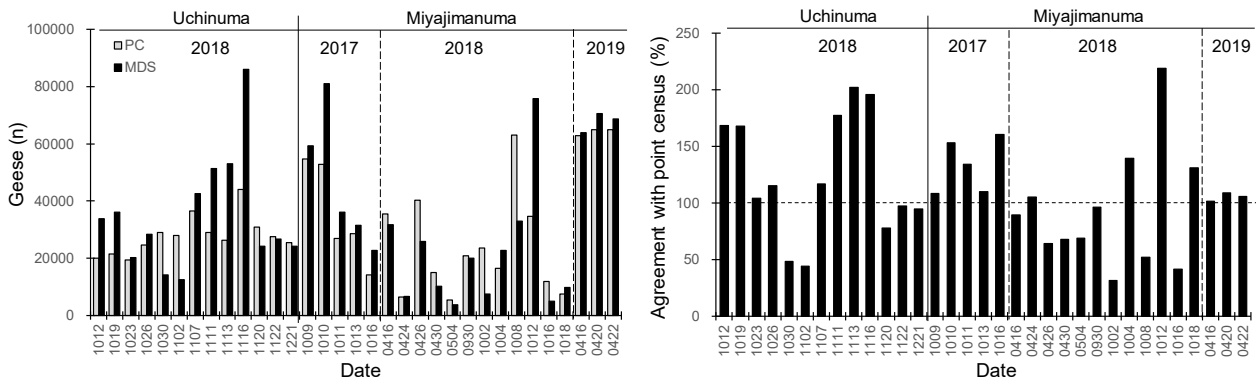
図(3)-10 背景差分処理で得られたマガン個体数と画像上目視で得た個体数の関係。Thは二値化閾値。

各種調整用パラメータを画像や従来法の計数と照らし合わせて決定した。内沼では二値化閾値を0.07、DSのオブジェクトサイズ範囲を5~33 px、宮島沼では二値化閾値を0.05、DSのサイズ範囲を4~33 pxに設定した。ウインドウは、内沼では環状、宮島沼では扇形の180度を用いた。半径は何れも700 pxに設定した。

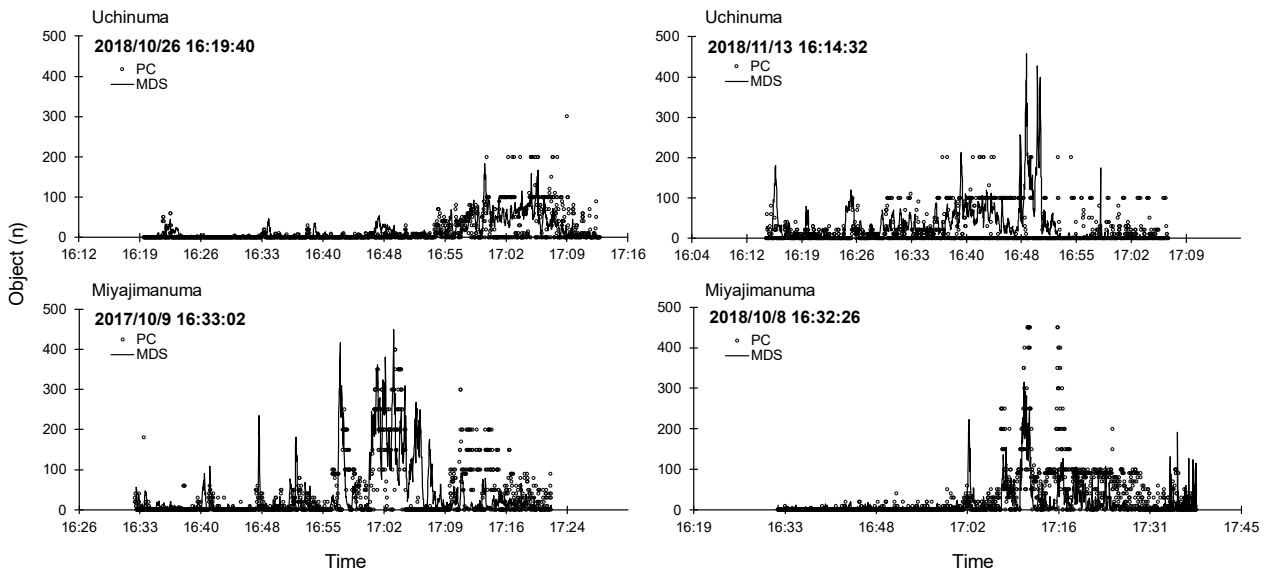
従来法による調査の結果、内沼の総個体数は、期間中20,000から40,000羽であったが、画像処理個体数は10,000から85,000羽の範囲と画像処理であった。宮島沼では、従来法で5,000から63,000羽、画像処理で3,600から81,000羽の範囲で、内沼と同様に過大過小評価されていた (図(3)-11左)。従来法総個体数を真値とした場合のRMSEは、内沼で17,434羽、宮島沼で15,688羽となり両湖沼とも画像処理個体数の精度は低かった。従来法総個体数を分母として求めた一致率は、内沼では期間中の平均で124%で、対象期間13日中6日が±20ポイント以内 (従来法個体数の2割以内) に収まった (図(3)-11右)。宮島沼では一致率平均値は105%と内沼に比べて100%に近い値が得られたが、±20ポイント以内に収まったのは、期間17日中5日であった。これらのことから、画像処理による総個体数の計測は、正確度、精度ともに低いことがわかった。

その原因を把握するために、各調査日の従来法と画像処理個体数の時間変化を調べた。一致率が高かった調査日については、従来法と類似した分布を示していた。しかし、一致率の低かった調査日には、

画像処理個体数は、従来法でマガンが検出されていない時間帯に連続して高い値が得られることが多かった（図(3)-12）。また、従来法でマガンが計数されていても、画像処理では検出漏れが生じていることもあった。



図(3)-11 各サイト・調査日における従来法（PC）と画像処理（MDS）の総個体数（左）と一致率（右）



図(3)-12 各サイト・調査日における従来法（PC）と画像処理（MDS）の計数の時間変化の例

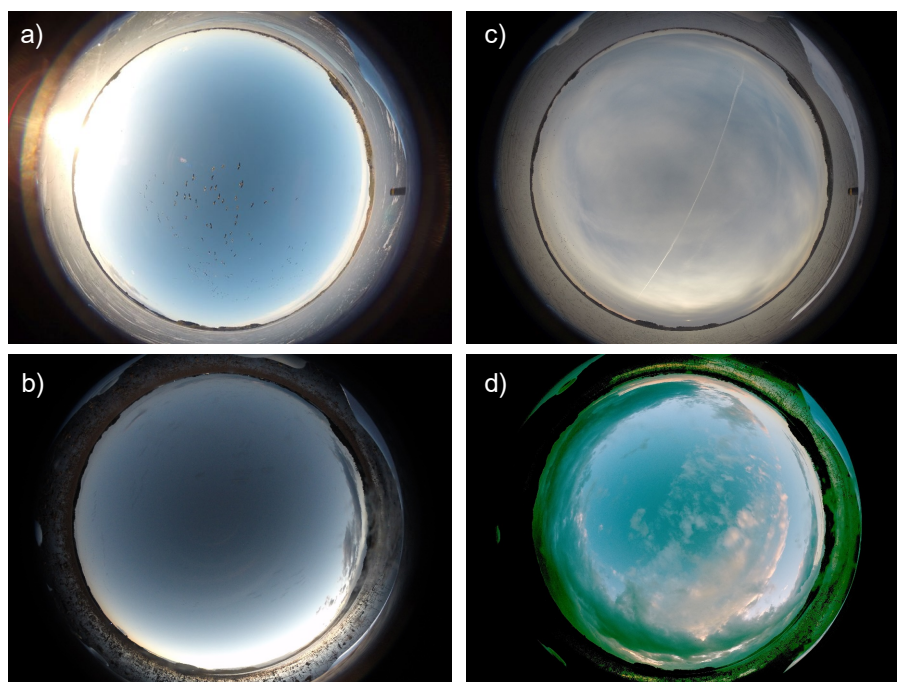
画像を確認した結果、連続して高い値が得られていたのは、飛行機雲を誤検出しているためであることがわかった（図(3)-13c）。また、間欠的に極めて多い個体数が得られることもあったが、これはカメラの自動露出補正のエラーによるものであった（図(3)-13d）。このほか、ポイントセンサスの調査者へのヒアリングにより、人やオジロワシの影響で撮影中に湖面のマガンが再び飛び立つこともわかった。それらのマガンが、画像処理で計数されることが従来法と異なる結果が得られた原因とも考えられた。

いっぽう、画像処理での検出漏れは、マガンが湖面の近傍を飛行する場合、遠方の山や黒い雲に重なりマガンが小さく認識し難い場合に生じていることがわかった。このことから、設定したマスク処理と距離選択フィルタの調整用パラメータに問題があると考えられた。

この問題の確認のために、宮島沼にて2019年4月16日から22日にかけて新たに撮影と画像処理を実施した。飛行機雲の発生や撮影中の飛び立ちの影響が少なかった撮影日を対象として、ウインドウの陸域境界を水面までに拡大し、距離選択フィルタ（DS）のオブジェクト範囲を3～33 pxに設定して解析を行った。その結果、4月16日、20日、22日の一致率は105%と100%に近い値が得られた（図(3)-11の宮島沼2019

年)。RMSEは3,931羽となり、これまでの解析結果に比べて、正確度、精度ともに向上した。

これらのことから、マスク範囲と距離選択時のオブジェクトサイズの調整パラメータを適切な値に設定しなければならないという課題があるが、画像処理でも高い精度の個体数を得られることが明らかとなった。今後は、さらに検証用と画像データを蓄積することで、適切なパラメータの探索やその設定方法を検討する必要がある。また、飛行機雲などマガンと同様に早く動くオブジェクトの誤検出を防ぐ方法、カメラの自動露出エラーや照度低下時のノイズ発生時の対策を検討する必要がある。現時点の解析法では、調整パラメータが多く、その調整に経験が必要であり、処理時間が長い（1画像あたり10～15秒）という課題が残る。今後の実用化に向けては、パラメータを削減するための画像処理過程の簡素化、あるいは深層学習による検出法を用いるなどの画像解析法の抜本的な見直しなどにより、迅速で、頑強な計数法についても検討する必要がある。



図(3)-13 本システムで得られた画像の例。b～dは誤計数が生じやすい画像。bは照度不足で画像上にノイズ発生，cは飛行機雲，dはカメラ自動露出エラー。

(2) トンボ類モニタリング

① システムの運用状況

2017年の撮影期間中、湖岸Aでは21,284画像、湖岸Bでは50,367画像の取得に成功した。機器の故障はなかったが、撮影や基地局パソコンへのデータ転送が中断するトラブルがあった。これは、電波干渉により制御信号が遮断されたことや、熱暴走でカメラが停止してしまったためと考えられる。2018年に実施した湖岸Cの撮影では、システムのトラブルはなかったが、画像を確認した結果、トンボが写っていないかった。そのため、湖岸Cで得た画像は、以降の解析には使用しなかった。

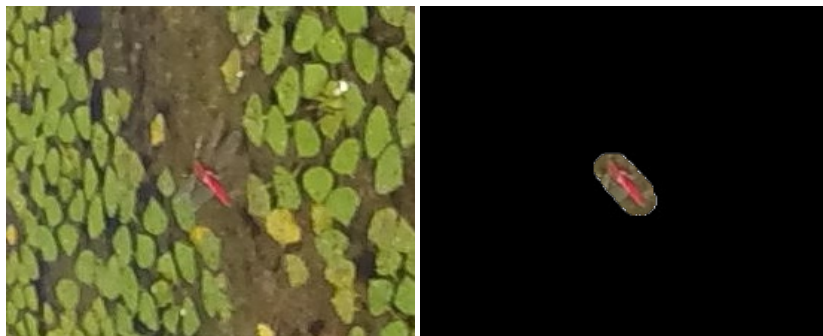
撮影した全画像について目視でトンボを確認した結果、チョウトンボ、アキアカネ (*Sympetrum frequens*)、ノシメトンボ (*Sympetrum infuscatum*)、コシアキトンボ (*Pseudothemis zonata*)、ショウジョウトンボ (*Crocothemis servilia mariannae*) を含む約2,000個体のトンボ類を確認することができた。しかし、オオセスジイトトンボなどのイトトンボ類は確認できなかった。これは、画像の解像度が不足していたためであった。また、湖岸Bでは、11種のトンボが確認されているが（上田ほか 2016）、画像からは全ての種の確認ができなかった。これは、飛行速度の大きいトンボに対して、撮影間隔が長いと考えられた。これらの問題に対応するために、今後は、対象のトンボに合わせた解像度が得られるカメラを使用するか、撮影位置、撮影間隔を設定する必要があると考えられた。また、同色の複数種があ

るため画像上での目視による種の同定は困難であった。そこで、以降の画像処理では、黒色と赤色のトンボに分けてそれぞれの個体数を計測することとした。

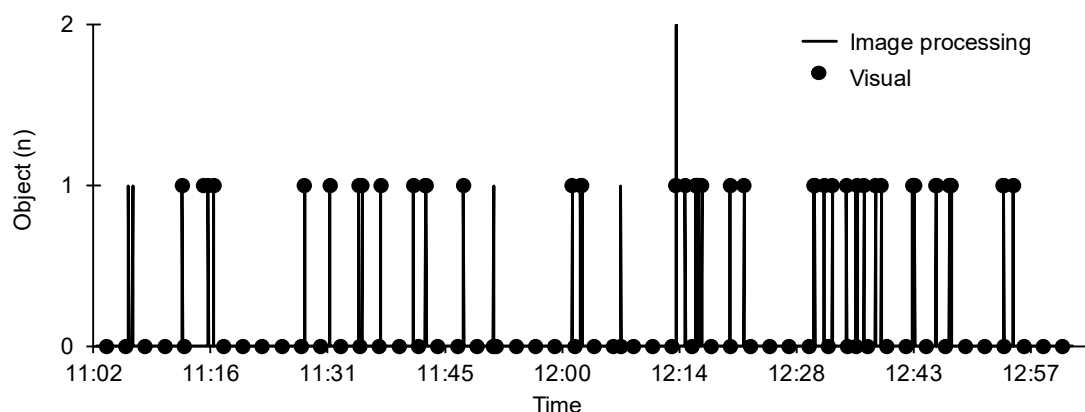
② 画像処理によるトンボ類の検出と計数

背景差分による動体検出には、RGBのうちR（赤輝度）を用い、その差分後の二値化閾値は0.21（256階調を正規化した値）に設定した。rGによる植物との区分の閾値は、0.275に設定した。黒色のトンボに対しては、rGによる植物との区分の閾値は0.34、彩度の閾値は0.20に設定した。ノイズ除去を目的としたerodeは3 px, dilateは17 pxのdiamond, 黒色トンボについては、erodeは5 px, dilateは23 pxのdiamondで処理した。その閾値を設定したスクリプトを、撮影期間中最もトンボが多く写っていた2017年9月1日の11時から13時に得た3,600画像に対して実行した。

それらの画像処理の結果、赤色、黒色のトンボが検出できたが（図(3)-14）、静止していたトンボ、水面のトンボの影などを誤検出する場合もあった。計数の正確度を把握するために、解析結果でトンボが1個体以上計数された50画像と0個体と計数された50枚をそれぞれランダムに抽出した。その計100画像について目視でトンボを計数し、検証用データとした。その結果、赤色のトンボの計数は目視と概ね一致し、一致率（目視計数と一致した率）は93%であった（図(3)-15）。これに対し、黒色のトンボでは、一致率は51%と低かった。これは、水面に映る植物の影など、黒色トンボと同系色の動体を誤検出したためであった。これらのことから、種の同定は困難だが、赤色トンボの計数には有効と考えられた。



図(3)-14 赤色のトンボを画像処理で検出した例。左は元画像、右は検出結果。



図(3)-15 画像処理 (Image processing) と画像上目視 (Visual) で得た赤色トンボの個体数の時間変化 (2017年9月1日)

③ ディープラーニングを用いたトンボの検出

YOLOv3を用いて学習を行った結果、約4,000イテレーション（学習回数）で損失関数が0.25に収束す

る傾向があった。この学習データを用いて検証用画像のオブジェクト検出を実施した（図(3)-16）。その結果、トンボと一致していたバウンディングボックスでトンボであるという確率は46～94%とばらついたが、トンボ以外のバウンディングボックスのその確率は数%と低かった。これは、トンボとそれ以外を容易に区分できることを示唆している。ここでは、背景差分による物体検出に代わる方法としてディープラーニングを試用したが、その可能性を示すことができた。



図(3)-16 ディープラーニングを用いたトンボの検出例。左は元画像、右の赤枠（バウンディングボックス）が検出部。

（3）魚類モニタリング

① 性能試験時とモニタリング時の稼働状況

前述の造成された池で、カメラを岸際から約50 cm、水深約40 cmの位置に設置し、10分間隔でインターバル撮影を行う性能試験を行った。試験期間に、約1,000画像を得た。日の入り後の時間帯に撮影された画像はスマートフォンのカメラのISO感度が不足していたためか暗く不鮮明で、生物を確認できなかった。それ以外の時間帯で得た447画像について目視で魚類を確認した。その結果、コイ (*Cyprinus carpio*)、フナ類 (*Carassius sp.*)、モツゴ (*Pseudorasbora parva*)、オオクチバス (*Micropterus salmoides*)、ブルーギル (*Lepomis macrochirus*)、ゼニタナゴの合計6種が確認された。また、産卵期には成熟したゼニタナゴのメスの産卵管を視認することもできた。性能試験時にはケースにワイパーを搭載していなかったため、レンズカバーに藻類が付着して撮影ができなくなる問題があったが、防水性能や機器の稼働には問題がなかった。

モニタリング対象の池では、カメラを岸から1～2 m離れた水深約30 cmの位置に設置した。ここでは、ワイパーを搭載したケースを使用した。モニタリング期間後期に若干の藻類の付着はあったが、魚類が確認できなくなるほどではなかった。電力不足は発生しなかったが、撮影用スクリプトが停止する問題が発生した。これは、後の原因調査で、スマートフォンのOSの自動アップデートによるRAM不足に起因していたことが判明した。この問題については、RAM容量の大きいスマートフォン (ZE620KL, ASUS) に交換することで解決した。このほか、カメラ機能の自動露出補正のエラーにより白飛び画像が発生することがあった。そうしたトラブルがあったものの期間中に、約7,000画像を取得することができた。それらの画像からシナイモツゴとゼニタナゴがもっとも多く撮影されていた。ほかにもスジエビ (*Palaemon paucidens*)、ドジョウ (*Misgurnus anguillicaudatus*) などの約300個体の魚類や甲殻類等が目視で確認された。このシステムでは撮影間隔を自由に設定できるようにしているため、動体検知用のモニタリングで必要となる画像数を大幅に減らすことができた。

モニタリング終了後、アクリルで作成したケースにひび割れや変色が生じていた。これは設置環境の日射が強く温度変化が激しいことで生じる劣化のためと考えられた。このことから、温度環境等の変化が大きい場での長期間のモニタリングには、アクリル製のケースは適していないと考えられた。

② 画像処理による魚類の検出と計数

性能試験時には10分間隔の撮影を行ったが、10分間の差分では、光や風、波などによって背景自体が変化したため、撮影時に0.5秒間隔連続3フレームの撮影を行うように撮影用スクリプトを改良した。その3フレームの中央のフレームを対象に、背景差分による動体の検出を行った。

画像処理における魚類の検出精度（分類精度）を評価するために、モニタリング期間に得られた画像群から目視で魚類の有無の分類を行った画像セット（3フレーム1セット、170セット）を作成した。分類精度の評価には、混同行列とKappa係数を用いた。

魚類の有無の分類を行った結果、ユーザー精度は51.0%、98.3%であった（表(3)-1）。プロデューサ精度は92.6%、83.2%と高い値を示した。Kappa係数を求めた結果、0.57となり適度な一致が確認された。魚類有と分類された画像では、ゼニタナゴが検出されていた（図(3)-17）。目視の魚類有の画像の中で、魚類無と分類された2画像は、設置時に発生した水の濁りと除去しきれなかった藻類の付着があった。目視の魚類無で、画像処理では魚類有となった24画像は、風波による光のゆらぎや風による植物の動き、水面の浮遊物などがあった。これらのことから、水の濁りやワイパーの汚れを防ぎ、できるだけ光や波の影響を受けない場をモニタリング地点とする必要があると考えられた。

表(3)-1 混同行列と分類精度

Predicted	Actual class			User's accuracy (%)
	Fish	Non-fish	Total	
Fish	25	24	49	51.02
Non-fish	2	119	121	98.35
Total	27	143	170	
Producer's accuracy (%)	92.59	83.22		
Overall accuracy (%)	84.71			
Kappa	0.57			

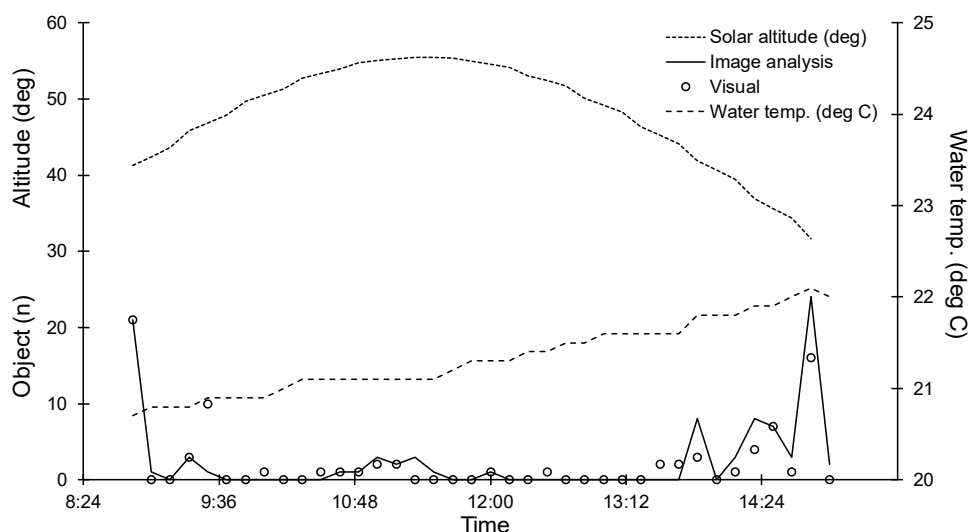


図(3)-17 画像処理による魚類検出例。検出された魚類はゼニタナゴ。

システムトラブルのため、期間中連続した画像を得ることができなかったが、期間中に比較的長時間の映像を得ることができた2018年9月12日を対象に、先の画像処理アルゴリズムと、オブジェクト分類を適用して魚類個体数の計測を行った。また、目視で計測した魚類の個体数との比較を行った。その期間は、ゼニタナゴの産卵期で撮影されていたのはゼニタナゴに限られた。

目視と画像処理の計数は、概ね一致していた（図(3)-18）。その個体数の時間変化から、太陽高度が高く水中が明るい時間帯では個体数が顕著に少なく、9時と14時頃に増加する傾向がみられた。このこと

は、朝、夕暮れ前の時間帯に湖岸にゼニタナゴが集まり易いことを示唆している。今後、連続した長期的なモニタリングとパタン解析により、ゼニタナゴなど魚類の習性が明らかになるものと考えられた。



図(3)-18 目視と画像処理による魚類計数結果と時間変化 (2018年9月12日)

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

鳥獣被害対策や希少生物保護として、定点カメラを用いた監視法が普及しつつあるが、遠隔での映像の取得から個体群の定量化までが統合されたシステムはない。また、本研究成果であるねぐら入りマガンの自動モニタリングは世界初の試みでもある。そのモニタリングシステムを実用レベルまで進歩させたことは、モニタリング技術としてだけでなく、監視機器技術としても意義深い。

水鳥や昆虫類、魚類の検出や計数を目的とした画像処理技術に関する研究事例も極めて少なく、画像処理による自動検出・計数は実用化には至っていない。ここでは、画像処理を用いて、生物の検出のほか、従来のポイントセンサスで得られる個体数に近い値を得ることに成功しており、画像処理の研究分野に対しても貢献度が高いと言える。また、新たな画像処理や解析法の開発のためにも、ここで蓄積した数十万枚の画像データセットは、貴重なデータとなると考えている。

本成果のモニタリング技術を全国に展開し、マガン中継地や越冬地のデータを連携させることでフライウェイ上での移動量の把握など個体群管理に重要な知見を提供する可能性がある。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

公益財団法人日本野鳥の会から環境省委託業務の「保護計画に関するモニタリング手法の情報収集」として鹿児島県出水市への派遣依頼およびヒアリングを受け、本研究成果をもとに助言を行った。

北海道美唄市「宮島沼の水環境の保全と再生に関する検討会議」の委員として参画し、本研究成果をもとに宮島沼保全のためのモニタリング法について助言を行った。

北海道美唄市と公益財団法人宮城県伊豆沼・内沼環境保全財団で、本研究成果であるモニタリングシステムの運用が開始された。鹿児島県出水市クレインパークとの共同試験を実施し、カメラを用いたツル類のモニタリング法について助言を行った。NPO法人シナイモツゴ郷の会との共同試験を実施し、魚類のモニタリング法について助言を行った。

<行政が活用することが見込まれる成果>

我が国には、50ものラムサール条約湿地がある。また、自然再生推進法の枠組みで実施された自然再生事業は、事業完了も含めて27事業にのぼる。さらに、環境省によりモニタリングサイト1,000として全国約1,000ヶ所のモニタリングサイトが設置されている。いっぽうで、外来性生物の分布域拡大と個体数の増加、野生動物による食害問題、病原細菌や鳥インフルエンザ等の感染症リスクの増大が懸念されている。これらのことは、モニタリングの対象やサイトが今後さらに増大し、その監視も長期化することを示唆している。しかし、我が国は人口減少時代に突入し、近年の専門家および監視経験者不足や労働コスト削減の問題から、地域から国レベルでモニタリングの継続が危ぶまれはじめている。

本研究では、無線通信を用いた遠隔操作と画像処理による自動的な個体数計測を可能とする低コスト（10～30万円）で耐久性の高いモニタリングシステムを開発した。これにより時間分解能の高い個体数の自動計数が可能となった。まだ2か所での運用に留まるため、今後も実績を積み上げる必要はあるが、この成果で開発したシステムは、先のモニタリング継続問題に対するひとつの打開策となると見込まれる。当面は、従来の方法を補間するように並行して運用し、人手不足等で完全にモニタリングが停止する場合に、本システムを代用するなどの利用が考えられる。このほか、人手の代用としてだけでなく、従来の方法で時間分解能の低かった（調査頻度の低い）モニタリングに対し、リアルタイムで、なおかつ時間分解能の高いデータを得ることができるようになる利点もある。これによりモニタリングの高精度化、成果公開の迅速化が期待される。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 【予定】横山諒，山田浩之，木塚俊和，海津裕，遊佐健，牛山克巳：湿地研究（印刷中），農業活動がラムサール条約湿地宮島沼の水質の時空間変動に及ぼす影響
- 2) 藤本泰文，山田浩之，倉谷忠禎，嶋田哲郎：応用生態工学，21（2），171-179（2019），全周魚眼スマートフォンカメラを用いた水生生物の遠隔モニタリング
- 3) 平澤孝介，山田浩之，木塚俊和，中村雅子，牛山克巳：湿地研究，6（1），25-32（2016），宮島沼飛来マガン排泄物からの栄養塩類の溶出
- 4) 木塚俊和，中村雅子，牛山克巳，山田浩之：湿地研究，6（1），33-48（2016），収支の計算残差を用いた渡り性水鳥による過栄養湖への栄養塩負荷量の推定

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 【予定】北海道ネーチャーマガジン モーリー，52号，北海道新聞野生生物基金（印刷中）
「北海道大学サクシュコトニ川の小さな自然再生（山田浩之）」
- 2) 【予定】日本野鳥の会誌「野鳥」2019年6月号，（印刷中）
「全周魚眼カメラを用いたマガン個体数自動カウントへの挑戦（山田浩之）」
- 3) 矢部和夫，山田浩之，牛山克巳監修：湿地の科学と暮らし—北のウェットランド大全，北海道大学出版会，151-162（2017）
「14章 泥炭地の水文と形成プロセス（山田浩之）」
- 4) 釧路叢書「The Great Nature of Akan 阿寒の大自然誌」，37，157-168（2017）
「第11章 さまざまなセンサで面として阿寒湖を診る（山田浩之）」
- 5) 図説日本の湿地—人と自然と多様な水辺—，朝倉書店，178-179（2017）
「4-22 湿原の再生（山田浩之）」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 新谷奈津光, 岡田啓嗣, 山田浩之, 鮫島良次: 日本農業気象学会2019年全国大会 (2019)
「スイートコーンの収穫適期推定に関する研究」
- 2) 山田浩之, 小西哲也, 横山諒, 牛山克己, 高橋佑亮, 嶋田哲郎: 第13回伊豆沼・内沼研究集会 (2019)
「遠隔操作監視カメラシステムと画像処理を用いたマガン飛来数の推定」
- 3) 藤本泰文, 山田浩之, 山中登生, 倉谷忠禎, 嶋田哲郎: 2018年度日本魚類学会年会 (2018)
「スマートフォンを用いた淡水魚介類の遠隔モニタリング」
- 4) 山田浩之, 小西哲也, 横山諒, 安部晋吾, 山中登生: 日本湿地学会2018年度大会 (2018)
「遠隔操作デジタルカメラを用いた湿地生物モニタリングの課題」
- 5) 安部晋吾, 山田浩之, 嶋田哲郎: 日本湿地学会2018年度大会 (2018)
「無線通信全周魚眼カメラと画像解析を用いたトンボ類のモニタリング」
- 6) 山田浩之: 第12回バードリサーチ大会 (2017)
「全天空遠隔監視システムと画像解析を用いたマガン飛来数のモニタリング」
- 7) 山田浩之, 安部晋吾, 上田紘司, 嶋田哲郎: ELR2017名古屋 (2017)
「自動撮影全周魚眼カメラを用いたトンボ類の遠隔モニタリング」
- 8) 藤本泰文, 嶋田哲郎, 山田浩之: ELR2017名古屋 (2017)
「全周魚眼スマートフォンカメラを用いた水生生物の遠隔モニタリング」
- 9) 山田浩之, 横山諒, 九間啓士朗: ELR2017研究集会「ロボット・UAV・ネットワークカメラを用いた湿地生態系の監視と管理」 (2017)
「遠隔監視システムと画像処理を用いたマガン飛来数の推定」
- 10) 山田浩之, 横山諒, 九間啓士朗: 日本鳥学会自由集会「ロボットやセンサ, ドローンを活用した湿地生態系の監視・管理システムの構築」 (2017)
「全天空監視システムの開発と画像解析を用いたマガン飛来数の推定」
- 11) 山田浩之, 横山諒, 牛山克己, 嶋田哲郎: 日本湿地学会2017年度大会 (2017)
「全天空遠隔監視システムと画像解析を用いたマガン飛来数のモニタリング」
- 12) 山田浩之, 九間啓士朗, 村田祥子: 石狩川流域湿地・水辺・海岸ネットワーク設立記念フォーラム・ウェットランドセミナー (2017)
「無線通信360度カメラを用いたマガンモニタリング」
- 13) 山田浩之, 九間啓士朗, 村田祥子: 第11回伊豆沼・内沼研究集会 (2017)
「全天空監視システムの開発と画像解析を用いたマガン飛来数の推定」
- 14) 山田浩之: 日本鳥学会自由集会「ドローンを使った鳥類調査」 (2016)
「ちょっと変わったドローンの活用法」
- 15) 山田浩之: 応用生態工学会20周年記念大会東京大会自由集会「応用生態工学でUAVを活用する！」 (2016)
「UAVを使ったちょっと変わった調査法」
- 16) 山田浩之, 九間啓士朗, 村田祥子: 日本湿地学会2016年度大会 (2016)
「無線通信360度カメラを用いたマガンモニタリング」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 平成29年度伊豆沼・内沼自然再生協議会及びラムサールトライアングル関係者現地視察(宮城県主催, 2017年8月29日, 宮城県栗原市内沼及びサンクチュアリセンターつきだて館, 60名参加)にてデモンストレーションを実施

- 2) ELR2017 (日本緑化工学会・日本景観生態学会・応用生態工学会主催, 2017年9月22日, 愛知県名古屋市名古屋大学, 50名参加) にて研究集会「ロボット・UAV・ネットワークカメラを用いた湿地生態系の監視と管理」を開催
- 3) 宮島沼カントリーフェス2017 (宮島沼水鳥・湿地センター主催, 2017年8月) にてマガンモニタリグカメラの展示
- 4) 宮城県伊豆沼・内沼サンクチュアリセンター (2017年) にてマガンモニタリグカメラの展示
- 5) 第11回伊豆沼・内沼研究集会「環境研究総合推進費 推進課題 1-1602フィールド調査とロボット・センサ・通信技術をシームレスに連結する水域生態系モニタリングシステムの開発特集」(主催:(公財)宮城県伊豆沼・内沼環境保全財団, 2017年2月18日, 宮城県伊豆沼・内沼サンクチュアリセンター, 観客54名) にて成果紹介
- 6) 応用生態工学会20周年記念大会東京大会自由集会「応用生態工学でUAVを活用する!」(応用生態工学会, 2016年9月2日, 東京大学, 50名参加) を開催

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) NHK札幌放送局 (2017年8月2日, ほっとニュース北海道「全周魚眼カメラを用いた調査の取り組みについて紹介」)

(6) その他

- 1) 優秀賞, ELR (応用生態工学会ほか3学会合同大会) 名古屋大会, 2017年9月25日, 藤本泰文・山田浩之・嶋田哲郎, 全周魚眼スマートフォンカメラを用いた水生生物の遠隔モニタリング

8. 引用文献

- 1) Failmezger H., Yuan Y., Rueda O. and Markowetz F.: CRImage a package to classify cells and calculate tumour cellularity (2012)
- 2) Ide R. and Oguma H.: *Ecological Informatics*, 5(5), 339-347(2010), Use of digital cameras for phenological observations. doi:10.1016/j.ecoinf.2010.07.002
- 3) Redmon J., Divvala S., Girshick R. and Farhadi A.: The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 779-788(2016), You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection.
- 4) Pau G., Fuchs F., Sklyar O., Boutros M., Huber W.: *Bioinformatics*, 26(7), 979-981(2010), EBImage—an R package for image processing with applications to cellular phenotypes. doi: 10.1093/bioinformatics/btq046
- 5) Poon W.K., Wong C.J., Abdullah K., Lim E.S., and Teo, C.K.: In Proceedings 2011 8th International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization, 136-140(2011), Development of migratory birds population monitoring system using digital single reflex camera. <https://doi.org/10.1109/CGIV.2011.16>
- 6) T’Jampens R., Hernandez F., Vandecasteele F., and Verstockt S.: 2016 6th International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications(IPTA), (2017), Automatic detection, tracking and counting of birds in marine video content.
- 7) 上田紘司, 芦澤淳, 藤本泰文, 嶋田哲郎: 伊豆沼・内沼研究報告, 10, 21-37 (2016), 2014年の調査で確認された伊豆沼, 内沼およびその周辺地域のトンボ目成虫相
- 8) Yoshihashi R., Kawakami R., Iida M., Naemura T.: *Wind Energy*, 20(12), 1983-1995(2017), Bird Detection and Species Classification with Time-Lapse Images around a Wind Farm: Dataset Construction and Evaluation.

II-4 モニタリング技術の適正運用に向けたマニュアル・ガイドラインの作成

公益財団法人宮城県伊豆沼・内沼環境保全財団
研究室

嶋田哲郎

平成28(開始年度)～30年度累計予算額：22,925千円

(うち平成28年度：7,100千円，平成29年度：8,115千円，平成30年度：7,710千円)

累計予算額は，間接経費を含む。

【要旨】

湖沼環境の管理・監視の低コスト，省力化を目的に導入されるハス刈りロボットボートなどの各システムの構築に向け，モニタリング対象生物の量的な情報を収集することで，ハス刈りロボットボートの活用範囲，ネットワークカメラの有効性等の検証が可能となった。また，各種接近試験によるドローンに対するガンカモ類の忌避反応によって，離陸地から群れまでの距離，水平飛行高度及び垂直接近高度の目安を提示した。さらにドローンを活用したガンカモ類調査ガイドラインを発行し，ドローンを使ったガンカモ類モニタリング調査の指針を示した。

【キーワード】

ガンカモ類，ガイドライン，接近試験，ドローン，モニタリング

1. はじめに

我が国には50ものラムサール条約湿地があり，それらの湿地や日本全国に点在する湖沼はガンカモ類やその他渡り鳥の飛来地であるとともに，貴重な動植物の生息地である。また，農業用水や観光，環境教育などの各種生態系サービスを提供している貴重な自然資源でもある。その一方で，埋め立てや干拓による自然湿地の減少や護岸工事による生育域の消滅，外来植物，外来生物の移入などの影響を受けている。湿地や湖沼の生物多様性を維持し，自然再生を図っていくためには，詳細な生態系のモニタリングと精密な管理が必要とされる。しかし，これには非常に大きなコストと労力がかかるため実施が難しい場合が多い。本研究においては，近年発達著しいロボットおよび情報通信技術を用いて，湖沼環境のモニタリングおよび管理を低コスト，省労力で行う事を目的とする。

サブテーマ4では，その具体的な方策として，サブテーマ1から3で開発される各システムの構築に資するため，モニタリング対象となる生物種の環境情報を収集するとともに，開発初期段階の試験運用でシステム運用に関する情報の収集を行うとともにドローンによる監視が水鳥などの野外生物に及ぼす影響を明らかにする。

2. 研究開発目的

(1) モニタリング対象となる生物種に関する情報収集

サブテーマ1から3で開発される各システムの構築に資する環境情報を収集するため，伊豆沼・内沼の代表的な動植物種である，マガンやオオセスジイトンボをはじめとするトンボ類の個体数，ハスの分布調査を行った。

(2) 開発初期段階の試験におけるシステム運用に関する情報収集

ハス刈りロボットボート，ネットワークカメラの試験段階において，動作状況をはじめとする運用時の情報を収集するとともにシステムの正確性を担保するための検証用のデータの蓄積を行った。

(3) ドローンによる監視が水鳥などの野生生物に及ぼす影響の評価

鳥類の個体数調査でドローンを適用することを想定し，比較的広い範囲に大きな群れで分布するガンカモ類を対象に各種接近試験を行ったほか，ドローンの接近時，ガンカモ類に影響を与える要因が機体本体の視覚的なものか，プロペラ音による聴覚的なものかを評価するための騒音反応試験を行った。それらの結果をまとめてドローンを活用したガンカモ類調査ガイドラインを作成した。

3. 研究開発方法

(1) モニタリング対象となる生物種に関する情報収集

① マガンの個体数

マガンの個体数調査を伊豆沼・内沼で行った。調査は2016/17年の冬期に10月から3月にかけて毎月2回、計12回行った。マガンは日の出とともにねぐらとなる沼から採食場所である周辺の水田へ移動する。そこで日の出前から調査員を配置し、調査地を3つの区域に分けて沼から移動する群れを計測した。各区域の結果を集計してその日の飛び立ち個体数、すなわちねぐらをとったマガンの個体数とした。

② トンボ類の個体数

オオセスジイトトンボ成虫の個体数調査を伊豆沼に隣接する池で行った。調査は2016年5月から9月にかけて日中に17回行った。池の岸辺に沿って15mの調査ルートを陸域側に14箇所、水域側に10箇所設定し、ルートの左右それぞれ5mの範囲を調査区域とした。発見した全てのオオセスジイトトンボ成虫を捕虫網で採集し、雌雄別に個体数を記録した。

③ ハスの分布

地球観測衛星Landsat-8によって2015年8月6日に撮影された地上画素寸法15mの衛星画像（パンシャープン画像）を用いて、伊豆沼・内沼におけるハスの分布範囲を測量した。衛星画像の判読ではハスと他の植物の区別が困難な箇所については、現地踏査で補足した。

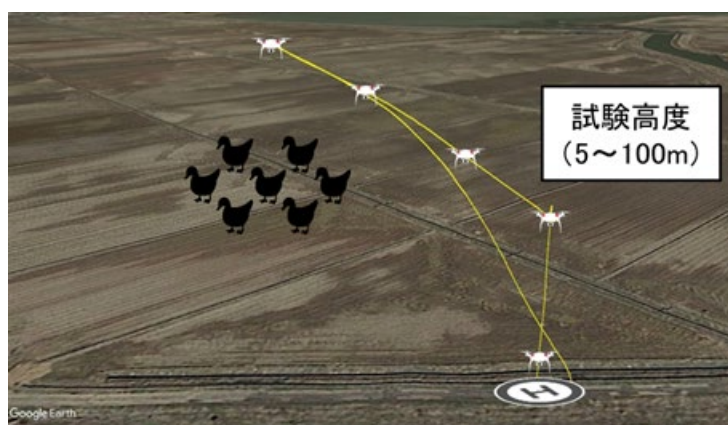
(2) 開発初期段階の試験におけるシステム運用に関する情報収集

ハス刈りロボットボート、ネットワークカメラの試験段階において、動作状況をはじめとする運用時の情報を収集するとともにシステムの正確性を担保するための検証用のデータの蓄積を行った。

(3) ドローンによる監視が水鳥などの野生生物に及ぼす影響の評価

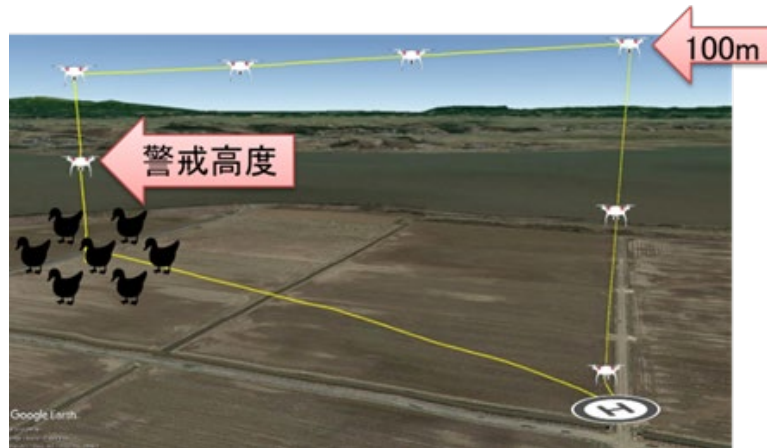
ガンカモ類を対象にドローンによる水平接近飛行と特定の群れまたは個体を撮影する場合に用いられる垂直接近飛行の2つの飛行試験を行った。また、これらの飛行試験のサンプルを用いて機体離陸地の遠近に対するガンカモ類の反応を解析した。

水平接近試験では、水平飛行時の高度の目安を得るため、ドローンの機体をガンカモ類の群れに接近させる試験を行った（図(4)-1）。試験は、機体離陸→その場で試験高度まで上昇→機首を群れに向けて前進→警戒・逃避行動があれば警戒レベルを記録→群れが飛び去るか、機体が群れの上空に到達した時点で試験終了、という手順で行った。警戒レベルは、0：無反応、1：機体を凝視する・首をもたげる、2：歩行や遊泳によって機体から遠ざかる、3：飛び去る、の4階級で判定した。また、警戒レベル0～1をまとめて「留まる」と表記した。試験高度は、5m、10m、15m、20m、25m、30m、40m、50m、60m、70m、80m、100mの中から適宜選択した。マガンについては最高高度の100mで警戒レベル3（飛び去る）を示したことから、例外的に高度150mも試験した。機体は、国内シェアの高い小型クアッドコプターであるDJI社 Phantom4を使用した。



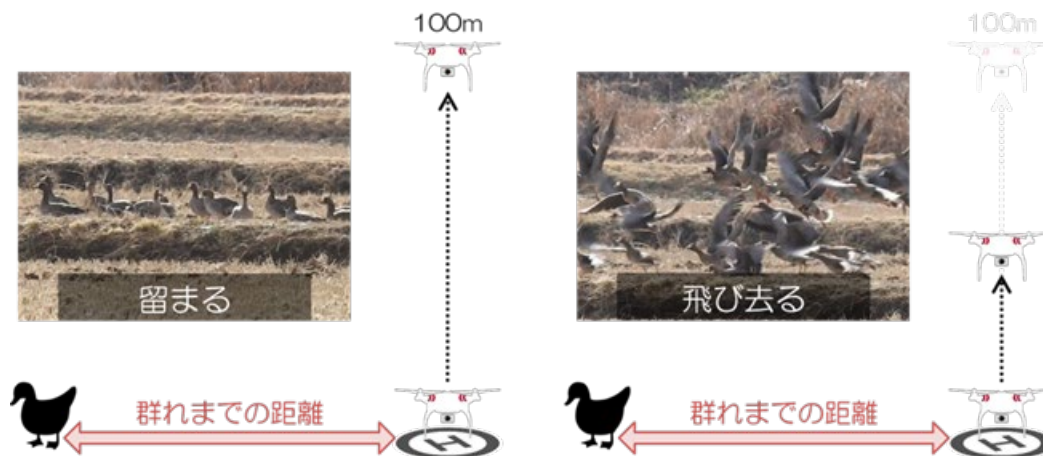
図(4)-1 水平接近試験

垂直接近試験では、垂直降下時の下限高度の目安を得るため、ドローンの機体をガンカモ類の群れに接近させる試験を行った(図(4)-2)。試験は、機体離陸→その場で高度100mまで上昇→機首を群れに向けて前進→群れの上空に達し次第、降下を開始→警戒行動があれば警戒レベルとその時点の機体高度を記録→群れが飛び去るか、機体が高度10mまで到達した時点で試験終了、という手順で行った。警戒レベルは、水平接近試験と同じく0～3の4階級で判定し、警戒レベル2～3をまとめて「逃避行動」として整理した。警戒レベルと同時に記録する機体高度は、タブレット等にインストールしたフライトアプリ(DJI GOまたはLitchi)の画面に表示される高度をリアルタイムで書き留めるか、現場で記録した時刻とフライトログを後で突き合わせて高度を読み取った。機体は、水平接近試験と同じくDJI社 Phantom4を使用した。



図(4)-2 垂直接近試験

さらにドローンを離陸させる時の鳥との距離の目安を得るための試験を行った。ガンカモ類の群れまでの距離を変えてドローンを離陸地の直上100mまで上昇させた時の群れの反応を記録した。そして、機体が高度100mに到達するまで群れがその場に留まった事例と、上昇中に群れが機体に反応して逃避した事例に分けて、群れまでの距離を比較した(図(4)-3)。群れの反応は、歩行または遊泳によって遠ざかる、飛び去るといった行動が認められた場合は「逃避」と判定し、無反応、首をもたげる、機体を注視するといった機体を気にしないか気にしている様子であっても静止していた場合は「停留」と判定した。機体は、接近試験と同じくDJI社 Phantom4を使用した。



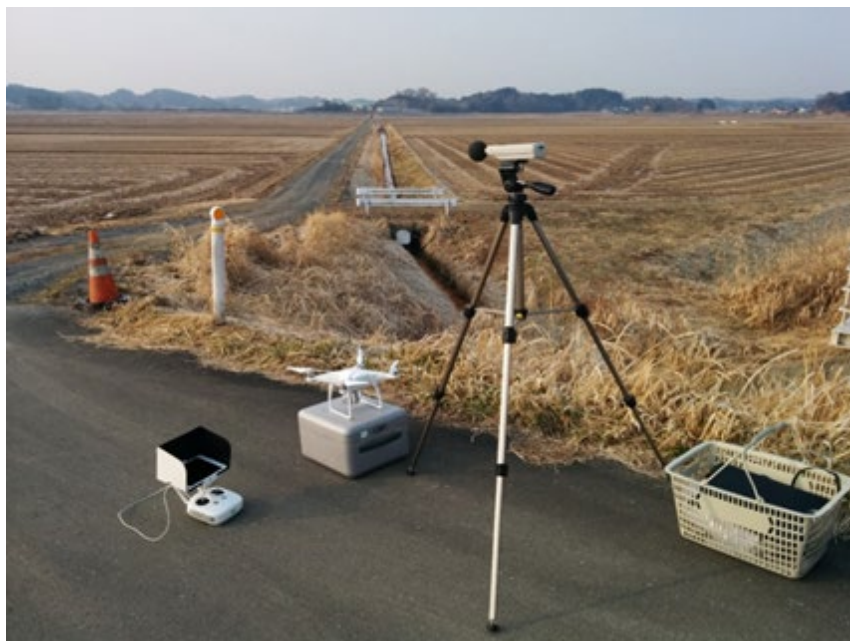
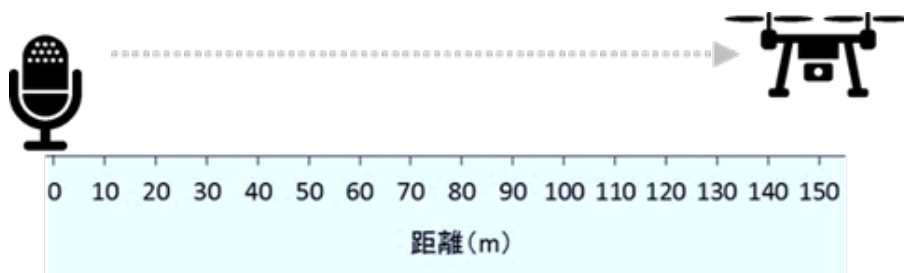
図(4)-3 離陸地の遠近に対するガンカモ類の反応調査

鳥類がドローンを忌避する主な要因としては、機体の接近という視覚的な要素と、ローターが回転することで発生する風騒音(以下、ローター音)という聴覚的な要素の2つが考えられる。忌避要因を把握

できれば、攪乱を避けるための対策をよりの確に選択できるようになると考えられる。例えば、ローター音が要因であるならば、静音性に優れた機体を使用し、機体そのものが要因であるなら機体の大きさ・形状・色を考慮する必要がある。ドローンのローター音が忌避要因であるのか明らかにするには、機体が鳥の視界に入らないようにし、ローター音のみを鳥に聞かせる必要がある。

最初に距離に応じた騒音の減衰を表す統計モデルを作成し、そのモデルによってガンカモ類の位置の騒音レベルを推定した。次に予め録音しておいたローター音をガンカモ類の群れに向かってオーディオで再生し、モデルによって推定された騒音レベルでの群れの反応を記録した。

距離に応じたローター音の理論値を推定するために、計測したローター音から減衰モデルを作成した。三脚に固定した騒音計を起点として、ドローン(DJI Phantom 4 Pro)を水平かつ直線的に150m(一部100m)まで遠ざけ、10m毎にホバリングさせてローター音を計測した(図(4)-4)。マルチローター型の機体は、各ローターの回転数を上下させることで姿勢や移動を制御するため、同じ距離でも風によってローター音が異なる可能性がある。そのため、微風時(平均風速0.2m/s)と強風時(平均風速2.9m/s)の2つの風況下で試験を行った。また、音の減衰は距離だけでなく地面の吸音による減衰もあり、吸音性は植生などの地面の状態によって異なる可能性がある。そのため、2つの風況下それぞれで、ガンカモ類の主な生息環境である水面と農地の2つの環境上空において試験を行った。加えて機体を10m毎にホバリングさせず、連続的に遠ざけながら1秒間隔で細かく騒音を計測する試験も行った。この試験は、微風時(平均風速0.2m/s)のみ行った。



図(4)-4 騒音減衰モデルを作成するための野外調査

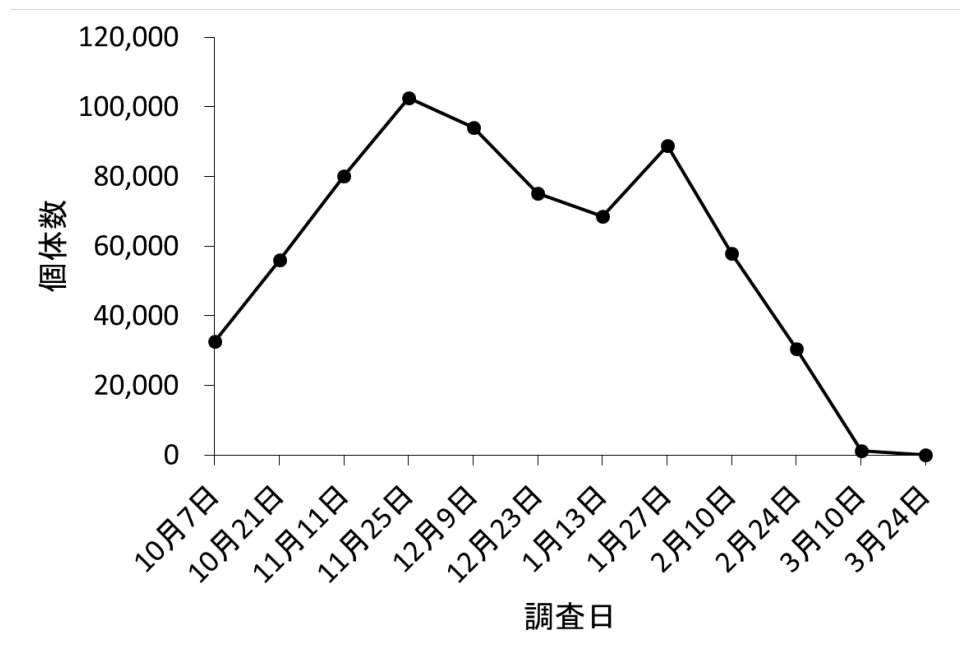
最後にそれらの結果をまとめてドローンを活用したガンカモ類調査ガイドラインを作成した。

4. 結果及び考察

(1) モニタリング対象となる生物種に関する情報収集

① マガンの個体数

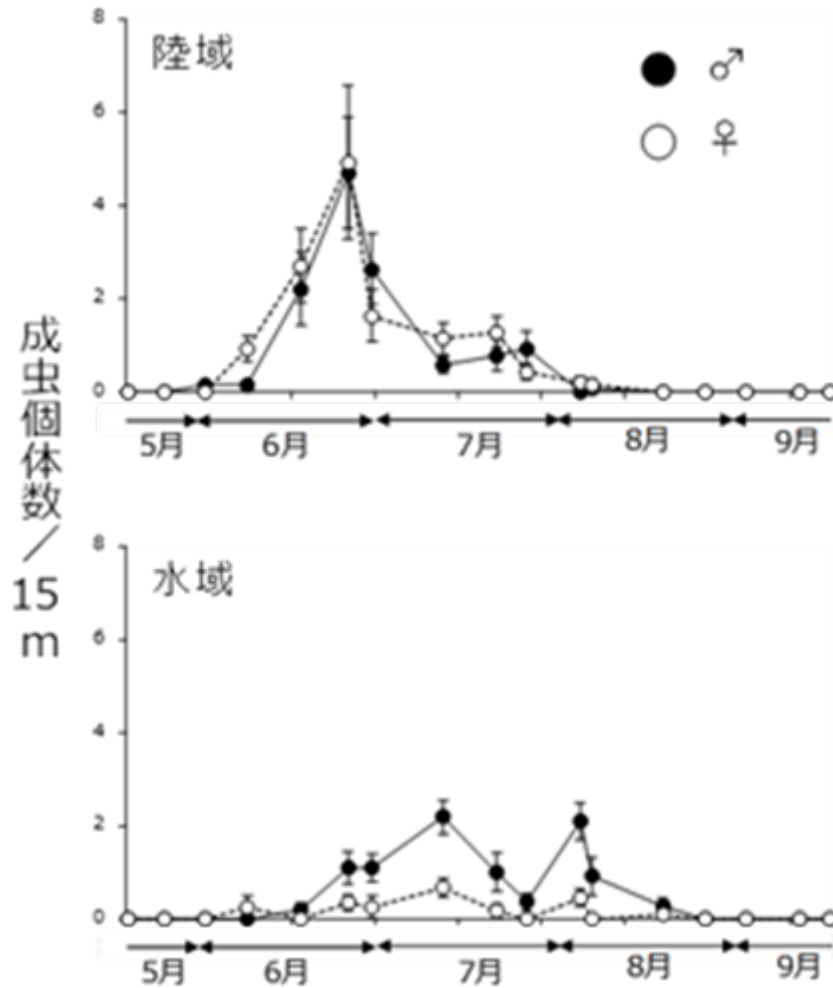
マガンは10月7日には32,545羽が記録され、それ以降個体数が増加した(図(4)-5)。11月25日には当季最多の102,464羽が記録され、その後1月下旬にかけて7万羽から10万羽の間で推移した。2月以降、春の渡りに伴って個体数が減少し、3月24日には36羽となった。気象条件によって春の渡りが早まったり、遅れたりする場合があるが、2016/17年のマガンの個体数変動は例年通りの変化を示した。このデータをもとにサブテーマ3のネットワークカメラの設置時期を検討した。



図(4)-5 マガンの個体数変化

② トンボ類の個体数

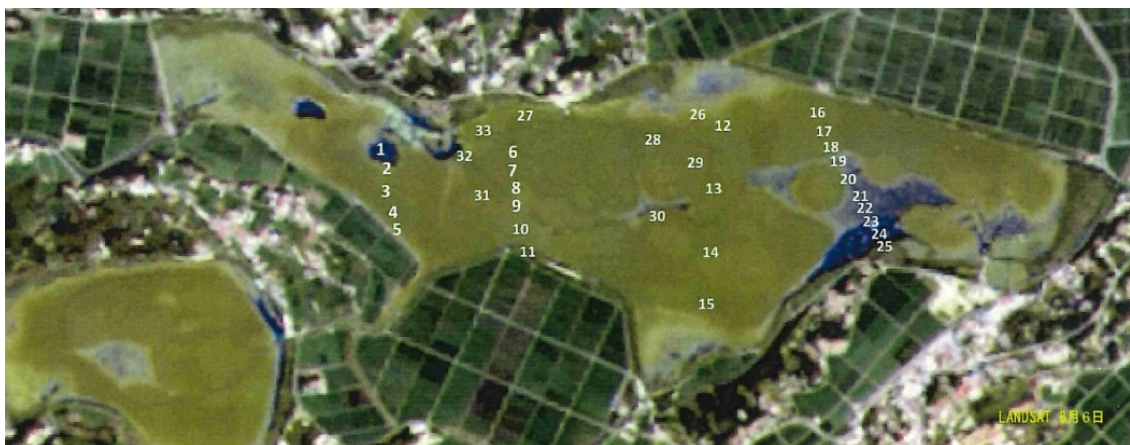
オオセスジイトンボ成虫は6月上旬から8月中旬にかけて確認された(図(4)-6)。陸域では6月上旬から8月上旬にかけて出現し、ピークは6月下旬であった。一方、水域では陸域に比べ約2週遅れて6月中旬から8月中旬にかけて出現し、7月上旬がピークであった。発生消長は陸域と水域で異なったが、これは水辺で羽化した成虫がまず陸域に移動し、性成熟後に水域へ移動したためと考えられる。このデータをもとにサブテーマ3のネットワークカメラの設置時期を検討した。



図(4)-6 オオセスジイトンボの個体数変化

③ ハスの分布

ハスの面積は329 haと算定され、伊豆沼・内沼の水面387 haの85%を占めた（図(4)-7）。伊豆沼・内沼では自然再生事業の一環でハスの刈払いが進められており、従来は船の推進力を利用した刈払い装置による有人の刈払いが行われてきたが、さらにロボットボートを導入することで課題解決の加速化と省力化が可能と考えられる。

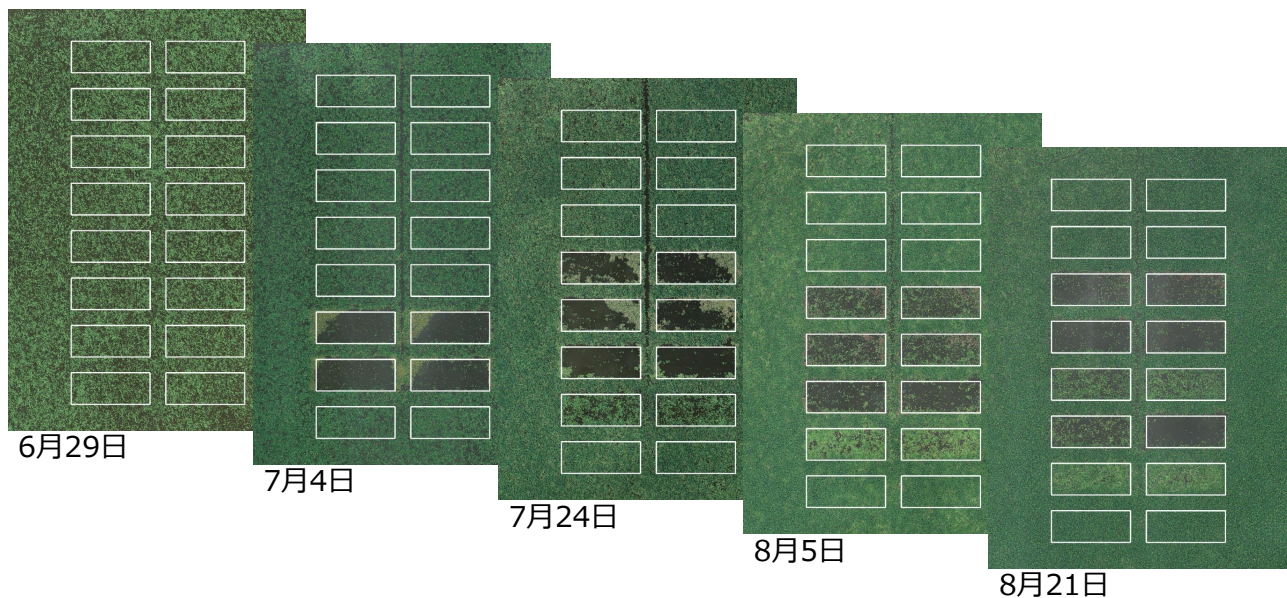


図(4)-7 伊豆沼・内沼におけるハスの分布

(2) 開発初期段階の試験におけるシステム運用に関する情報収集

他サブテーマの初期試験運用の結果を踏まえ、監視者・管理者の視点から以下の課題を提示した。ロボットボートは、ハス繁茂期における自律航行の安定性の検証、植物体の生残を考慮した実用的な刈払いの検討、ヒシ等のハス以外の植物管理への拡張活用の検討、障害物回避機能を追加する必要性の検討が必要と考えられた。ネットワークカメラについては、鳥類モニタリングカメラの動作安定性や画像処理プログラムの操作性の向上、マガン等のモニタリング対象動物の野外設置機器に対する忌避反応の低減、重複計数の解消の努力、自動計数と従来法による計数の比較検証の反復が必要と考えられた。ドローンによる生物相モニタリングについては、明暗など様々な条件下での種判別精度の検証、熱赤外センサを用いた調査技術の開発、ドローンで計測した個体数等の結果と従来法の結果の比較による確度検証が必要と考えられた。

ハス刈りロボットボートとネットワークカメラとシステムの正確性を担保するための検証用のデータの蓄積では、2018年のハス刈りロボットボートによる試験刈り取りにおいて、ドローンの定期空撮と画像のオルソ化によって試験区におけるハスの生育状況のモニタリングを行った(図(4)-8)。また、2018/19の冬期においてマガンのねぐら入り個体数を目視によって記録し、ネットワークカメラを用いたマガンカウントの結果と比較することで、ネットワークカメラの正確性を評価した。



図(4)-8 ドローンによる定期空撮とオルソ化によるハスの生育状況モニタリング

(3) ドローンによる監視が水鳥などの野生生物に及ぼす影響の評価

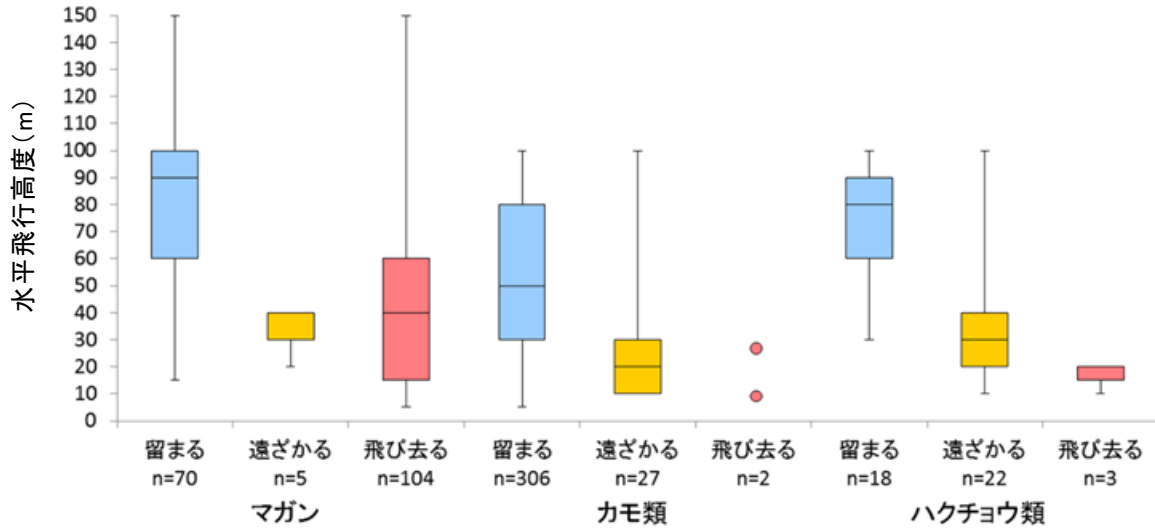
① 水平接近試験

水平接近試験の結果、マガンは高度15mでその場に留まった事例があった一方で、最高高度である150mで飛び去った事例もあった(図(4)-9)。また、飛び去る頻度はカモ類やハクチョウ類に比べて顕著に多かった。ただし、150mで飛び去ったのは陸上にいる群れであり、水面にいる群れについては、飛び去った最高高度は50mであった(図(4)-10)。離陸地距離と同様、環境によって群れの反応に違いがあり、陸上にいる群れのほうが警戒する傾向があった。

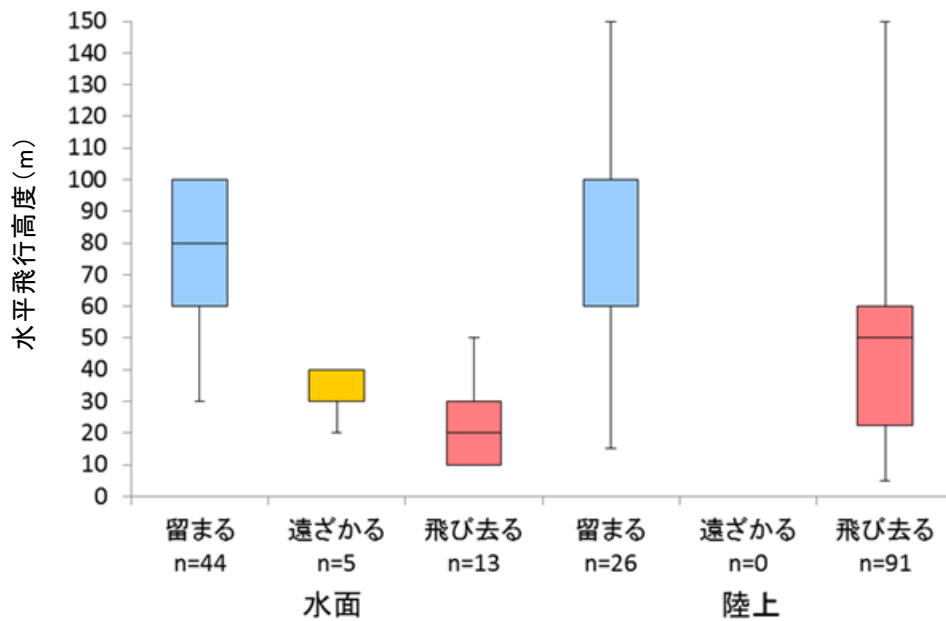
ドローンに搭載するカメラの仕様によって異なるが、高度150m以上からの撮影では多くの場合、マガンのような比較的大型の鳥であっても解像度の不足が生じる。したがって、陸上にいるマガンの群れを対象にする場合、逃避リスクにかかわらず実用可能な解像度が得られる高度で飛行させるか、もしくは焦点距離の長いカメラを搭載して150m以上の高空から撮影する必要があるだろう。

カモ類は、水面にいる群れのみを対象として試験した。その結果、10~100mの高度で機体から遠ざかる反応(警戒レベル2)が、10mおよび30mで飛び去る反応(警戒レベル3)が認められた。一方、全335

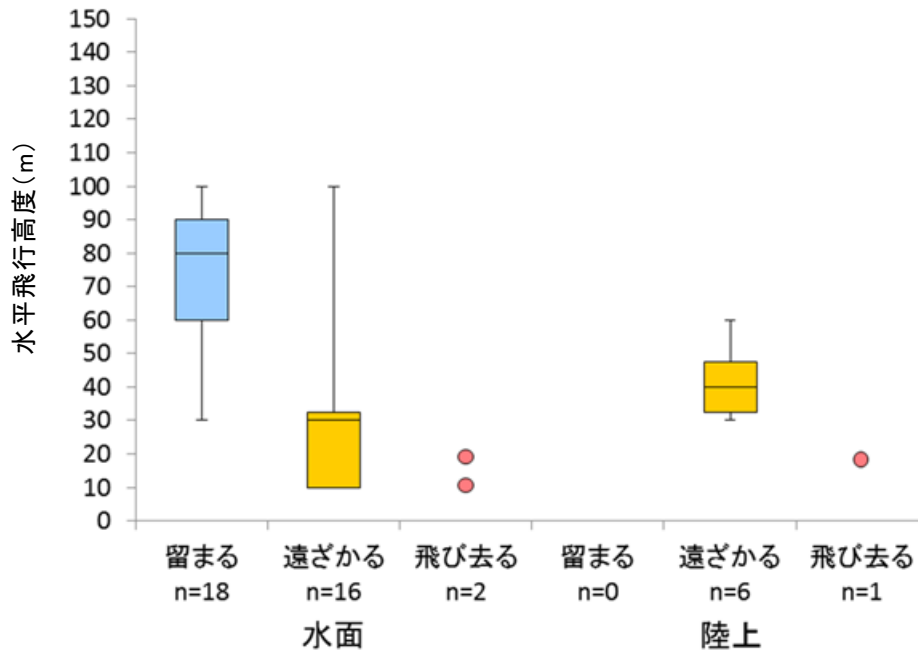
例中306例（91％）では、無反応または機体を凝視しただけでその場に留まった。ハクチョウ類は、10～100mの高度で機体から遠ざかる反応（警戒レベル2）が、10～20mの高度で飛び去る反応（警戒レベル3）が認められた。水面にいる群れ，陸上にいる群れのいずれも，飛び去った最高高度は20mであった（図(4)-11）。陸上にいる群れについては60m以上の高度では試験できていないものの，この試験では陸上が水面の中央値を上回った。マガンと同様，陸上にいる群れのほうが警戒する傾向があると考えられた。



図(4)-9 水平接近する機体に対するガンカモ類の反応



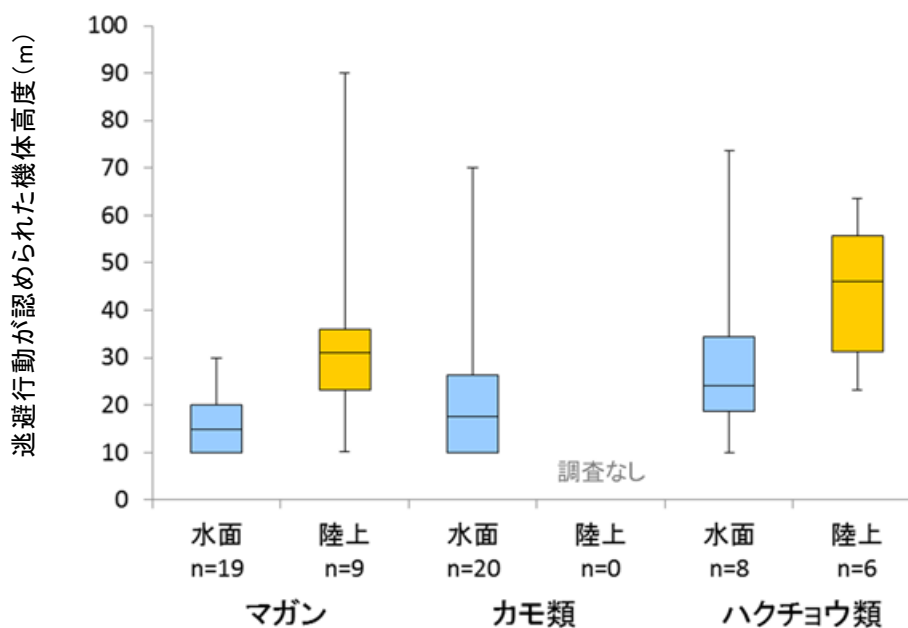
図(4)-10 水平接近する機体に対するガンカモ類の反応（マガン，環境別）



図(4)-11 水平接近する機体に対するガンカモ類の反応 (ハクチョウ類, 環境別)

② 垂直接近試験

マガンは、水面にいる群れでは30m以下の、陸上にいる群れでは90m以下の高度まで機体を降下させた時に逃避行動（警戒レベル2～3の反応）が認められた（図(4)-12）。カモ類は、70m以下の高度まで機体を降下させた時に逃避行動が認められた（カモ類は夜行性のため日中は水面にいることから、陸上にいる群れに対する試験を行えなかった）。ハクチョウ類は、水面にいる群れでは74m以下の、陸上にいる群れでは64m以下の高度まで機体を降下させた時に逃避行動が認められた。それぞれ、逃避行動が認められた最高高度が、垂直降下時の下限高度の目安となる。ハクチョウ類では、逃避行動が認められた高度の中央値は、水面24m、陸上46mで、陸上にいる群れが上回った。マガンとハクチョウ類において、水面にいる群れよりも陸上にいる群れのほうが逃避する傾向があることは水平接近試験の結果と同様であった。陸上は水鳥にとって水面よりも危険の多い場所であり、警戒心が強まるものと考えられる。



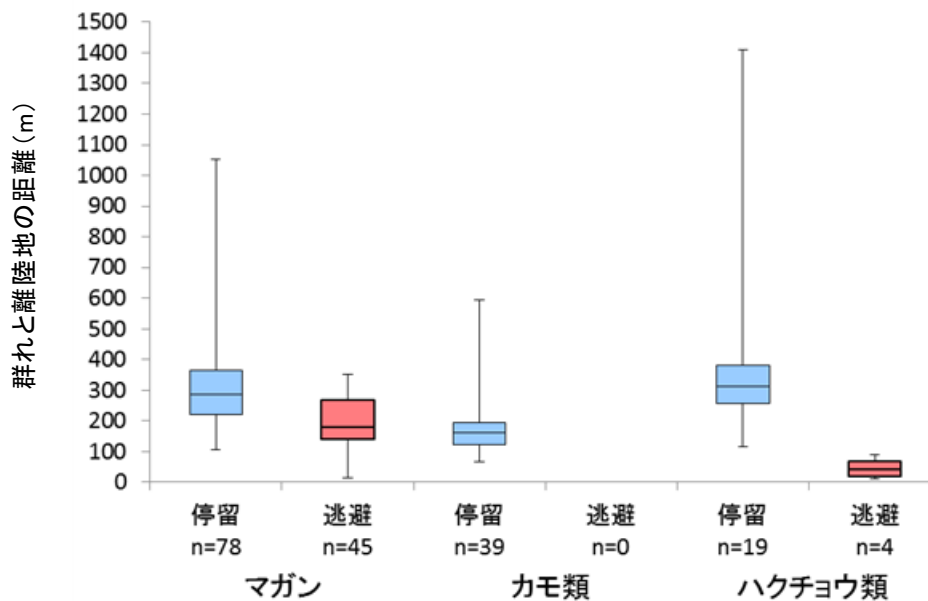
図(4)-12 垂直降下時に逃避行動が認められた機体高度

③ 離陸地の遠近に対するガンカモ類の反応調査

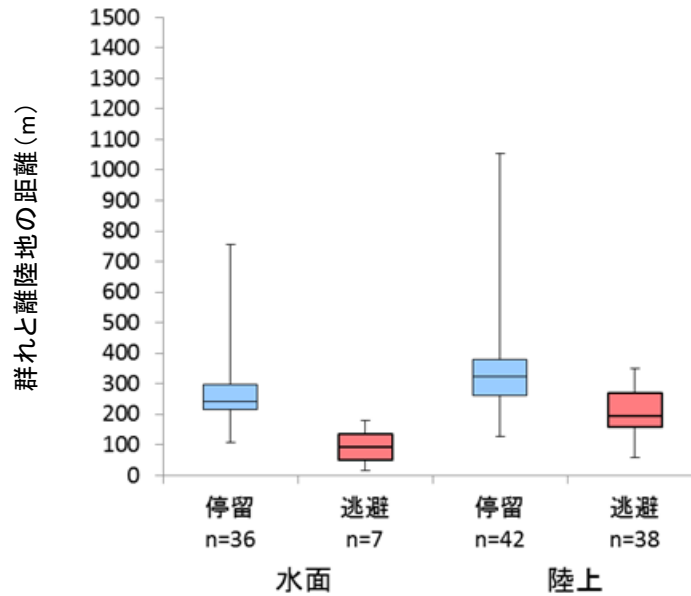
マガンは、15～1,054mの水平距離で試験した結果、距離15～350mで離陸させた時に逃避が認められ、距離106～1,054mで離陸させた時に停留した（図(4)-13）。さらに詳しく見ると、逃避が認められた離陸地距離は、水面にいる群れでは15～179mであったのに対し、陸上にいる群れでは59～350mであり、居場所によって群れの反応に違いがみられた（図(4)-14）。それに対して停留した離陸地距離は、水面にいる群れでは106～757mであり、陸上にいる群れでは125～1,054mであった。以上の結果から、水面にいる群れを対象とする場合は200m以上の距離を、陸上にいる群れを対象とする場合は400m以上の距離をとって離陸させることが望ましいと考えられる。最低でも100m以上の距離を確保すべきである。

カモ類は、65～593mの水平距離で試験した。その結果、逃避は一度も認められず、全て停留した。したがって、100m以上の距離をとれば群れを攪乱することなく離陸できるものと考えられる。

ハクチョウ類は、10～1,409mの水平距離で試験した結果、距離10～90mで離陸させた時に逃避が認められ、距離114～1,409mで離陸させた時に停留した。したがって、150m以上の距離をとれば群れを攪乱することなく離陸できるものと考えられる。



図(4)-13 離陸地距離とガンカモ類の反応の関係

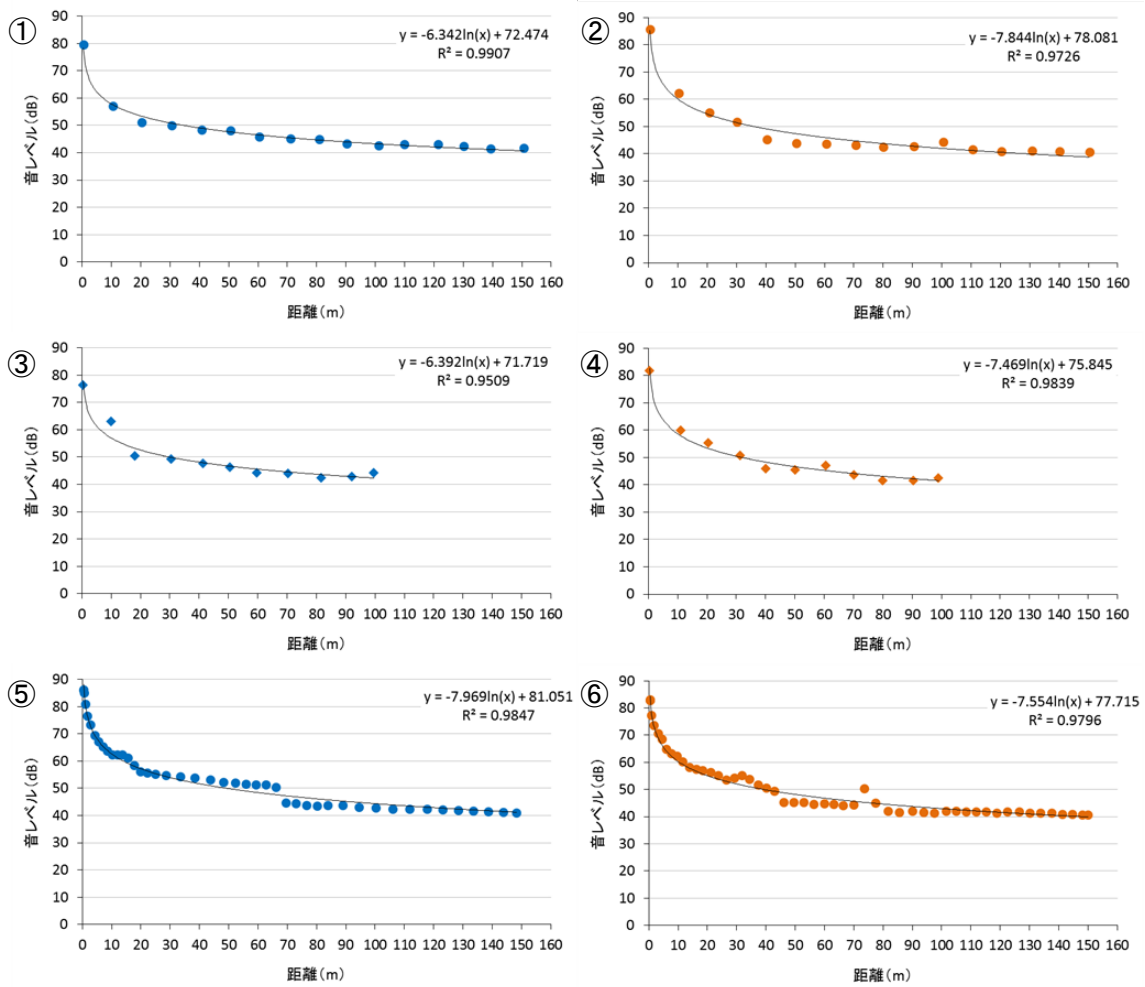


図(4)-14 離陸地距離とガンカモ類の反応の関係 (マガン, 環境別)

(4) ガンカモ類がドローンから逃避する要因

① 騒音減衰モデルの作成

ローター音はどの項目においても起点から30m程度離れるまでに大きく減衰し(約75%減衰), それ以降では緩やかに減衰した(図(4)-15)。対数近似によっていずれも適合度が良好で互いに近似したモデルが得られた。



図(4)-15 騒音減衰モデル

①微風下の水面上空, ②微風下の農地上空, ③強風下の水面上空, ④強風下の農地上空, ⑤微風下の水面上空, ⑥微風下の農地上空 (①~④: 10m毎に機体をホバリングさせて騒音を計測, ⑤~⑥: 連続的に機体を遠ざけながら騒音を計測)

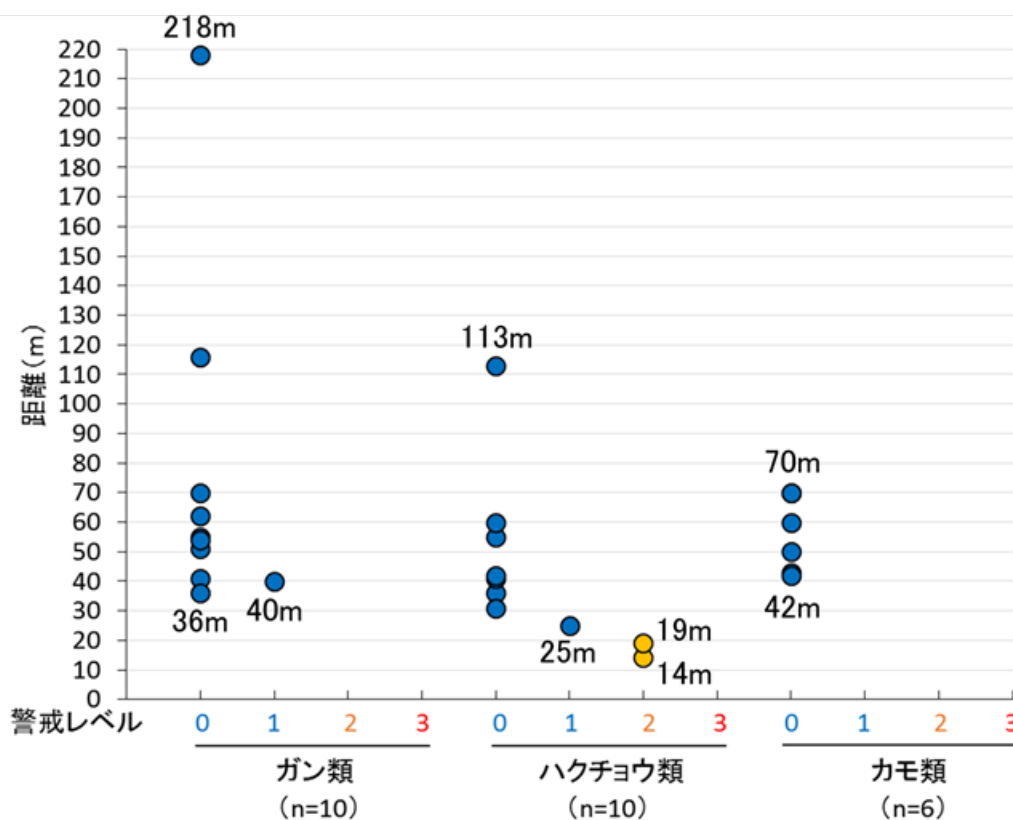
② ドローンのローター音に対するガンカモ類の反応

簡易ブラインドとして軽自動車に乗車して群れに接近し, 群れまでの距離をレーザーで計測したのち, スピーカーを手に持って予め録音しておいたローター音を群れに向かって再生した。この時, スピーカーから1m離れた地点の騒音レベルが, 水面にいる群れを対象にする場合は72dBに, 農地にいる群れを対象にする場合は78dBになるように音量を調節した。これらの値は, 騒音減衰モデルから算出した距離1mの騒音レベルである。あとは群れまでの距離に基づき, 群れの位置の騒音レベルを同じモデルから推定できる。騒音に対するガンカモ類の反応は, 4階級の警戒レベル(下記)に分けて記録した。警戒レベル0: 無反応, 警戒レベル1: 首をもたげる・音源を注視する, 警戒レベル2: 歩行または遊泳によって遠ざかる, 警戒レベル3: 飛び去る(警戒レベル2~3をまとめて逃避行動とした)。

・ガン類

農地にいるマガンの群れを対象とした(群れまでの距離36~218m, n=10)。その結果, 距離40mで首をもたげる行動(警戒レベル1)が1例認められた以外は全て無反応(警戒レベル0)であった(図(4)-16)。さらに近距離の調査も試みたが, 36m未満まで接近すると, ローター音を再生する前から逃避行動が認められ, 調査できなかった。前述の接近反応調査では, 水平接近試験において機体と群れの直線距離が11~326mの時に逃避行動が認められた。また, 垂直接近試験において90m以下の距離で逃避行動が認められ

た。したがって、少なくとも36m以上の距離で発せられる50dB（騒音減衰モデルの推定値）以下のローター音はほとんど忌避要因になっておらず、逃避行動は機体の接近という視覚的な刺激が主因となって生じたものと考えられる。



図(4)-16 録音・再生したローター音に対するガンカモ類の反応

・ハクチョウ類

農地にいるオオハクチョウの群れを対象とした（群れまでの距離14～113m, n=10）。その結果、距離25mで首をもたげる行動（警戒レベル1）が、距離14mと19mで歩行によって遠ざかる行動（警戒レベル2）が認められた。25m以上では、全て無反応（警戒レベル0）であった。接近反応調査では、垂直接近試験において64m以下の距離で逃避行動が認められた。なお、水平接近試験では、機体と群れの直線距離が得られたサンプルがなかった。したがって距離25～64mにおいては、実機では逃避行動が認められたのに対し、ローター音のみでは1例を除けば無反応であった。以上のことから、25m以上の距離で発せられる53dB（騒音減衰モデルの推定値）以下のローター音は忌避要因になっていないものと考えられる。一方、距離14～19m（57～55dB）においてはローター音のみでも逃避行動が認められたことから、騒音という聴覚的な刺激も近距離であると忌避要因になるものと考えられる。

・カモ類

水面にいるマガモおよびカルガモの群れを対象とした（群れまでの距離42～70m, n=6）。その結果、警戒行動（警戒レベル1）や逃避行動（警戒レベル2～3）は認められず、全て無反応（警戒レベル0）であった。接近反応調査では、水平接近実験において機体と群れの直線距離が10～50mの時に逃避行動が、垂直接近試験において70m以下の距離で逃避行動が認められた。したがって、少なくとも42m以上の距離で発せられる49dB（騒音減衰モデルの推定値）以下のローター音は忌避要因になっていないものと考えられる。

(5) ドローンを活用したガンカモ類調査ガイドラインの作成

下記構成によりドローンを活用したガンカモ類ガイドラインを作成した。

目次

1. はじめに
 - 1.1. 推進費事業の背景と目的
 - 1.2. 水鳥調査におけるUAVの有効性
2. UAV概論
 - 2.1. UAVの種類
 - 2.1.1. 回転翼UAV
 - 2.1.2. 固定翼ドローン
 - 2.2. UAVの飛行ルール
 - 2.2.1. 航空法における飛行の禁止空域
 - 2.2.2. 航空法における飛行の方法の制限
 - 2.2.3. その他の注意すべき事項, ルール等
 - 2.3. UAVのオペレーション
 - 2.3.1. UAVを安全に運用するために
 - 2.3.2. 飛行計画の策定
 - 2.3.3. 撮影目的
 - 2.4. 飛行の実施
3. UAVを活用した水鳥調査
 - 3.1. 鳥の群れと離陸地の距離の目安
 - 3.2. 水鳥のモニタリングに必要な画像の解像度
 - 3.2.1. 高度と画像範囲・解像度との関係
 - 3.3. マガンの撮影時におけるカメラ設定
 - 3.3.1. 薄暗い環境下における撮影方法
 - 3.3.2. カメラ設定の目安
 - 3.4. 鳥の行動への影響を最小化するための飛行高度の目安
 - 3.4.1. 水平接近実験
 - 3.4.2. 垂直接近実験
 - 3.5. 飛行高度目安 早見表
 - 3.6. ガンカモ類がドローンから逃避する要因
 - 3.6.1. 騒音減衰モデルの作成 33
 - 3.6.2. ドローンのローター音に対するガンカモ類の反応
 - 3.7. 熱赤外カメラの活用可能性
4. 画像解析による自動カウント
 - 4.1. マガンの自動カウントの概要
 - 4.2. マガン自動カウント・ソフトウェアについて
 - 4.3. 画像解析による自動カウントの課題と今後について
5. 付録
 - 5.1. ドローンの位置精度検証
 - 5.2. 水平位置精度の検証
 - 5.3. 垂直位置精度の検証
 - 5.4. ドローンのヒヤリハット事例

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

モニタリング対象生物の量的な情報を収集したことにより、ハス刈りロボットボートの活用範囲や作業効率、ネットワークカメラやドローンによる監視システムの有効性等の検証が可能となった。また、各種接近試験によりドローンに対するガンカモ類の忌避反応を明らかにし、その結果を踏まえて、離陸地から群れまでの距離、水平飛行高度及び垂直接近高度の目安を提示した。鳥類を対象としたドローンの接近試験としては、国内では過去最大規模の試験である。さらにドローンを活用したガンカモ類調査ガイドラインを発行し、ドローンを使ったガンカモ類モニタリング調査の指針を示した。

(2) 環境政策への貢献

ドローンの飛行に関する基本的なルールは既に国土交通省のガイドラインで定められているものの、個別分野の飛行方法については測量や映像制作等を除けば技術的な知見は乏しいのが現状であり、野生生物の分野もその例に漏れない。今回発行した、ドローンを活用したガンカモ類調査ガイドラインによって、省力的かつ効率的にガンカモ類のモニタリングをすることが可能となる上、今後環境省が野生生物を対象としたドローン利用に関して指導を行っていく上で科学的かつ数少ない知見として提示できるものと考えられる。

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

ラムサール条約湿地などガンカモ類が多く越冬する重要な湿地においてドローンを用いたモニタリングをする際に、今回発行したガイドラインを配布することで、ガンカモ類へ影響を与えずに省力的かつ効率的に調査することが可能となる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 嶋田哲郎, 神山和夫, 森 晃, 藤本泰文: 日鳥学誌, 65, 161-166 (2016), UAVを用いたマガンねぐらの環境収容力の推定
- 2) 藤本泰文・山田浩之・倉谷忠禎・嶋田哲郎: 応用生態工学, 21, 171-179 (2018), 全周魚眼スマートフォンカメラを用いた水生生物の遠隔モニタリング
- 3) 高橋佑亮・藤本泰文: 伊豆沼研報, 12, 17-25 (2018) 2007年の航空写真より計測した伊豆沼・内沼の水面形状および面積
- 4) 藤本泰文: 応用生態工学, 21, 37-43 (2018) 葉柄の刈払いがハス *Nelumbo nucifera* の枯死に及ぼす影響

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) NPO法人バードリサーチ ニュースレターWeb版: ガンカモがドローンを警戒する距離はどのくらい? 接近実験をしています (2017年12月18日)

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 嶋田哲郎・神山和夫・森 晃・藤本泰文, 日本鳥学会2016年度大会 (2016)
UAVを用いたマガンねぐらの環境収容力の推定

- 2) 高橋佑亮・神山和夫・牛山克己・嶋田哲郎, 第11回伊豆沼・内沼研究集会 (2017)
ドローンの接近に対するガンカモ類の反応
- 3) 山田浩之・横山 諒・牛山克己・嶋田哲郎, 日本湿地学会第9回大会 (2017) 全天空遠隔監視システムと画像解析を用いたマガン飛来数のモニタリング
- 4) 山田浩之・安部晋吾・上田紘司・嶋田哲郎, ELR (応用生態工学会ほか3学会合同大会) 名古屋大会 (2017) 自動撮影全周魚眼カメラを用いたトンボ類の遠隔モニタリング
- 5) 藤本泰文・山田浩之・嶋田哲郎, ELR (応用生態工学会ほか3学会合同大会) 名古屋大会 (2017) 全周魚眼スマートフォンカメラを用いた水生生物の遠隔モニタリング
- 6) 高橋佑亮・鈴木透・嶋田哲郎, 第13回伊豆沼・内沼研究集会 (2018) ガンカモ類がドローンから逃避する要因 ローター音を忌避しているのか?

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 第11回伊豆沼・内沼研究集会「環境研究総合推進費 推進課題 1-1602フィールド調査とロボット・センサ・通信技術をシームレスに連結する水域生態系モニタリングシステムの開発特集」(主催:(公財)宮城県伊豆沼・内沼環境保全財団, 2017年2月18日, 宮城県伊豆沼・内沼サンクチュアリセンター, 観客54名)にて成果紹介
- 2) 嶋田哲郎, 東北環境アセスメント協会技術講習会(東北環境アセスメント協会主催, 2017年6月14日, 宮城県仙台市, 参加者70名)における基調講演「生物モニタリングにおけるドローンの活用とその運用方法」
- 3) 神山和夫, 自然環境分野でのドローン活用セミナー(主催:(株)アマナビ・(株)アマナ, 2017年7月23日, 東京都港区アマナ海岸スタジオ, 参加者50名)における基調講演「鳥類調査におけるドローンの活用事例」
- 4) 海津 裕・小川健太・山田浩之・嶋田哲郎, 平成29年度伊豆沼・内沼自然再生協議会及びラムサールトライアングル関係者現地視察(宮城県主催, 2017年8月29日, 宮城県栗原市内沼及びサンクチュアリセンターつきだて館, 60名参加)にて公開デモンストレーションを実施
- 5) 嶋田哲郎・海津 裕・遊佐 健・松田亜希子・山田浩之, 日本鳥学会2017年度大会(2017年9月16日, 茨城県つくば市筑波大学, 40名参加)にて自由集会「ロボットやネットワークカメラ, ドローンを活用した湿地生態系の監視・管理システムの構築」を実施
- 6) 山田浩之・海津 裕・遊佐 健・鈴木 透・高橋佑亮・横山 諒, ELR2017(日本緑化工学会・日本景観生態学会・応用生態工学会主催, 2017年9月22日, 愛知県名古屋市名古屋大学, 50名参加)にて研究集会「ロボット・UAV・ネットワークカメラを用いた湿地生態系の監視と管理」を実施
- 7) 嶋田哲郎, 自然再生協議会全国会議(主催:環境省, 2017年11月1~2日, 宮城県伊豆沼・内沼, 80名参加)における特別講演で本プロジェクトを紹介
- 8) 嶋田哲郎, 高橋佑亮, 神山和夫, 牛山克己, バードリサーチ設立15周年記念大会(主催:特定非営利活動法人バードリサーチ, 2018年10月27日, 80名参加)における講演でドローンの接近に対するガンカモ類の反応について発表

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 毎日新聞(2016年7月7日, 県内版, 「伊豆沼のハス刈り払い」)
- 2) 河北新報(2016年7月7日, 県内版, 「伊豆沼・内沼ハス刈り払い開始」)
- 3) NHK仙台放送局(2016年7月8日, 「ハス刈り払いの取り組みについて紹介」)
- 4) TBC東北放送(2016年7月12日, 「ハス刈り払いの取り組みについて紹介」)

- 5) 宮城テレビ (2016年7月15日, 「ハス刈り払いの取り組みについて紹介」)
- 6) KHB東日本放送 (2016年7月21日, 「ハス刈り払いの取り組みについて紹介」)
- 7) 朝日新聞 (2017年6月7日, 県内版, 「ハス刈り, ロボット船が助っ人 伊豆沼などで実験」)
- 8) 河北新報 (2017年8月30日, 県内版, 「伊豆沼・内沼 最新機器が生態系守る 東大開発の無人ボートで水草刈り」)
- 9) 毎日新聞 (2017年9月6日, 県内版, 「伊豆沼・内沼 無人小舟などで湖沼湿地の環境保全めざす」)
- 10) 河北新報 (2017年11月3日, 県内版, 「環境保全の最新成果を報告 自然再生協全国会議 宮城・栗原でロボットボート見学」)
- 11) 毎日新聞 (2019年2月22日, 県内版, 「生態調査・保全に新技術」)

(6) その他

優秀賞, ELR (応用生態工学会ほか3学会合同大会) 名古屋大会, 2017年9月25日, 藤本泰文・山田浩之・嶋田哲郎, 全周魚眼スマートフォンカメラを用いた水生生物の遠隔モニタリング.

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

III. 英文Abstract

Development of Aquatic Ecosystems Monitoring System that Seamlessly Connects Field Investigation and Robot, Sensor and Communication Technology

Principal Investigator: Yutaka KAIZU

Institution: The University of Tokyo
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657 JAPAN
Tel: +81-3-5841-5360 / Fax: +81-3-5841-8173
E-mail: yuta_kaizu@yahoo.co.jp

Cooperated by: Rakuno Gakuen University, Hokkaido University, The Miyagi Prefectural Izunuma-Uchinuma Environmental Foundation

[Abstract]

Key Words: drone, remote sensing, water fowl, aquatic plant, network camera, guideline

The purpose of this research is to promote the conservation and restoration of wetland environment and to connect field research and the latest technology seamlessly. Therefore, we developed monitoring and management methods to realize cost reduction and efficiency improvement using drones, robot boats, and surveillance cameras. In addition, guidelines and manuals were created to realize safe and simple monitoring and management. Such measures will make it easier to deploy monitoring in wetlands across the country, and we believe that these measures can contribute to the promotion of conservation and restoration activities.

This research is divided into four sub-themes. In the first sub-theme, we applied the latest robot and information communication technology and developed a robot boat for mowing aquatic plants. Field workers will find this boat easy to handle. The effectiveness of the automatic management of water plants by using the developed robot boat was verified. Results indicated that the robot boat was effective for mowing lotus.

In the second sub-theme, we developed and verified an efficient monitoring system using drones for water birds and vegetation surrounding around their habitat. We examined the most suitable drone imaging method to measure the number of waterfowl and to identify the species efficiently. We also developed an algorithm to automatically measure the number of water birds from images obtained by a drone.

The purpose of the third sub-theme is to develop a monitoring system for waterfowl, insects, and aquatic organisms that are representative of wetlands. In this system, a high-resolution-network type all-around fisheye camera is used, and performing automatic measurement of the number of individuals by means of image processing is possible. By using the latest image sensor and communication module, we developed a small, low-cost, durable, highly usable system.

In sub -theme 4, the environmental information that contributes to the construction of each system (developed in sub-themes 1 to 3) was collected. We also collected information on system operation in tests of the early stages of development of lotus-cutting robot boats and network cameras. Furthermore, we evaluated the impact of drone surveillance on wildlife species such as the waterfowl. Based on the results, a proposal with regard to “the research guideline of goose and duck using drone” was made.