Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費　終了研究成果報告書

地上・リモートセンシングによる
尾瀬ヶ原湿原におけるシカ個体数推定手法の開発
(4-1706)

平成29年度～令和元年度

Development on Methods for Estimating Population Size of Deer
with Ground and Remote Sensing Techniques

〈研究代表機関〉
東京大学

〈研究分担機関〉
福島大学
株式会社野生動物保護管理事務所
京都先端科学大学

令和 2年 5月

目次

Ⅰ．成果の概要 ・・・・・・・・ 1
１．はじめに（研究背景等）
２．研究開発目的
３．研究開発の方法
４．結果及び考察
５．本研究により得られた主な成果
６．研究成果の主な発表状況
７．研究者略歴

Ⅱ．成果の詳細
Ⅱ－１　複数マイクロフォンによるシカ個体数推定手法の開発 ・・・・・・・・ 19
（東京大学、京都先端科学大学）
要旨
１．はじめに
２．研究開発目的
３．研究開発方法
４．結果及び考察
５．本研究により得られた成果
６．国際共同研究等の状況
７．研究成果の発表状況
８．引用文献

Ⅱ－２　リモートセンシング画像によるシカ個体数推定手法の開発 ・・・・・・・・ 32
（福島大学）
要旨
１．はじめに
２．研究開発目的
３．研究開発方法
４．結果及び考察
５．本研究により得られた成果
６．国際共同研究等の状況
７．研究成果の発表状況
８．引用文献

Ⅱ－３　従来手法による個体数推定とオス個体の行動圏に含まれるシカ個体数の推定・・・・・・・・ 46
（株式会社野生動物保護管理事務所）
要旨
１．はじめに
２．研究開発目的
３．研究開発方法

４．結果及び考察
５．本研究により得られた成果
６．国際共同研究等の状況
７．研究成果の発表状況
８．引用文献

Ⅲ．英文Abstract ・・・・・・・・ 61

Ⅰ．成果の概要

課題名　　4-1706
　　地上・リモートセンシングによる尾瀬ヶ原湿原におけるシカ個体数推定手法の開発
課題代表者名　沖　一雄　（東京大学生産技術研究所　特任教授）
研究実施期間　平成29年度～令和元年度
研究経費（累計額）　90,693千円
　　（平成29年度：30,744千円、平成30年度：29,206千円、令和元年度：30,743千円）

本研究のキーワード　シカの鳴き声、マイクロフォン、ドローン、熱赤外センサ、GPS首輪

研究体制
（１）複数マイクロフォンによるシカ個体数推定手法の開発（東京大学、京都先端科学大学）
（２）リモートセンシング画像によるシカ個体数推定手法の開発（福島大学）
（３）従来手法による個体数推定とオス個体の行動圏に含まれるシカ個体数の推定
　　（株式会社野生動物保護管理事務所）

１．はじめに（研究背景等）

尾瀬ヶ原・尾瀬沼は日本最大の山岳湿原として知られており、湿原が形成されてから1000年以上の年月が経過しているといわれている。尾瀬には貴重な植物群落が生育し平成17年にはラムサール条約登録湿地に登録されている。また、5～7月の湿原植物の開花時期をピークに年間30～40万人の観光客が訪れるなど、人々に幅広くその自然環境・植生の価値が認められている。一方で、1990年代半ばからシカが確認されるようになり、自然植生へのシカによる影響が顕在化し生態系への不可逆的な影響が懸念されている。

これまで尾瀬のシカの生息数に関する指標として、主にはライトセンサス調査による目撃数の変化が使われてきた。しかし、ライトセンサス調査はその日の気象条件やシカの動きに強く影響を受けるため、データの観測誤差が大きくなる問題がある。その他、シカの生息密度の指標として、自動撮影カメラの撮影頻度とGPS首輪から得られた移動速度を元に推定する手法があるが労力がかかる。また、糞塊調査、糞粒調査、区画法などもあるが、これらの手法は尾根や山の中を歩き回りシカやその痕跡を探すという手法であり、人による踏査が難しく湿地帯である尾瀬のような湿原には適さない。

現在、尾瀬の湿原内外において、シカの捕獲が実施されているが、尾瀬の植生被害を低減させるために必要な捕獲数は設定されずに捕獲が行われている。このことから、尾瀬のような人のアプローチが難しい場所で行える密度調査手法が求められている。

２．研究開発目的

本研究は、日本最大の山岳湿原として知られている尾瀬ヶ原・尾瀬沼において、マイクロフォン地上センサとUAV（無人飛行体）・衛星リモートセンシングによりシカの個体数を評価する手法開発を実施する。具体的には、（1）マイクロフォンによるシカ個体数推定手法の精度、（2）リモートセンシングによるシカ個体数推定手法の精度、（3）マイクロフォンとリモートセンシングの組み合わせによるシカ個体数推定手法の精度、を比較検討し、最終的に人のアプローチによる調査が難しい湿原域におけるシカ個体数推定手法の提案を行う。本研究の目標を達成するために、3つのサブテーマを実施する。サブテーマ（1）では、湿原に設置された複数（3か所以上）のマイクロフォンで同時に観測されたシカの鳴き声（繁殖期の オスジカの“フィーヨフィーヨ”と威嚇するときの“ピャッ”という鳴き声）からどこにシカ が何頭いるかを評価する技術を、数理学的手法を用いて確立する。サブテーマ（2）では、衛星リモートセンシング画像から、湿原全域の植生のダメージを評価し、シカの生息域を把握し、その後、可視・近赤外搭載 UAVより、より詳細な植生評価を実施する。さらに、熱赤外カメラ搭載UAVより、夜間に湿原域 に現れるシカを把握し、個体数を把握する手法を確立する。サブテーマ（3）では、サブテーマ（1）とサブテーマ（2）のモデル作成の参照データ及び検証データ用のための従来手法による個体数の把握を試みる。

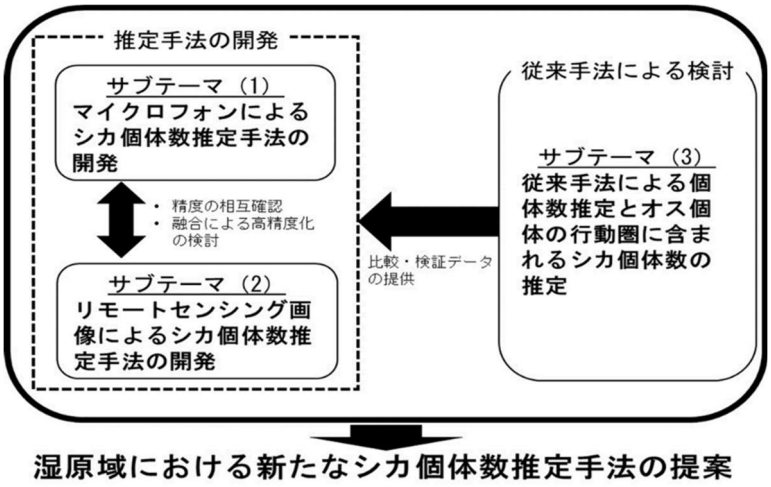


図2.0.1　研究の全体概要図

３．研究開発の方法

（１）複数マイクロフォンによるシカ個体数推定手法の開発

サブテーマ（1）では、湿原に設置された複数（3か所以上）のマイクロフォンで同時に観測されたシカの鳴き声（繁殖期のオスジカの“フィーヨフィーヨ”と威嚇するときの“ピャッ”という鳴き声）からどこにシカが何頭いるかを評価する技術を数理学的アプローチにより確立する。さらに、サブテーマ（2）　とサブテーマ　（3）　と連携し、シカ個体数推定手法の精度を比較検討し、最終的に湿原域における複数マイクロフォンによるシカ個体数推定手法の提案をおこなう、

まず、マイクロフォンを尾瀬の山中に複数本設置し、その中で同一のシカの鳴き声が検出された録音データから、検出された時間差を元にシカが鳴いた位置を推定する手法開発を行った。図3.1.1に提案手法の音声処理の流れを示す。音声処理は、各音源に適用する前処理と、3音源をベースにする位置推定処理の段階を経る。

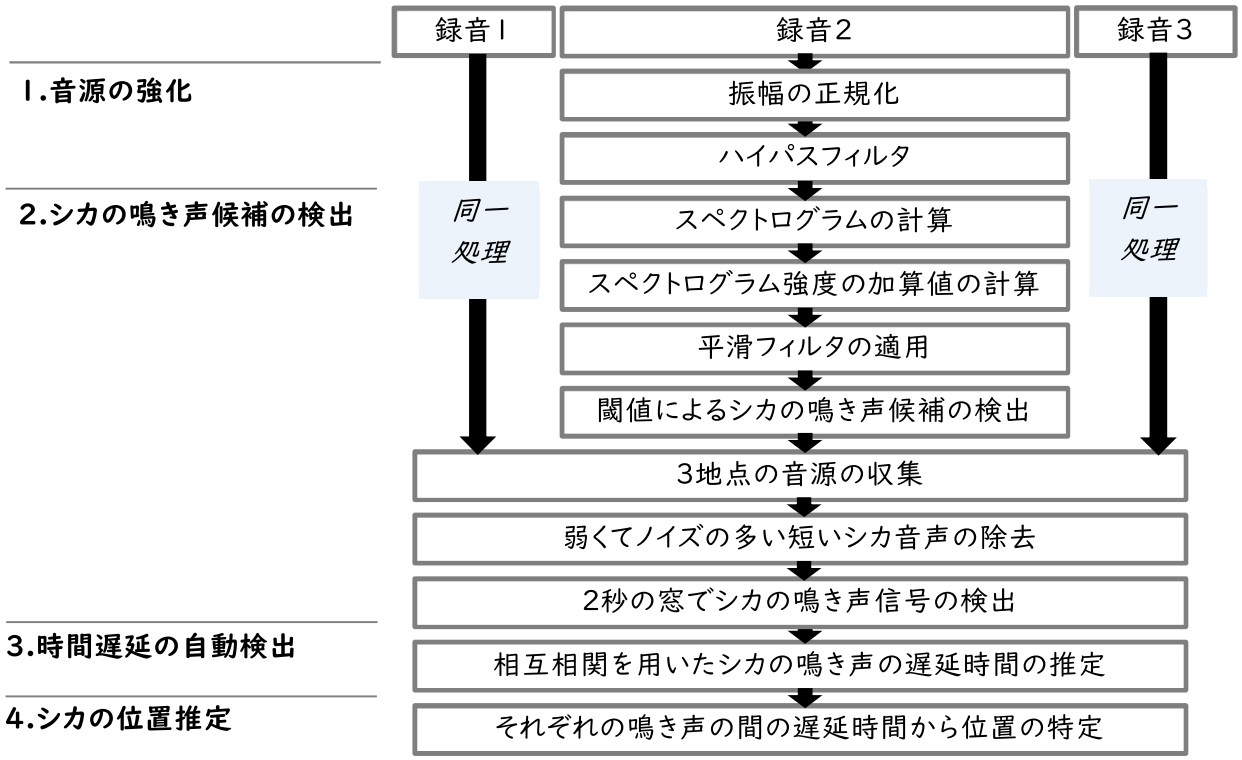


図3.1.1 複数音源によるシカの位置推定手法の音声処理の流れ

次に、開発された雄ジカの位置推定手法の結果をもとに、サブテーマ（3）の自動撮影カメラの観測範囲で得られた雄ジカの頭数および雄ジカに対する雌ジカと当歳の数の比率を用いて（湿原＋周辺森林域）のシカの生息数推定を試みた。

（２）リモートセンシング画像によるシカ個体数推定手法の開発

サブテーマ（2）では、最終的にUAV（ドローン）に搭載した各種カメラで得られたリモートセンシング画像を用いたシカ個体数推定手法の開発のため、効果的な飛行経路の設計や用いる機体の選定、撮影画像の処理方法について検討した。さらに、解析補助データとしての利用を考えている昼間の植生被害域推定用の画像の取得方法についても検討した。

具体的に、平成29年度ドローンの離発着可能な場所の確認や、対象領域内の植生の把握のため、初年度の７月にサブグループ（1）、（3）と共同で現地の下見を行った。その結果をもとに、ドローンを用いた夜間の試験飛行を10月に実施した。この空撮はシカ頭数が少ない時期であったため、さらに、機器のトラブルのため、撮影方法の検討のために必要なシカのサンプル画像を十分に撮影できなかった。そのため、3月に宮城県石巻市の金華山に生息するシカを対象に、熱赤外カメラの撮影高度の検討のための現地調査を追加で実施した。

平成30年度は、前年度に検討した飛行高度によって尾瀬ヶ原を効率的に撮影するための飛行経路の設計のため、6月と7月、10月に現地での夜間の空撮を実施した。さらに、効率的な空撮のための機体（回転翼、固定翼）や用いるサーモカメラのレンズの焦点距離についても検討した。また、昨年度同様、3月に宮城県石巻市の金華山に生息するシカを対象に、夜間のシカの熱画像のサンプルを増やすための夜間空撮を追加で実施した。そして、これらによって得られた夜間の熱画像を用いて、深層学習によるシカの自動抽出方法について検討を始めた。

令和1年度は、過去2年間に得られた知見をもとに、複数のドローンを用いた夜間の空撮を5月と8月、9月に実施した。なお、8月の空撮は、個体数の推定だけでなく、尾瀬ヶ原での従来法であるライトセンサスとの比較も目的に実施した。これらによって得られたデータを用いて、サーモカメラを搭載したドローンによる夜間の空撮の有効性について検討した。さらに、マルチスペクトルカメラを搭載したドローンによる昼間の空撮も実施し、シカの食害の程度を把握の可否について検討した。

（３）従来手法による個体数推定とオス個体の行動圏に含まれるシカ個体数の推定

オス個体にGPS首輪を装着するために、麻酔銃を用いて捕獲を行った。GPS首輪はイリジウム通信機能を装備しており、1時間に一度測位した位置情報が定期的に送信される仕組みとなっている。また、首輪にはビデオカメラが内蔵されており、動画は2時間おきに15秒撮影されるように設定した。

個体数を推定するために、自動撮影カメラ調査を行った。カメラは33台設置し、センサに動物が反応すると静止画を3枚撮影し、その後動画を20秒撮影するように設定した。

自動撮影カメラから得られる情報と、GPS首輪から得られる移動速度を元に対象範囲内の個体数を推定した。推定方法はRowcliffe et al.（2008）を用いた。

4．結果及び考察

（1）複数マイクロフォンによるシカ個体数推定手法の開発

2018 年 9 月 14 日に人工的にシカの鳴声をつくれる笛を用いて、尾瀬の森林内に設置した 3 つのマイクロフォンから位置を推定した本手法の精度評価結果を図 4.1.1 に示す。

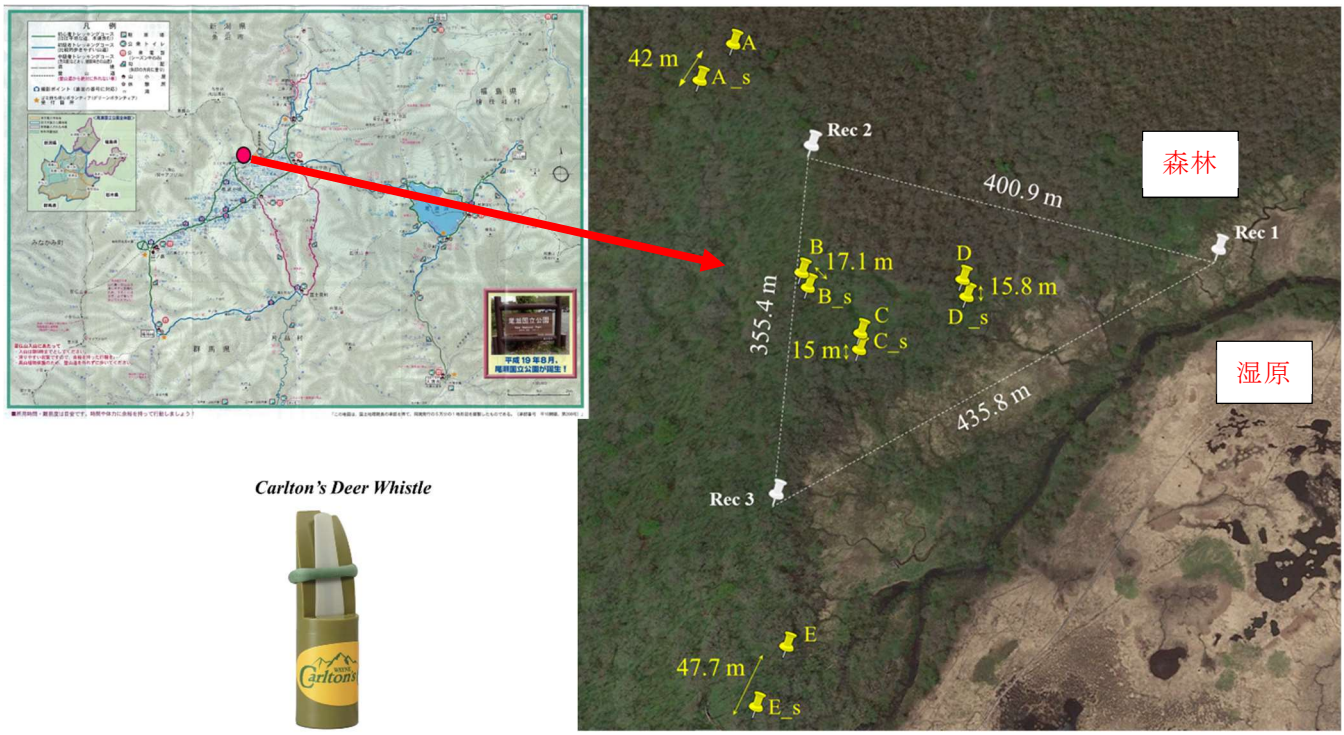


図 4.1.1　人工的にシカの鳴声をつくれる笛を用いた本手法の精度評価結果

図 4.1.1 より本手法は数十メートルの誤差を生んでいる。特に 3 つのマイクロフォンの外側の精度が悪いことが分かったが、本研究では野外で動物の位置を特定するには十分であると考えた初年度、2 年目の研究目標を達成)。

最終年度の目標を達成するために、2019 年 9 月 26 日～28 日にかけて、湿原域に覆うように配置した 7 本のマイクロフォンで記録された音声データを元に、提案アルゴリズムを用いてシカの鳴き声の位置を推定した。4 日分の推定位置を加算的に表示して、その分布を可視化する。図 4.1.2 にその結果を示す。

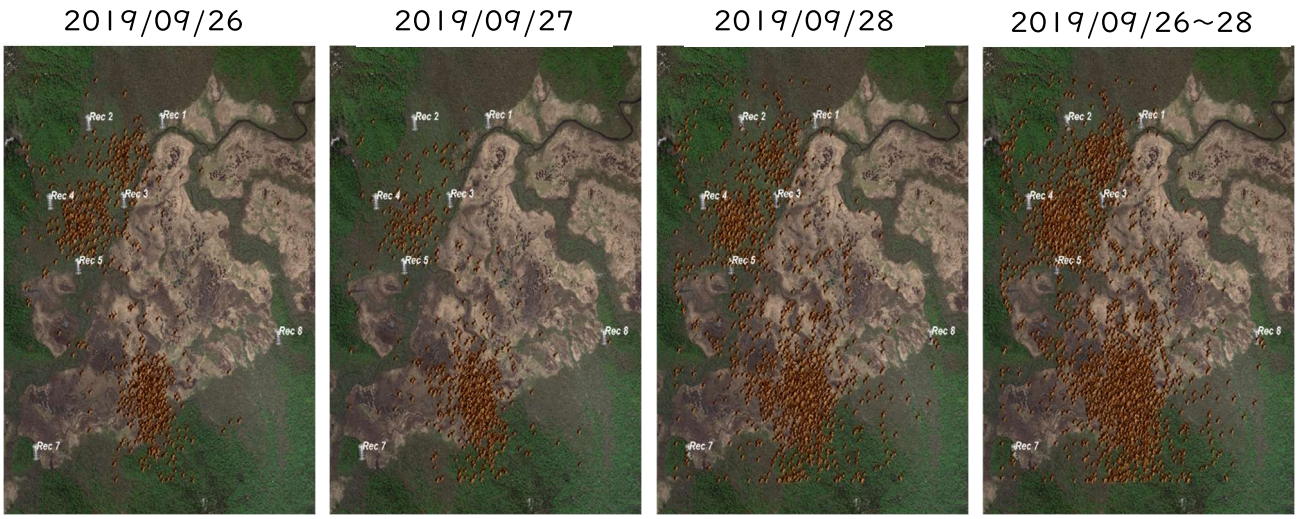


図 4.1.2 シカの鳴き声の位置を推定した結果

最終年度では、湿原域全体において複数(7本)のマイクロフォンからの録音データに基づいて音源位置を推定する方法を2年目までに得られた成果をもとに試みた。自然環境下特有のノイズが多いことと、長距離のマイクロフォン間距離という特殊なセッティングに最適化するために、フィルタリングの最適化を行い、ノイズや音量の変化にロバストな時間差を元に最適化計算によりリアルタイムに雄ジカの鳴いた位置を推定できる手法を開発した。推定される位置精度は数十メートルであるが尾瀬のような広域ではこの精度でも有効であると考えられる。

また、録音したシカ音声データを元に山中でのシカの生態をリアルタイムに可視化することに成功した。シカの生態を把握するためには大変有効であるといえる。

次に開発された雄ジカの位置推定手法とサブテーマ（3）の自動撮影カメラの観測範囲で得られた雄ジカの頭数および雄ジカに対する雌ジカと当歳の数の比率を用いて尾瀬全域のシカの生息数を推定した。

図4.1.5にサブテーマ（3）の 図4.3.5において設置された自動撮影カメラで観測された範囲内で、2019年9月26日～28日における本手法による雄ジカの鳴き声位置の推定結果とこの期間の1日ごとのシカの鳴き声頻度の結果を示した。

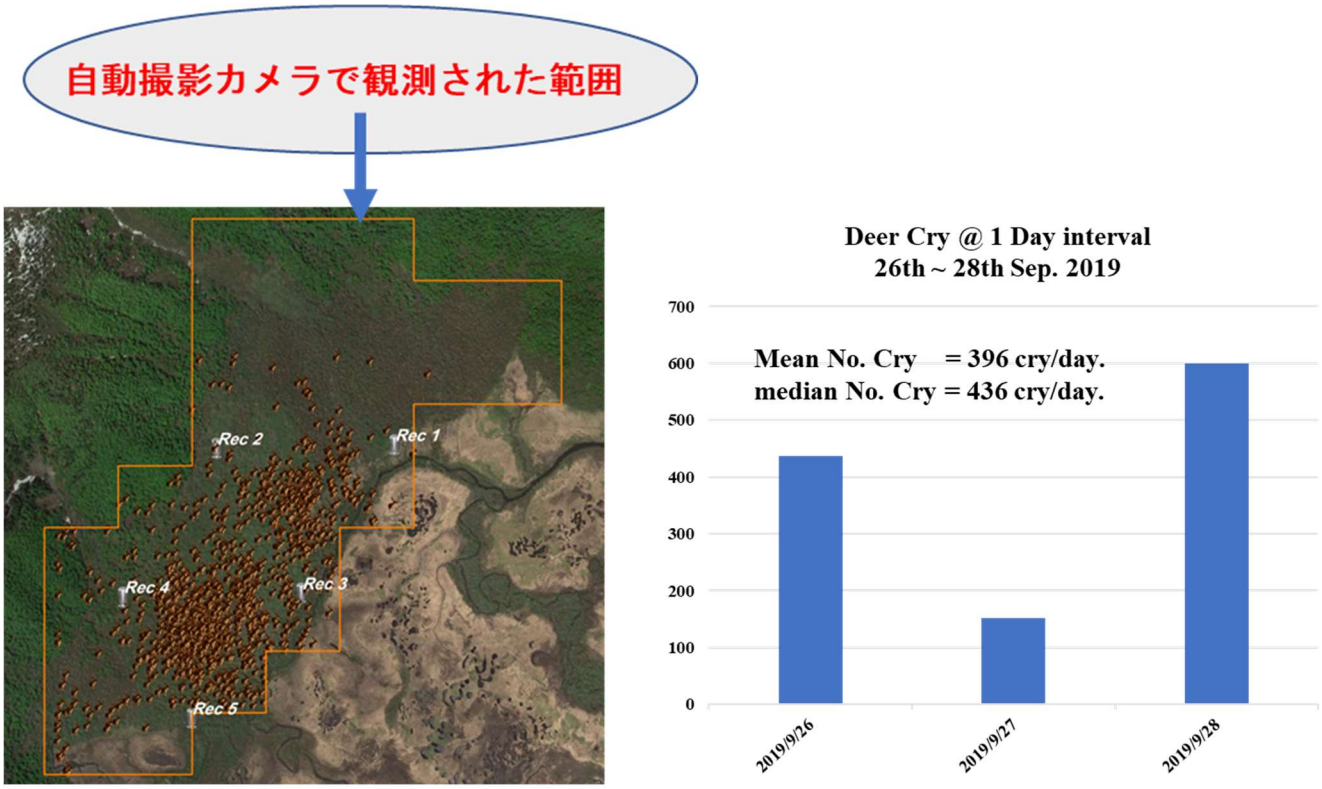
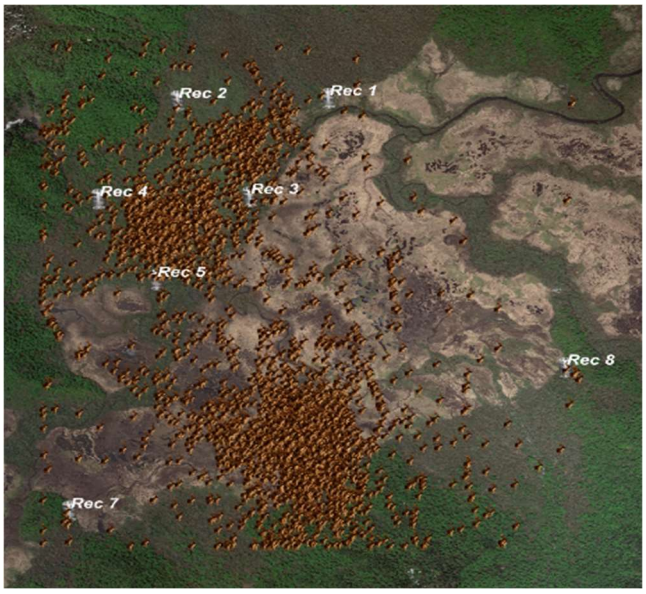


図4.1.5　自動撮影カメラで観測された範囲内で、2019年9月26日～28日における本手法による雄ジカの鳴き声位置の推定結果とこの期間の1日ごとのシカの鳴き声頻度の結果

図4.1.5より１日の雄ジカの鳴声の頻度は平均値396回であった。ここで、サブテーマ（3）の自動撮影カメラにより2019年9月26日～28日において観測されたデータからこの範囲内の雄ジカの頭数は12.69頭と推定されている。従って、1頭の雄ジカが1日に鳴く回数はおよそ29.1回と推測できる。一方、図4.1.6に湿原域における2019年9月26日～28日の雄ジカの鳴き声位置の推定結果と本手法によるこの期間の1日ごとのシカの鳴き声頻度の結果を示した。



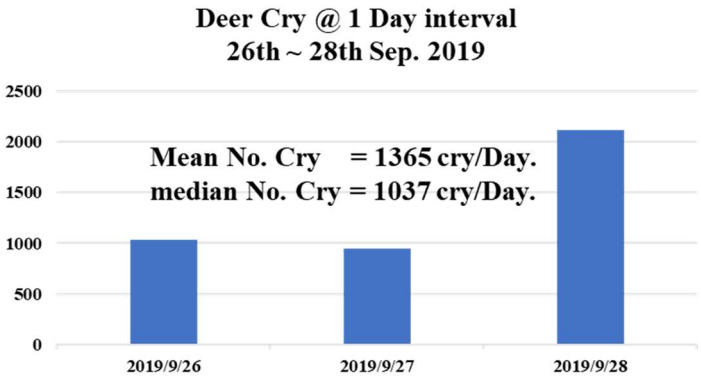


図4.1.6　湿原域における2019年9月26日～28日の雄ジカの鳴き声位置の推定結果と本手法によるこの期間の1日ごとのシカの鳴き声頻度の結果

図 4.1.6 より湿原域において、1 日の雄ジカの鳴声の頻度は平均値 1365 回であり、1 頭の雄ジカが 1 日に鳴く回数はおよそ 29.1 回であるとすると、湿原域での雄ジカの頭数は 46.9 頭と推定できる。

ここで、サブテーマ（3）の自動撮影カメラの観測範囲で得られた雄ジカに対する雌ジカと当歳の数の比率は、3.0 である。従って、湿原域のシカの頭数はおよそ 188 頭と推測できる。

また、1 日ごとのシカの鳴き声頻度の最大と最小を考慮して計算すると、湿原域のシカの頭数は 177.6～305.1 頭と推定された。

ここで、サブテーマ（3）の図 4.3.9 と同じように尾瀬全域（湿原＋周辺森林域）を考えると、サブテーマ（3）より森林内に生息している個体数は 362.3 頭と推定されているので、尾瀬全域（湿原＋周辺森林域）のシカの頭数は 539.9～667.4 頭と推定された。

ここで、推定された尾瀬全域（湿原＋周辺森林域）のシカの頭数は、サブテーマ（3）の結果と多少重複して観測している箇所があるため多少過大評価している可能性があるが、全体の面積に対して小さいため、この数値で大きな問題はないと判断した。

また、サブテーマ（2）のシカの多くが森林域から湿原域に出てくる 5 月の推定結果と比較すると方法論が全く違うにも関わらずほぼ同じ頭数を推定しており本手法の有効性が示された。

以上より複数マイクロフォンによる尾瀬全域（湿原＋周辺森林域）のシカ個体数はおよそ 539.9～667.4 頭と結論付けられた。

ここで開発した複数マイクロフォンによるシカの個体数推定は、9 月～11 月の雄ジカの繁殖期の鳴声のデータをもとに実施された。この時期のシカは湿原内よりもその周りの山中に生息しているほうが多く、その場合、樹木等が邪魔しドローンの観測ではシカの個体数を把握することが難しいため本手法を活用が望まれる。また、尾瀬湿原以外の森林地域などでもシカの個体数の把握に有効であるといえる。

以上より複数マイクロフォンによるシカ個体の抽出法の確立、さらにサブテーマ（2）と（3）で検討している手法との融合によるシカの個体数推定が実施され、当初の本研究の最終年度目標が達成されたといえる。

今後の課題としては、長期的な観測によるシカの個体数推定の誤差評価と高精度化があげられる。特にシカの各個体の識別を鳴声から判別できればより高精度化につながると考えられる。

（2）リモートセンシング画像によるシカ個体数推定手法の開発

研究目標のひとつであるドローン画像の取得方法の検討のために実施した1年目の現地の下見および2年目の空撮と最初の2年の金華山での追加調査によって、シカの抽出が可能な最大撮影高度は、画像の解像度が10cm程度になる高度であることが分かった。これを満たす高度での撮影を念頭に、空撮に使用する機体について検討した結果、1機体当たりの撮影範囲、離着陸場所の自由度、空撮時の天候の観点、機体の価格から、尾瀬ヶ原においては固定翼ドローンを用いるよりも、複数の回転翼ドローンを用いたほうが経済的で、かつ、効率的であることが分かった。さらに、尾瀬ヶ原の地形や植生に合わせて、それぞれのドローンに搭載するサーモカメラのレンズの焦点距離についても考慮することが、安全な空撮に必要であることが分かった。また、空撮は、ある一か所でドローンの離発着を行うのではなく、ドローンと一緒に操縦者も木道を移動し、バッテリーの残量が少なくなった場合は近くの木道上に降ろしてバッテリーを交換し、その場所から空撮を再開する方法をとることが、短時間で空撮を終わらせるために有効であった。図4.2.1はこれらの結果から決定したそれぞれの機体の空撮範囲である。この図の北側の領域の空撮は、斜面とそれ上の樹木の影響を受けるため、焦点距離の長いレンズを使用することで、高度を上げつつ設定した解像度を確保した。具体的には、北側の領域では、19 mmレンズのサーモカメラを搭載したドローンを用いて、解像度が10 cm程度になるように高度100 mmから空撮を実施した。それ以外の領域では、9 mmレンズのサーモカメラを搭載して、高度50 mから空撮を実施した。解像度が10 cm程度になるように撮影したシカ画像の例を図4.2.2に示す。この画像から、解像度10cm程度であれば、多少ぼやけているが目視でシカの大きさや姿勢の判断が可能であること

図4.2.1　ドローンの空撮範囲

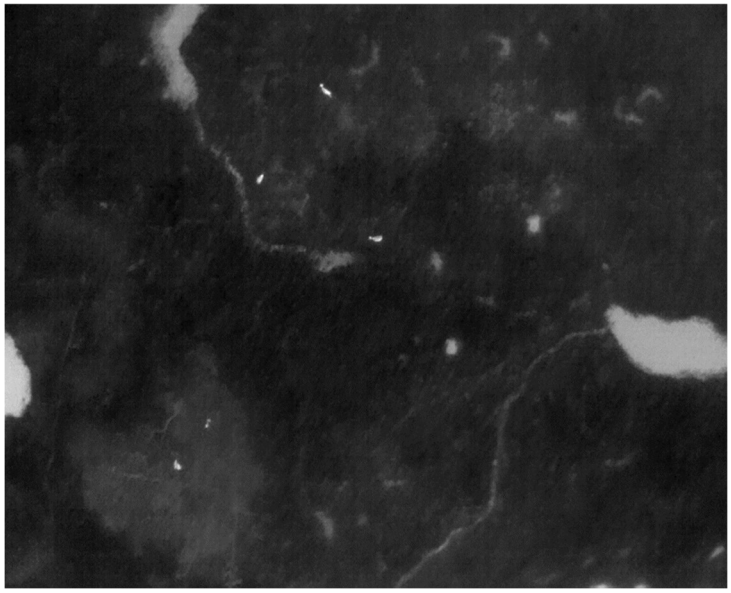


図4.2.2　ドローンによる空撮画像の例

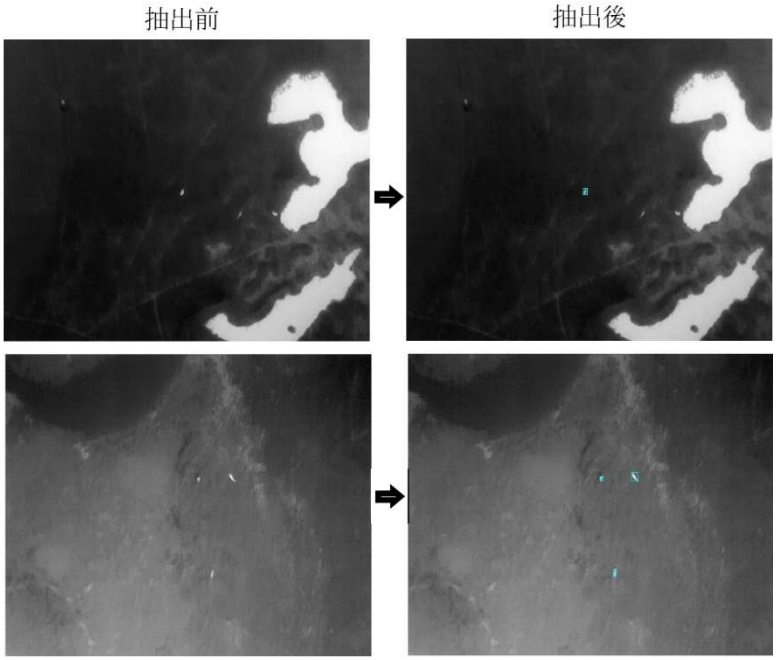


図4.2.4　深層学習モデルによる自動抽出の例

が分かる。このことから、上記の研究目標は概ね達成できたと考える。

次に、最終的な研究目標である熱画像中のシカの自動抽出のため、1年目と2年目の空撮によって得られた熱画像中のシカを教師データとして深層学習を行った。深層学習は、様々な方法が提案されているが、計算機への負担や処理速度、手法の利用の容易さの観点から、Yolo-Kerasのバージョン3を用いた。そして、学習後のモデルを3年目の夏（2019年8月）の空撮画像に適用してそれぞれの画像中のシカの自動抽出を試みた。その結果の例を図4.2.4に示す。これから、抽出精度は適用する画像によって異なることが分かる。このような不安定な抽出結果が得られる理由として、用いる画像の解像度の低さが挙げられる。そこで、用いる画像の解像度を超解像処理によって疑似的に高くして、同じサンプルを用いて再度学習して適用した。表4.0.1は、超解像処理の前と後の画像を用いた場合の抽出精度を表したものである。今回は、学習に用いたシカのサンプルが少なかったため、一般的な深層学習によるモデルの抽出精度の向上には限界があったため、どちらも抽出精度は高くない。しかし、これらの表から、超解像処理によってシカの抽出数は減少するが、誤抽出率は低下することが確認できた。すなわち、抽出したものがシカである確率は高くなることが確認できた。この結果は、当初の研究目標を達成できてはいないが、方向性や今後の検討課題を明確に示すことができたと考える。なお、今回は温度画像（フローティング型）に変換する前のバイナリ型の画像を用いた。その理由は、尾瀬ヶ原の1回の空撮では約3250枚の画像が撮影されるため、解析に用いる画像サイズを抑えることが処理時間の短縮に必要であったためである。

表4.0.1　超解像処理前後のシカ抽出数の比較

	超解像処理前の画像を用いた場合 上段：抽出数 下段：抽出率（シカ以外は誤抽出率）		超解像処理後の画像を用いた場合 上段：抽出数 下段：抽出率（シカ以外は誤抽出率）	
目視による 抽出数（頭）	シカ	シカ以外	シカ	シカ以外
1858	1218 65.5%	255 17.3%	1086 58.4%	71 6.1%

次に、当初の研究目標には含まれていなかったが、尾瀬ヶ原で過去15年以上実施されているライトセンサスによる調査結果との比較を目的として、追加で3年目の夏（2019年8月）にライトセンサスの実施直後に空撮を行った。図4.2.8は、ライトセンサスで発見したシカとドローンによる空撮で発見したシカの位置を表す。この図から、それぞれの方法で発見されたシカの位置と頭数に大きな差異があることが確認できた。これは、調査時刻のズレや、それぞれの調査方法の違いが影響していると思われる。ドローンによる空撮での発見数が多くなる傾向は、対象領域全域の空撮を行った2018年7月と2019年9月の画像から特定した個体数と、同月のライトセンサスで得られた個体数の過去10年の平均値を比較した結果においても見られ、過去のライトセンサスの結果との比較から、ドローンによる空撮で発見した個体数はライトセンサスの約2.9倍であることが確認できた。これを基に、頭数が最高となる2019年5月のライトセンサスの結果から領域全体の個体数を推定すると、平均626頭のシカが湿原内にいたことになる。この数値は、サブテーマ（1）で得られた値と同程度である。これは、尾瀬ヶ原のシカの個体数は5月下旬と9月下旬で大差はないと考えると、妥当な結果と言える。この結果から、ドローンによる空撮は、尾瀬ヶ原のような移動の制限がある場所における個体数調査に有効であることが分かる。ただし、ライトセンサスに置き換わるものではなく、ドローンによる空撮では困難で、かつ、ライトセンサスが得意とする群れの構成や性別、年齢等の特定を活かすための手法の統合が望ましいと思われる。

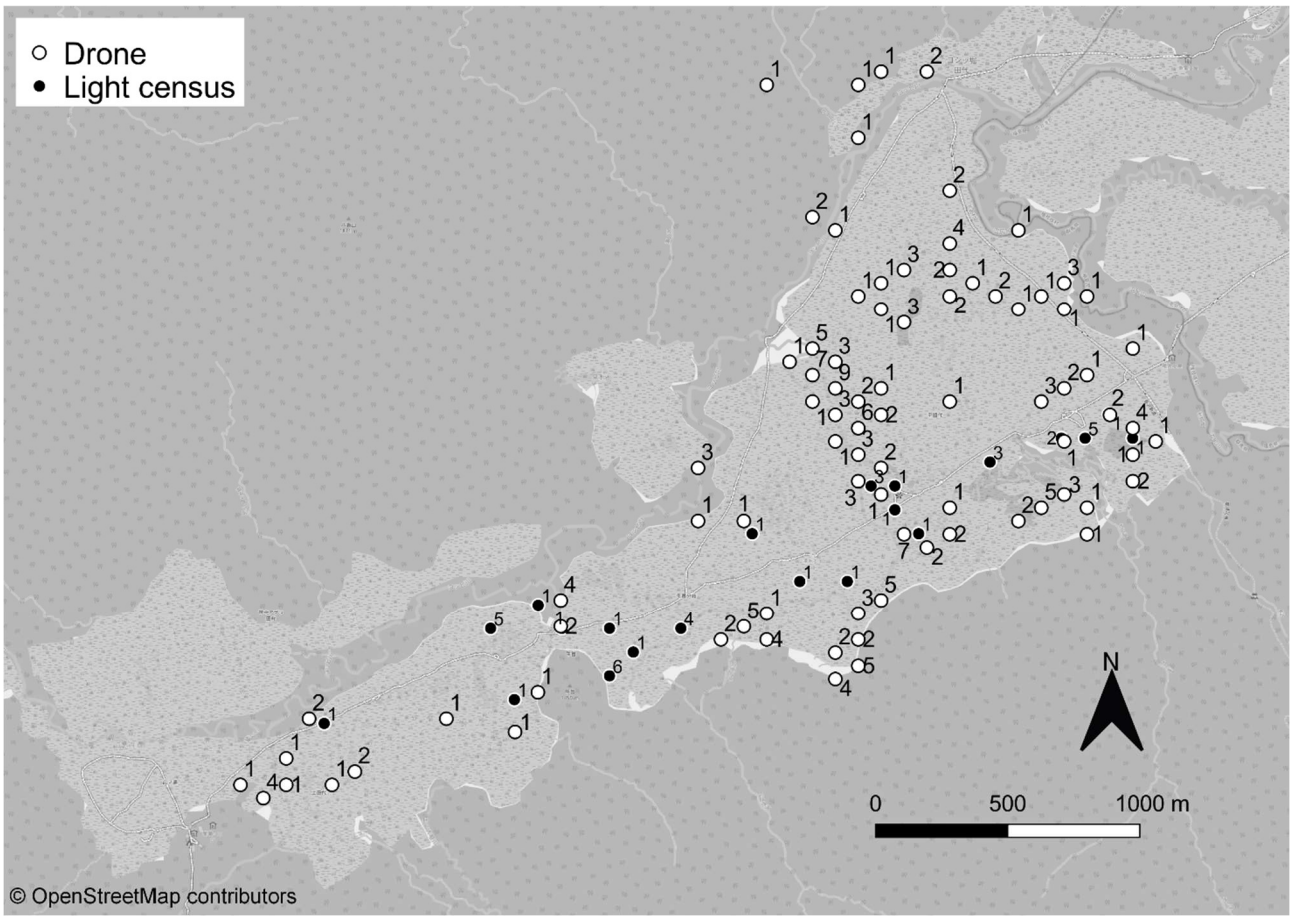


図4.2.8　ライトセンサスで発見したシカとドローンによる空撮で発見したシカの位置

最後に、研究目標のひとつである昼間の植生被害の推定方法の検討と解析補助データとしての利用の検討のため、2019 年 9 月 26 日の昼間の植生の状態を、植生モニタリングに適しているマルチスペクトルカメラを搭載したドローンを用いて観測した。図 4.2.11 は、空撮画像に 2019 年 8 月 5 日に発見できたシカの位置を重ね合わせたものである。この図から、湿原内を流れる小川沿いや池の周辺で多くのシカが確認されていたことが分かる。このように、上空から詳細に植生を観測することは、シカの好む場所の特定や、今後重点的に観測を実施する場所の選定に活用可能であると考えられる。このことから、研究目標であった昼間の画像の利用方法を示すことができたと考える。ただし、被害の推定手法の検討については、今後目視に頼らない方法を目指す場合は検討する必要がある。

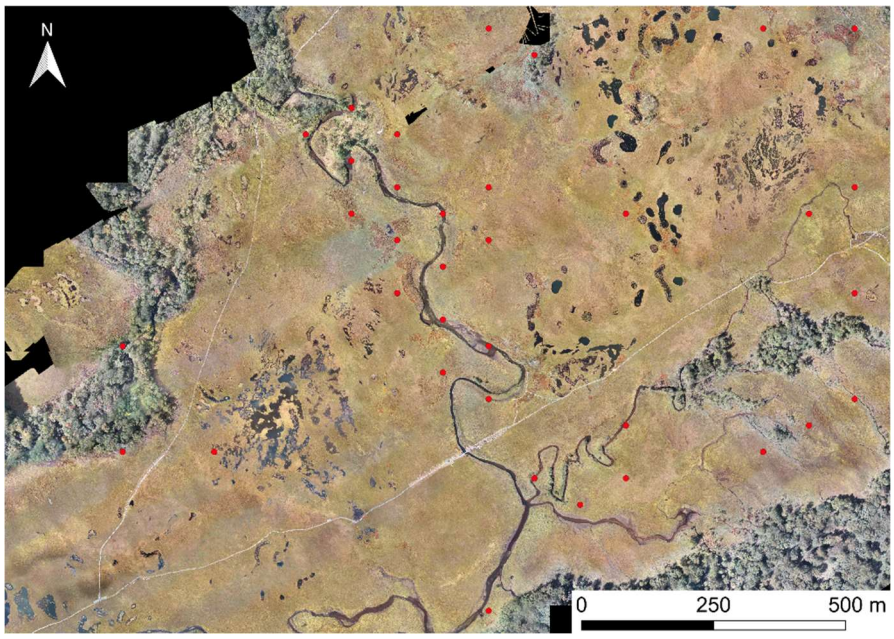


図4.2.11　シカの発見場所の植生の様子。赤丸：シカの発見場所

（３）従来手法による個体数推定とオス個体の行動圏に含まれるシカ個体数の推定

① 個体の捕獲と追跡

3年間で合計5頭のシカにGPS首輪の装着を行った。各個体の追跡期間は表4.3.2に示した。平成30年度に装着した4個体は令和元年の夏から秋にかけて首輪を回収した。これらの個体は、最低1年間は追跡ができていた。令和元年度に装着した個体については現在も追跡中である。

表4.3.2　追跡期間と測位地点数

個体番号	捕獲日	最終追跡日	測位地点数	状況
1801	平成30年7月2日	令和元年8月1日	9378	GPS首輪回収済み
1802	平成30年7月5日	令和元年8月1日	7477	GPS首輪回収済み
1803	平成30年10月8日	令和元年10月23日	8352	GPS首輪回収済み
1804	平成30年10月21日	令和元年10月25日	8266	GPS首輪回収済み
1901	令和元年10月23日	令和2年5月1日	3788	追跡中

② 行動圏面積

尾瀬ヶ原のシカの繁殖期である9月から10月の行動圏を求めた。個体によっては越冬地への移動を開始している個体もおり、行動圏面積は様々であった。2018年の繁殖期に追跡のできた4個体では、個体1802は移動を行っていたため、片品村戸倉地域にも行動圏が形成されていた。その他の3個体は尾瀬ヶ原周辺に行動圏が形成され、そのうち最も大きい行動圏を形成したのは個体1804であり、面積は361.6haとなった（表4.3.3）。また、カメラによる個体数推定を行った範囲を利用していた個体は個体1803のみであった。2019年の繁殖期においても、個体1804は越冬地の移動を開始しており、尾瀬ヶ原の南東にも大きな行動圏を形成していた。個体1803については2019年も自動撮影カメラの設置地域に行動圏を形成しており、その面積は269.0haとなっていた。今回装着した個体のうち1801はメス個体であり、それ以外の個体はオス個体である。オス個体の行動圏の重複は2018年も2019年も季節移動により行動圏が大きく推定された個体との重複を除くと、ほとんど重複はみられることはなかった。

表4.3.3　繁殖期（9～10月）の行動圏面積（ha）

年	個体名	コアエリア	行動圏
2018年	個体1801	9.5	45.8
	個体1802	1125.9	6801.7
	個体1803	61.9	247.9
	個体1804	57.8	361.6
2019年	個体1803	50.9	269.0
	個体1804	814.9	4546.6
	個体1901	66.8	410.8

③ 移動距離

生息密度を推定するために移動距離を算出した（表4.3.4、表4.3.5）。移動距離は1時間ごとの地点間の距離をGISで算出し、1日単位で集計した。移動距離は季節移動が起こる10月に長くなる傾向が見られた。

表4.3.4　個体ごとの1日あたりの平均移動距離（m）

年	月	個体1801	個体1802	個体1803	個体1804
平成30年	7	1864.6	614.1 663.0	0.0	0.0
	8	1686.4	663.0	0.0	0.0
	9	1783.7	760.5	0.0	0.0
	10	1674.1	1953.0	3276.6	959.9
令和元年	7	1798.1	656.0	756.4	658.0
	8		177.8	378.5	664.4
	9			1151.7	1397.6
	10			1232.3	2475.2

表4.3.5　令和元年7月～10月の1日あたりの平均移動距離（m）

月	1日あたりの平均移動距離
7	793.4
8	497.1
9	955.3
10	1909.8

④ 自動撮影カメラ調査

自動撮影カメラは推定する範囲に400mメッシュを作成し、そのメッシュごとに1台設置した。設置台数は33台となった。平成29年度は設置期間が短かったため、撮影された頭数は少なく652頭となっていた（表4.3.6）。また、オスとメス当歳の合計頭数の比をみると、調査期間が10月のみだった平成29年度は0.66とオスのほうが多くなっていたが、平成30年度と令和元年度はそれぞれ1.36、1.89となっており、オス以外の性年齢区分の割合が高くなっていた。令和元年度の7月から10月では月が経つにつれてオスの割合が下がる傾向がみられた（表4.3.7）。

表4.3.6　年度における性年齢区分ごとの撮影枚数とオスとその他の性年齢区分の比

年度	オス	メス	当歳	不明	合計	オス対メス当歳の合計の比
平成29年度	280	159	26	187	652	0.66
平成30年度	1138	979	566	830	3513	1.36
令和元年度	1523	2161	713	1366	5762	1.89

表4.3.7　令和元年の性年齢区分ごとの撮影枚数とオスとその他の性年齢区分の比

月	オス	メス	当歳	不明	合計	オス対メス当歳の合計の比
7	14	147	57	62	280	14.57
8	63	425	179	231	898	9.59
9	265	622	174	358	1419	3.00
10	1140	953	300	695	3088	1.10

⑤ 従来手法による個体数推定

個体数の推定に必要なパラメータを表4.3.8と表4.3.9に整理した。群れサイズは撮影された写真をもとに平均群れサイズを算出した。また、移動速度は今回追跡したGPS首輪装着個体のデータを使うことを基本としたが、平成29年度時点ではGPS首輪の装着ができていなかったため、環境省が所有しているニホンジカの移動に関するGPS首輪のデータを利用した。平成29年の自動撮影カメラを行なっている期間中に調査地周辺を利用している個体は2個体おり、そのデータから1日あたりの移動距離は0.937kmであった。

これらのデータを元に、生息密度を計算すると、平成29年度は18.29頭/km^2、平成30年度は8.53頭/km^2、令和元年度は19.44頭/km^{2}となり、平成30年度だけ低い生息密度となっていた。今回の調査地の

面積は2.66kmであることから、調査範囲内の推定生息頭数は、平成29年度は48.69頭/km²、平成30年度は22.71頭/km²、令和元年度は51.75頭/km²となった。

令和元年7月～10月を月ごとに推定した結果、7月は密度が低かったが、8月、9月と密度が高くなっていた。その後10月には少し密度が下がっていた。

この値を用いて10月の尾瀬ヶ原周辺の森林域に生息する個体数を推定した。今回推定の対象とした森林の面積は30.14km²のため、森林内に生息している個体数は362.28頭と推定された（図4.3.9）。

表4.3.8　年度ごとの推定生息数

年度	群れサイズ (g)	移動速度 (km/日)(v)	撮影率 (y/t)	推定密度	推定生息数	期間
平成29年度	1.23	0.94	0.166	18.29	48.69	10月4～26日
平成30年度	1.24	1.71	0.14	8.53	22.71	6月30～10月26日
令和元年度	1.33	1.43	0.25	19.44	51.75	7月8日～11月2日

表4.3.9　令和元年7月～10月の推定生息数

月	群れサイズ	移動速度	撮影率	推定密度	推定生息数
7月	1.29	0.79	0.07	4.75	12.64
8月	1.29	0.50	0.15	16.56	44.09
9月	1.31	0.96	0.33	19.08	50.80
10月	1.36	1.91	0.40	12.02	32.01

図4.3.9　推定に用いた森林範囲と自動撮影カメラ調査範囲

⑥ オス1頭の行動圏に含まれる推定個体数

当初の目的に含まれていた、オス１頭の行動圏内に含まれる個体数を推定した。個体数推定を行った地域と重複する行動圏を持っていたのは個体1803だけであった。そのため、個体1803の行動圏内に生息する推定個体数を計算した。個体1803は平成30年度の行動圏面積が2.48km^2、令和元年が2.69km^{2}であった。この年の推定密度はそれぞれ8.53頭/km^2、19.45頭/km^{2}であることから平成30年度は21.15頭、令和元年は52.32頭が生息していると推定された。

⑦ GPS首輪に内蔵されたビデオカメラで撮影された動画データの解析

当初の目的には含まれていなかったが、GPS首輪に内蔵されたビデオカメラで撮影された動画の解析を行った。解析対象は個体1801のメス個体とした。時間帯ごとの利用環境割合をみると、日中はササをよく利用し、薄明薄暮の時間帯には森林を利用していることがわかった（図4.3.10）。次にその環境でどんな行動をしているかを調べた結果、主に日中に利用していたササ群落では反芻に費やす時間が最も長くなっていた（図4.3.11）。また、湿原や河川などの見晴のいい場所では移動のために利用している様子が伺えた。ササ群落、森林、林縁では、毛づくろいや授乳などの社会行動が確認された。

また、ビデオカメラで採食が確認された植物はササが最も多く、その他、湿原性の植物であるミズバショウやギョウジャニンニクなども採食しており、湿原への影響も確認できた。これらのデータは生態学的にも貴重なデータであるとともに、今後、これらの植物が自生している場所を探すことで、シカを効率的に捕獲できる可能性があると考えられた。

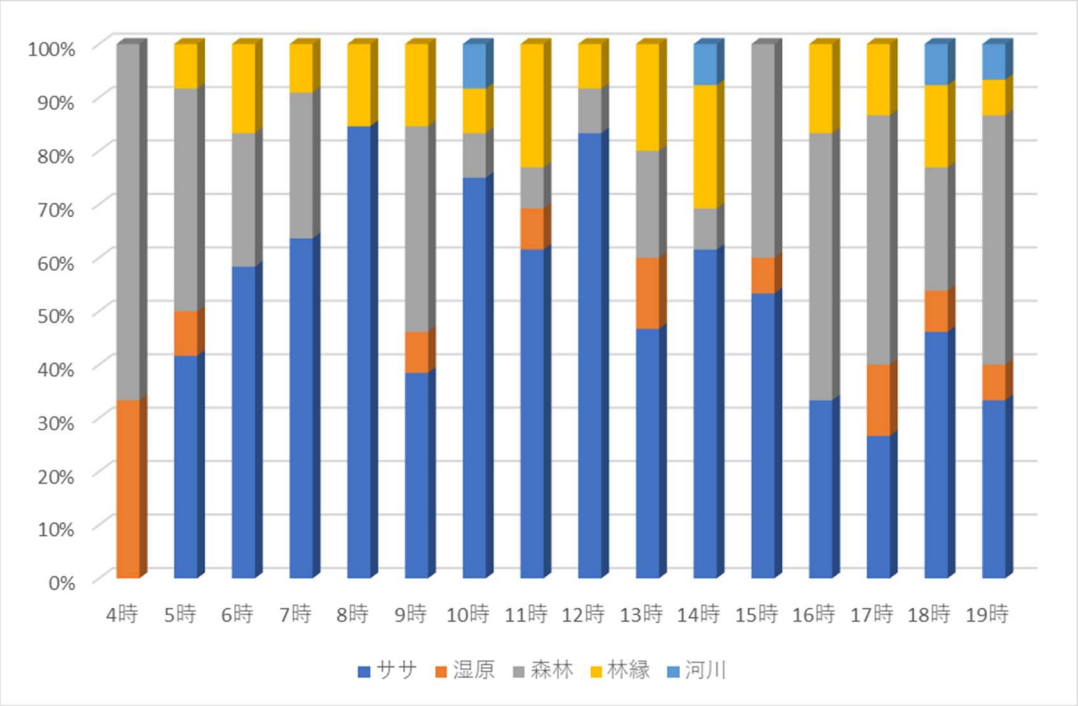


図4.3.10　時間帯ごとの利用環境割合

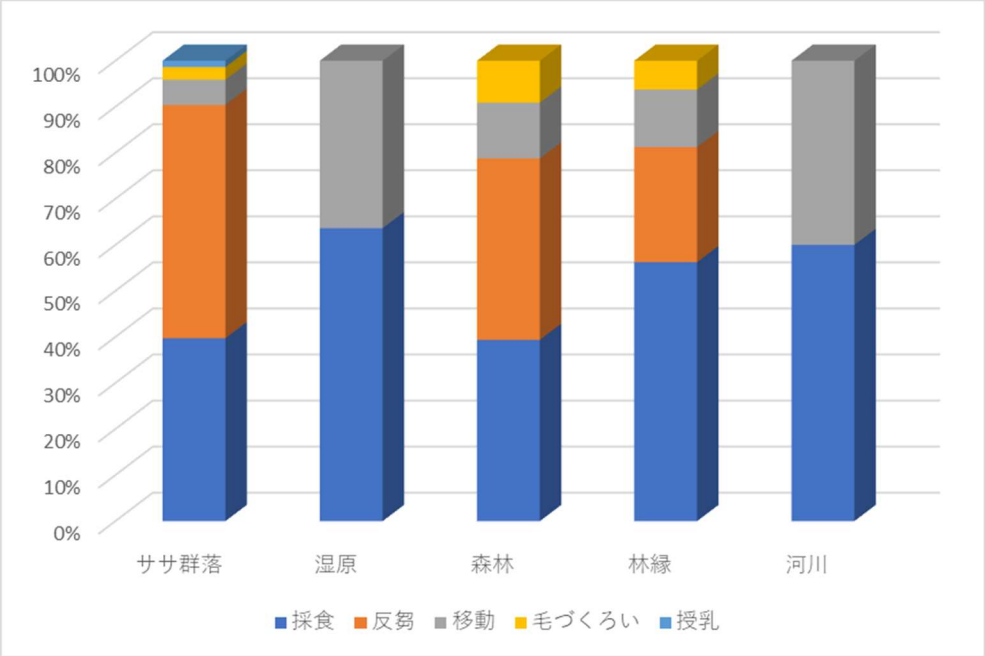


図4.3.11　環境ごとの行動割合

５．本研究により得られた主な成果

（１） 科学的意義

・ 複数マイクロフォンによりシカの鳴き声を観測し、そのデータから数理的手法により、シカの場所と生息数を評価する手法が提案され本研究の目標が達成された。これは、多数の人の中の会話からある特定の会話だけが聞こえる“カクテルパーティー効果”を実際のフィールド（尾瀬）に置き換え、シカの生息数を推定するという点が独創的である。

・ 尾瀬ヶ原のような上空が開けた場所でのシカの発見を念頭に、サーモカメラ搭載ドローンによる夜間の空撮画像の取得方法と処理方法の提案と開発を目標に、それぞれについて検討した。その結果、従来法であるライトセンサスでは発見困難な場所にいるシカが発見されたこと、さらに、移動に制限がある場所でも広域の観測が可能であることが確認され、効果的なシカのモニタリング方法の一つであることが示唆された。

・ 本研究は既往の研究を含んでおり、すでに実務でも使われ出している。しかし、多くの場合はシカの移動速度を計測する場合に、他の地域の移動速度などを参考に密度を推定している。今回は推定地域でシカにGPS首輪を装着し、それにより得られた移動速度データを使っていることでより信頼される密度推定になっていると思われる。また、シカの行動を動画で確認できたことは、国内においてとても稀で先進的な取り組みであると思われる。これらのデータは生態学的にも貴重であるが、シカの管理においても役立てていける可能性が示された。より多くの個体にビデオカメラを装着することでシカの生態や行動が更に解明されていくものと思われる。

・ 複数マイクロフォンによる雄ジカの位置推定手法の結果をもとに、サブテーマ（3）の自動撮影カメラの観測範囲で得られた雄ジカの頭数および雄ジカに対する雌ジカと当歳の数の比率を用いて（湿原＋周辺森林域）のシカの生息数推定を試みた。その結果、尾瀬全域（湿原＋周辺森林域）のシカの頭数はおよそ539.9～667.4頭と推定された。これは、サブテーマ（2）のドローン空撮とこれまでのライトセンサスの結果との比較により、ドローン空撮による結果とライトセンサスとの結果の関係を明らかにし、これまでのライトセンサスで最も発見数が多い5月の湿原全体の個体数を推定し、サブテーマ（1）の結果との比較により、その結果が妥当であることが確認され本研究の全体目標が達成された。尾瀬全域で初めてシカの頭数を明らかにした点で科学的に意義があるといえる。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

GPS首輪を装着しシカの移動を追跡する技術は行政においても活用されている。シカの管理を行う上で、特に季節移動がある地域であればシカの移動を把握することは、シカの管理を効率的に行うことにつながる。そのため、ますますGPS首輪の活用が望まれる。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

・ 本研究の目標通り初年度、2年目で達成された複数マイクロフォンによる個体数推定手法は、シカ以外の動物の鳴き声をデータベース化しておくことにより、ある対象地域の動物の生息数や場所を特定できる点で応用範囲が広く、生物多様性の分野にとって有用性が高いといえる。

・ 従来法のライトセンサスとの比較結果、湿原のような上空が開けた場所でのドローンを用いた空撮の有効性が確認されたため、試験的に導入されることが期待される。

・ 今回初めてカメラ付きのGPS首輪を活用した。その中で、シカの管理に役立ちそうな情報も得られており、今回の成果を広く周知することで今後のシカ管理の中で活用されていくことが見込まれる。

・ 最終年度の目標通りに達成されたマイクロフォンによるシカ個体数推定では、尾瀬全域のシカの個体数は、およそ539.9～667.4頭と推定され、ドローンによる個体数は、およそ470～696頭と推定された。マイクロフォンとドローンによるシカの個体数の推定原理は全く違うにも関わらずほ

ぼ同じ推定結果が得られ、それぞれの手法の有効性が示された。今後、尾瀬においてこれらの手法の活用が期待される。

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) 牧雅康、奥村忠誠、沖一雄：日本リモートセンシング学会誌、受理.
ライトセンサスとドローン空撮によるシカ個体分布特定結果の比較

2) 【国際雑誌に投稿中】Salem Ibrahim Salem, Kazuhiko Fujisao, Masayasu Maki, Tadanobu Okumura, and Kazuo Oki：Ecological Indicators, Detecting and tracking deer positions using sound recordings.(minor revision)

＜査読付論文に準ずる成果発表＞

1) 沖一雄、牧雅康、奥村忠誠、Salem Ibrahim Salem：日本リモートセンシング学会誌 39(5) 384-392 (2019)地上・リモートセンシングによる尾瀬ヶ原湿原におけるシカ個体数推定手法の開発プロジェクト.

（２）主な口頭発表（学会等）

1) 沖一雄：第25回「野生生物と社会学」学会（2019）
「複数マイクロフォンによるシカ個体数推定手法の開発」

2) 峯岸優好、牧雅康、沖一雄、奥村忠誠：日本リモートセンシング学会第67回学術講演会（2019）
「ライトセンサス調査と比較した広域湿原におけるシカ個体数推定のためのドローン熱画像の有用性評価」

3) 牧雅康：第25回「野生生物と社会学」学会（2019）
「ドローンを用いたシカ個体数推定手法の開発」

4) 牧雅康：システム農学会2019年度春季大会（2019）
「夜間のドローン空撮画像を用いた尾瀬ヶ原のシカ個体抽出」

5) 奥村忠誠：第25回「野生生物と社会」学会（2019）
「センシング技術を活用して野生動物管理を行う」

6) 沖一雄：第24回「野生生物と社会」学会（2018）
「複数マイクロフォンによるシカ個体数推定手法の開発」

7) 沖一雄：平成30年度尾瀬・日光シカ対策ミーティング（2018）
「地上・リモートセンシングによる尾瀬ヶ原湿原におけるシカ個体数推定手法の開発」

8) 牧雅康：第24回「野生生物と社会学」学会（2018）
「リモートセンシング画像によるシカ個体数推定手法の開発」

9) 峯岸優好、牧雅康、沖一雄、長谷川匡：日本リモートセンシング学会だ65回学術講演会（2018）
「シカ個体抽出を目的とした機械学習のための超解像処理を適用したドローン熱画像の有用性評価」

10) 牧雅康、峯岸優好、長谷川匡、沖一雄：日本リモートセンシング学会第64回学術講演会（2018）
「シカ個体抽出を目的とした超解像処理ドローン熱画像の有用性の評価」

11) 奥村忠誠：第24回「野生生物と社会」学会（2018）
「尾瀬におけるシカ問題と従来手法による個体数推定」

７．研究者略歴

研究代表者

沖　一雄

筑波大学社会工学研究科博士課程修了、博士（都市・地域計画）、

現在、東京大学生産技術研究所 特任教授、京都先端科学大学ナガモリアクチュエータ研究所 教授

研究分担者

1) 牧　雅康

筑波大学社会工学研究科博士課程修了、博士(社会工学)、

現在、福島大学農学群食農学類 准教授

2) 奥村　忠誠

東京大学大学院農学生命科学研究科単位取得退学、博士（農学）、

現在、株式会社野生動物保護管理事務所 取締役 本社調査事業部部長

3) 高橋　亮（令和元年6月～）

東京理科大学大学院理学研究科博士課程修了、博士（理学）、

現在、京都先端科学大学ナガモリアクチュエータ研究所 准教授

4) 佐藤 啓宏（令和元年6月～）

電気通信大学大学院情報システム学研究科修了、博士（工学）、

現在、京都先端科学大学ナガモリアクチュエータ研究所 講師

5) Salem Ibrahim Salem Mohamed Salem（令和元年6月～）

東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、博士（工学）、

現在、京都先端科学大学ナガモリアクチュエータ研究所 講師

II. 成果の詳細

Ⅱ－１　複数マイクロフォンによるシカ個体数推定手法の開発

東京大学
　生産技術研究所　　沖　一雄
京都先端科学大学
　ナガモリアクチュエータ研究所　　高橋　亮（令和元年6月～）
　　佐藤 啓宏（令和元年6月～）
　　Salem Ibrahim Salem Mohamed Salem（令和元年6月～）

平成29年度～令和元年度研究経費（累計額）：48,267千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成29年度：16,362千円、平成30年度：15,543千円、令和元年度：16,362千円）

［要旨］
現在、尾瀬の湿原内外において、シカの捕獲が実施されているが、尾瀬の植生被害を低減させるために必要な捕獲数は設定されずに捕獲が行われている。このことから、尾瀬のような人のアプローチが難しい場所で行える密度調査手法が求められている。これまで尾瀬のシカの生息数に関する指標として、主にはライトセンサス調査による目撃数の変化が使われてきた。しかし、ライトセンサス調査はその日の気象条件やシカの動きに強く影響を受けるため、データの観測誤差が大きくなる問題がある。その他、シカの生息密度の指標として、自動撮影カメラの撮影頻度とGPS首輪から得られた移動速度を元に推定する手法があるが労力がかかるという課題があった。
本研究では、湿原に設置された複数のマイクロフォンで同時に観測されたシカの鳴き声（繁殖期のオスジカの“フィーヨフィーヨ”と威嚇するときの“ピャッ”という鳴き声）からどこにシカが何頭いるかを評価するための数理学的アプローチ手法を確立した。さらに、サブテーマ（2）とサブテーマ（3）と連携し、シカ個体数推定手法を比較検討し、尾瀬全域（湿原＋周辺森林域）における複数マイクロフォンによるシカ個体数推定手法の提案をおこなった。最終的に尾瀬全域（湿原＋周辺森林域）のシカ個体数はおよそ539.9～667.4頭と結論付けられた。

［キーワード］
尾瀬、シカ、マイクロフォン、音計測

１．はじめに

これまで尾瀬のシカの生息数に関する指標として、主にはライトセンサス調査による目撃数の変化が使われてきた。しかし、ライトセンサス調査はその日の気象条件やシカの動きに強く影響を受けるため、データの観測誤差が大きくなる問題がある。その他、シカの生息密度の指標として、自動撮影カメラの撮影頻度とGPS首輪から得られた移動速度を元に推定する手法があるが労力がかかる。また、糞塊調査、糞粒調査、区画法などもあるが、これらの手法は尾根や山の中を歩き回りシカやその痕跡を探すという手法であり、人による踏査が難しく湿地帯である尾瀬のような湿原には適さない。
現在、尾瀬の湿原内外において、シカの捕獲が実施されているが、尾瀬の植生被害を低減させるために必要な捕獲数は設定されずに捕獲が行われている。このことから、尾瀬のような人のアプローチが難しい場所で行える密度調査手法が求められている。
雄ジカは、9月～11月の秋ごろに掛けて発情期をむかえ、大きな高い声で鳴くことが知られている。大阪市立大学（当時）の南正人先生の研究成果においては、この鳴き声はフィーヨフィーヨと言われ、

縄張りをもつ雄が自己主張のために出す大きな音だとされている。発情期になると、複数の雄ジカが特に夕方から夜間にかけてお互いの存在を主張しあうために、それぞれの縄張り内で大きな声で鳴きあうという特性を持つ。このことから、発情期の雄ジカの頭数を、特定の鳴き声のパターンを照合することにより推定可能であると考えられる。

雄ジカの位置は、3つ以上の複数の位置において同一の音源を計測し、それぞれの音の時間的差分を計測することに基づいて、計算可能となる。これまで室内レベルやある限られたエリアにおいては複数の音源による物体の位置の特定は試みられてきたが、尾瀬のように広域な野外において、特に野生動物（雄ジカ）に対して試みられるのは世界最初といえる。さらに、本研究では雄ジカの位置からサブテーマ（3）から得られた情報をもとに尾瀬全域のシカの生息数を推定する。

２．研究開発目的

本研究では、湿原に設置された複数（3か所以上）のマイクロフォンで同時に観測されたシカの鳴き声（繁殖期のオスジカの“フィーヨフィーヨ”と威嚇するときの“ピャッ”という鳴き声）からどこにシカが何頭いるかを評価する技術を数理学的アプローチにより確立する。さらに、サブテーマ（2）とサブテーマ（3）と連携し、シカ個体数推定手法の精度を比較検討し、最終的に湿原域における複数マイクロフォンによるシカ個体数推定手法の提案を行い、個体群管理に向けた個体数推定手法及び効果的な捕獲手法の開発に貢献する。

尾瀬ヶ原湿原を対象地域とし、地上設置型のリモートセンサを長期間に渡り設置してデータを計測し、このデータの解析を元にシカの個体数の推定アルゴリズムを開発する。リモートセンサは主に、高いゲインを持ったマイクロフォンと、GPSにより構成される。GPSは、衛星から送られる信号の中身に極めて高い精度の時間パラメータがあり、広範囲に設置されたセンサ間での時間同期を可能にする。つまり、GPSから送られてきた時間信号で補正することにより、それぞれのマイクロフォンにおいて音が計測された絶対的な時間を正確に推定することができる。データの取得については、2017年度の基礎実験、そして2018年度及び2019年度の2年間にわたり、秋季にそれぞれ約3週間ずつ計測を行っている。

最後に上記で開発された雄ジカの位置推定手法とサブテーマ（3）の観測範囲で得られた雄ジカの頭数および雄ジカに対する雌ジカと当歳の数の比率を用いて尾瀬ヶ原全域のシカの生息数の推定を試みた。

３．研究開発方法

広範囲に設置された複数マイクロフォンからの音計測に基づく音源位置の推定

① 本小課題の背景

まず、本課題において基本技術となる複数マイクロフォンの録音データに基づく音源位置の推定方法について説明する。理論的には、マイクアレイシステムなどに見られるように、複数マイクロフォンからの音源位置推定手法については、既にいくつかの類似の提案がなされているが、本研究特有の課題が次のように挙げられる。

- ノイズの多い実際の自然環境の音源に対しての適用であること
- 計測対象の音源（この場合シカの鳴き声）の音圧のダイナミックレンジが、ノイズの影響だけでなく距離や鳴き方によってとても大きいこと
- 一般的なマイクアレイのマイクロフォン間距離はせいぜい数10㎝程度であるのに対して、本手法のマイクロフォン間のベースラインの距離は数百メートルととても離れていること

複数マイクロフォンによる音源位置推定を基本原理とともに、本課題特有の問題に対しての解決方法を探り雄ジカの位置推定手法の開発を実施した。

② 目的

実環境で録音された複数のシカ音声データを元に、シカの位置を推定する手法を提案する。この実現のために、次のような手順でデータ処理を行う。

1. 音源の強化
2. ノイズを含む音源からのシカの鳴き声候補の自動検出
3. 3つの音源間での同じシカの鳴き声の時間遅延の自動検出
4. 時間遅延に基づくシカの位置推定

③　録音データからのシカの位置の自動検出手法

マイクロフォンを尾瀬の山中に複数設置して、その中で同一のシカの鳴き声が検出された録音データから、検出された時間差を元にシカが鳴いた位置を推定する。図3.1.1に提案手法の音声処理の流れを示す。音声処理は、各音源に適用する前処理と、3音源をベースにする位置推定処理の段階を経る。

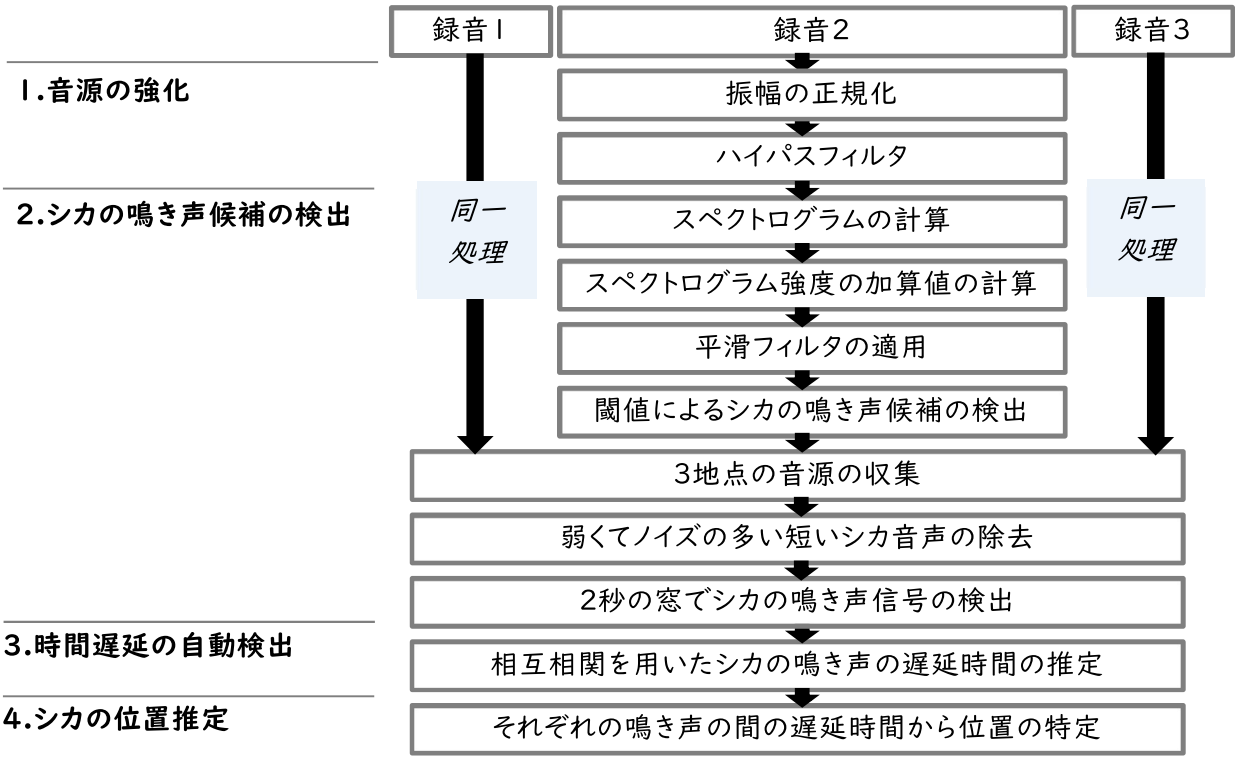


図3.1.1　複数音源によるシカの位置推定手法の音声処理の流れ

③－１　音源の強化

録音音源に含まれるシカの音声の録音レベルは、マイクロフォンからの距離や個体・鳴き方によって、録音のダイナミックレンジがとても大きいという特徴がある。シカの鳴き声は、最も大きな場合、1ｋｍをはるかに超えて山全体に響き渡るほどのこともある。我々の提案手法は音声レベルに影響されづらいという利点があり、これを活かして、まず音声レベルを一元化して後ろの処理に渡す。

マイクロフォンで録音される音声レベルは図3.1.2に示すようにとても小さいので、これを正規化して増幅する。マイクロフォン性能のS/N限界に近いレベルの信号も含まれており、ノイズと信号の強度レベルの差が小さく、さらにノイズ成分をフィルタリングする必要が有る。

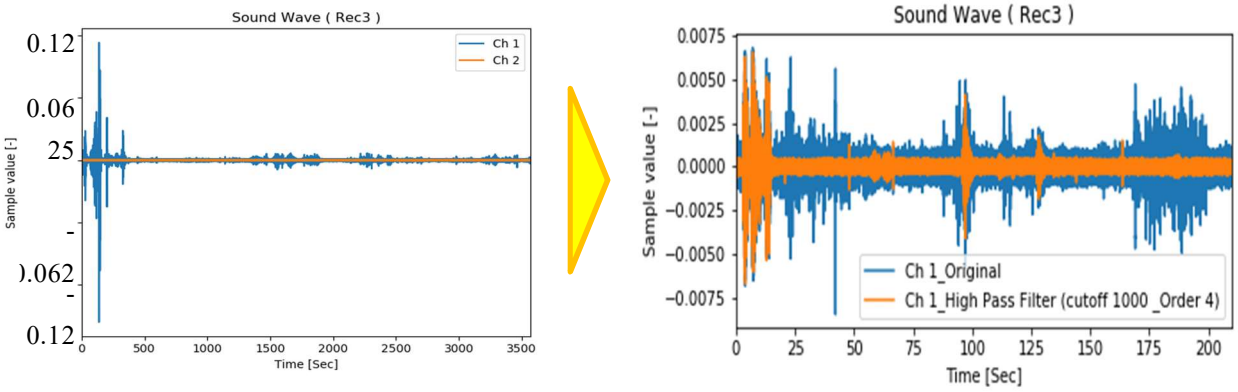


図3.1.2　音声の正規化による増幅

自然環境下のノイズは500Hz以下の低周波成分が多いのに対して、シカの音声は1000～2000Hzにピークが見られる。そこで図3.1.3に示すように、カットオフ周波数を1000Hzに設定した4次ローパスフィルタを適用し、シカの音声と自然音源のノイズを分離する。図3.1.4は、正規化した音声データをスペクトログラム化したもので、上はフィルタ適用前、下はフィルタ適用後を示している。上のフィルタ適用前のデータには、低い周波数帯に強い信号がところどころに見られるが、フィルタ適用後には見られない。この結果、残った高周波成分に多くのシカ音声特徴が残されていると期待できる信号に成形されている。

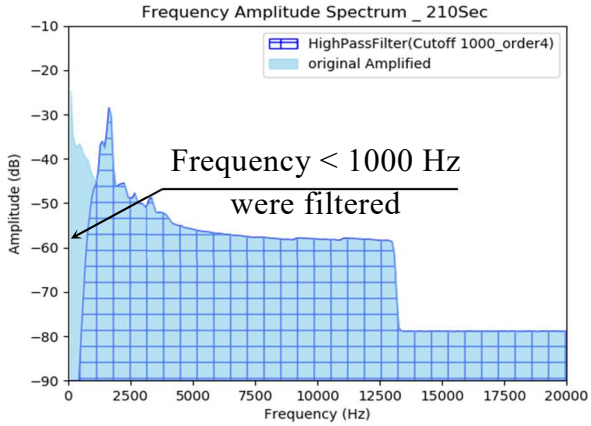


図 3.1.3　ローパスフィルタの適用

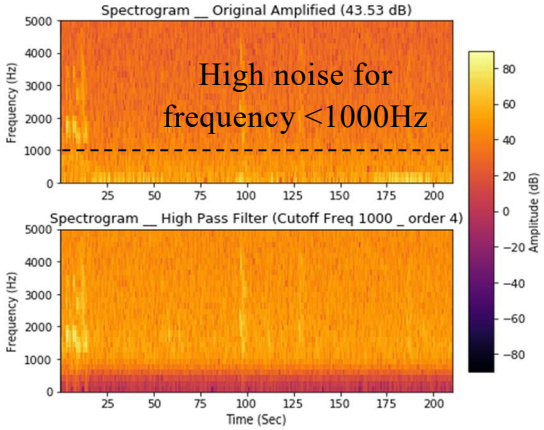


図 3.1.4　ノイズ適用結果の比較

③－２　ノイズを含む音源からのシカの鳴き声の自動検出

次に、超長期間の録音データからシカの鳴き声候補の自動検出を行う処理を適用する。録音データは約3週間に渡る長期間に渡り、この中でシカの鳴き声の頻度は時刻や気象条件などの影響を受け、それほど多くない。自動的にシカの音声候補を検出する手法が必要になるが、前述のように録音品質が様々な理由で安定しないため、ノイズにロバストな方法で取りこぼしなくシカの鳴き声候補を取り出す必要が有る。一方でフィルタを強くすると、シカ音声の取りこぼしが増えるというジレンマがある。

音声イベントの自動検出をノイズにロバストに行うために、スペクトログラム上の波形特徴を極めて単純な加算処理にて計算する（図3.1.5）。5000Hzから1000Hzまでの各時間単位の振幅を加算した値をイベント検出のトリガーに利用する。一定の閾値を超える一定の時間ブロックが検出されたときに、シカの音声候補として取り出す。ただし、単純な加算値は時間的な不安定さを含むため、サビツキー・ゴーレイ平滑フィルタを適用して、時間幅のマージンを得るとともに誤検出を減らす。

またこのように検出された音声イベントのデータは、正規化とローパスフィルタの適用を経て、自然音のノイズレベルは大きく減衰させることができているものの、いまだに音声信号はシカの音声以外の多くのノイズ音源を含んでいる。例えば、木の葉がこすれる音や動物の足音等は比較的高い周波数の成分を含む音であるため、ローパスフィルタの適用だけでは取り去ることができない。しかし、これらのノイズ音源の音圧レベルはシカの鳴き声に比較すると、かなり小さいため、遠く離れた位置に設置された3つのマイクロフォンで同時に記録されることは少ない。そのため、ある時刻を基準に一定時間幅に類似の信号波形が見られなければ、ノイズとして弾くことができる。音速は、気圧や気温の影響は受けるもののおよそ340[m/s]で有ることから、マイク間の設置距離を基準にフィルタリングの時間幅を決めればよく、今回はシカの平均的な鳴き声の長さを勘案して6秒の窓幅に設定している。図3.1.6に、提案手法によるシカ音声の検出結果を示す。3地点の音声データから時間的なずれがある類似の波形が検出されている様子が見て取れる。

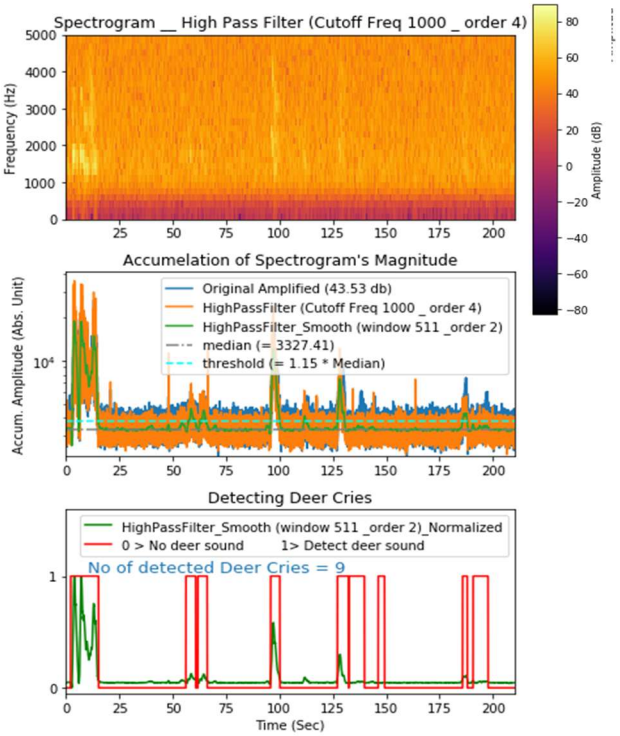


図 3.1.5　スペクトログラム強度の加算値の計算と閾値による音声イベントの検出

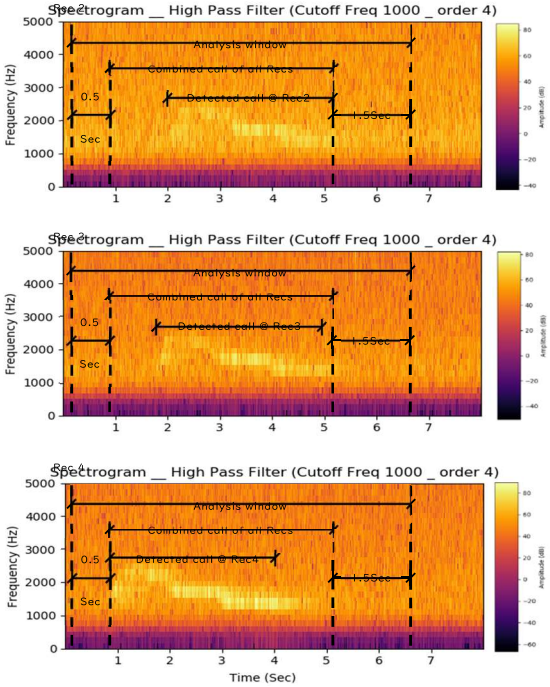


図 3.1.6　シカ音声候補の検出結果

③－３　３つの音源間での同じシカの鳴き声の時間遅延の自動検出

音声イベント検出手法により検出された音源間の時間遅延を計算する方法を説明する。図 3.1.7 に検出された音声信号の一例を示す。3 つの離れた場所に設置されたマイクロフォンを使い、同じ音源を録音している信号データであるが、録音環境の違いから波形には大きな差異があることが分かる。これらの時間遅延を推定するためには、相互相関を計算することが有効である。図 3.1.8 は 3 つの音源間の相互相関を計算した結果を示している。

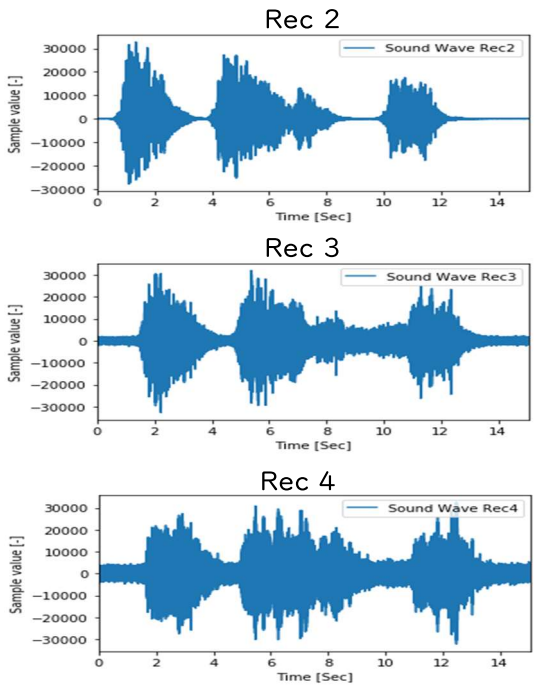


図 3.1.7　検出された音声信号の例

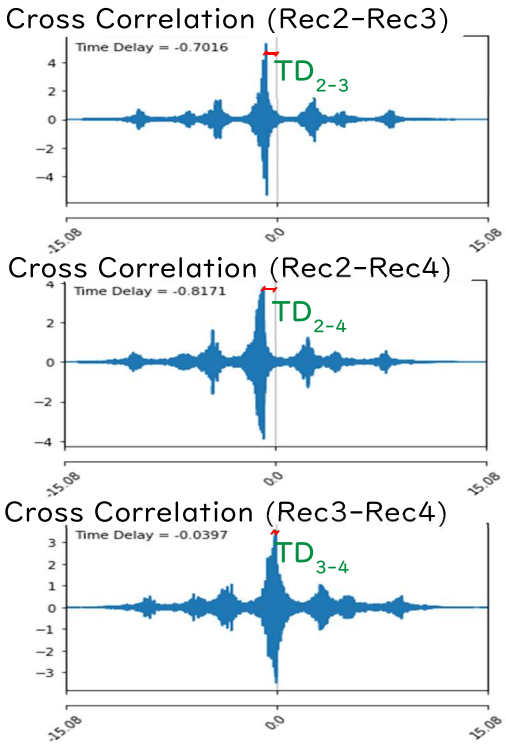


図 3.1.8　3 音源間の相互相関の計算結果

相互相関の計算結果は、どちらかのマイクロフォン位置を基準位置にしたときの音源からの時間差を明確に示しており、音速を一定と仮定すれば相対的な距離の差を示している。図の例では、上から順にマイクロフォン 3 を基準にしてマイクロフォン 2 は 0.7016 秒、マイクロフォン 4 を基準にしてマイクロフォン 2 は 0.8171 秒､マイクロフォン 4 を基準にしてマイクロフォン 3 は 0.0397 秒早く計測しているので、音源に近いと推測される。ただし、これらは相対的な差であるので、これを元に位置の更に計算をする必要が有る。

③－４　時間遅延に基づくシカの位置推定

3 音源の時間差を元に音源位置を推定するときの問題設定を図 3.1.9 に示す。音源を点音源と仮定すると、音は同心円上に広がっていくことになる。

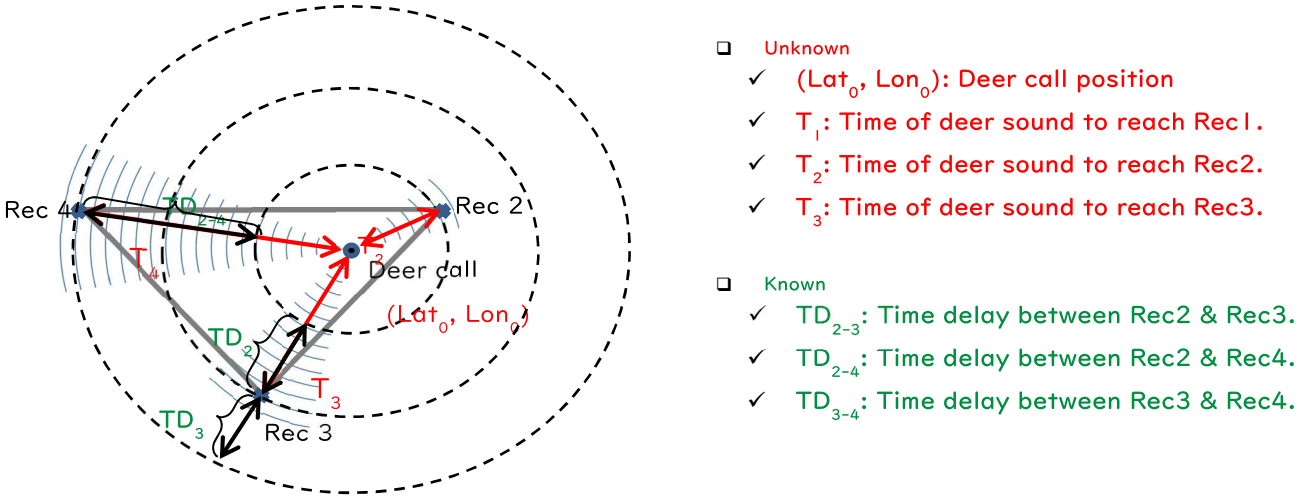


図 3.1.9　録音時間差からの音源位置の特定

未知のパラメータと既知のパラメータを整理すると、シカが鳴いた音源の位置は求めたいパラメータであり、各マイクロフォンから音源までの距離も未知である。一方で、各マイクロフォン間の距離は既知であり図 3.1.9 では各マイクの位置を同心円上に書くようにすると、同心円間の距離を示すことになる。整理すると、本当の未知数は音源から最も近いマイクと音源との距離だけが未知のパラメータとして残る。これを以下の最適化計算で解けば良い。

$$SAE = \sum |TD_i^* - TD_i|$$

- *SAE: Sum of Absolute Errors.*
- DT_i: is the time delay from cross correlation.
- TD_i^*: is the time delay from trial & error

実計測に基づく時間差と、解としての推定音源位置から計算される誤差を含む仮定の位置の差を誤差と定義して、上式の誤差が最小となる位置を求めればよいことになる。3 音源の場合には、次式のように書ける。

$$SAE = |TD_{1-2}^* - TD_{1-2}| + |T_{1-3}^* - T_{1-3}| + |TD_{2-3}^* - TD_{2-3}|$$

4．結果及び考察

（1）複数マイクロフォンの録音からのシカ音源位置推定結果

2018 年 9 月 14 日に人工的にシカの鳴声をつくれる笛を用いて、尾瀬の森林内に設置した 3 つのマイクロフォンから位置を推定した本手法の精度評価結果を図 4.1.1 に示す。

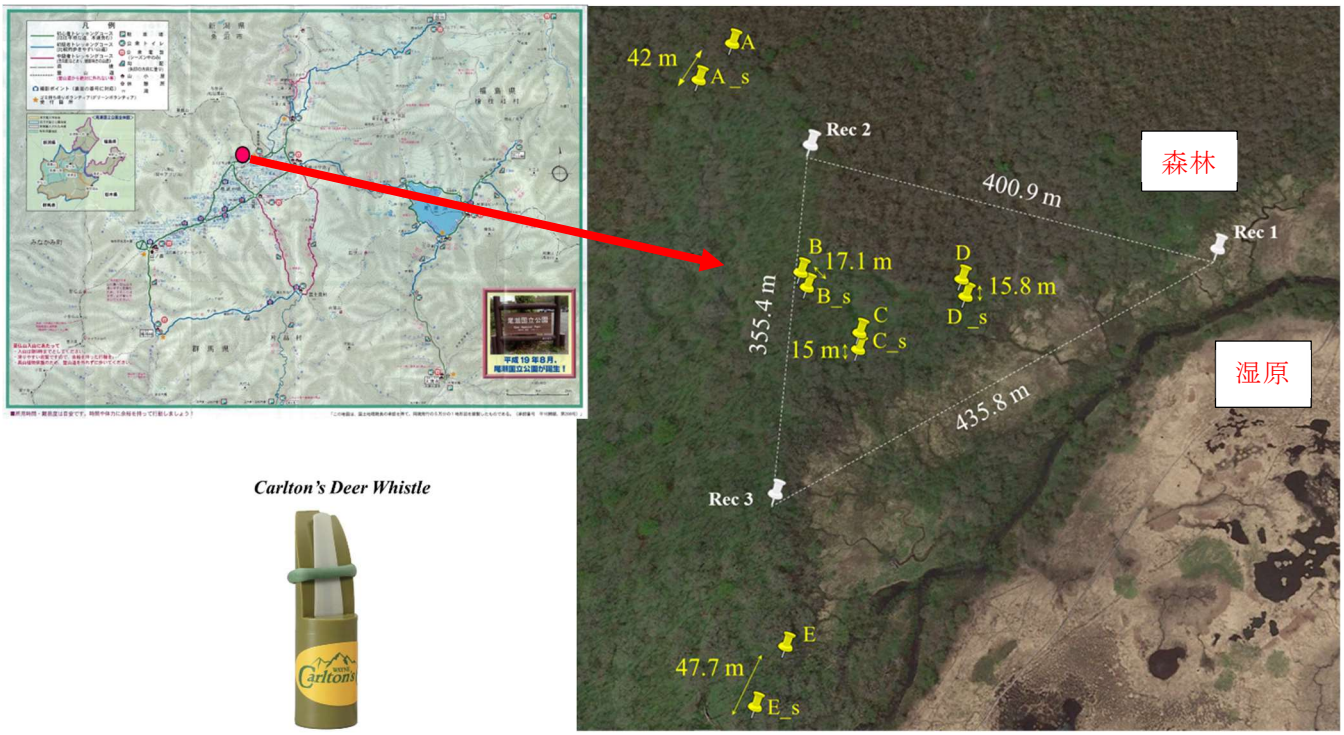


図 4.1.1　人工的にシカの鳴声をつくれる笛を用いた本手法の精度評価結果

図 4.1.1 より本手法は数十メートルの誤差を生んでいる。特に 3 つのマイクロフォンの外側の精度が悪いことが分かったが、本研究では野外で動物の位置を特定するには十分であると考えた（初年度、2 年目の研究目標を達成）。

最終年度の目標を達成するために、2019 年 9 月 26 日～28 日にかけて、湿原域に覆うように配置した 7 本のマイクロフォンで記録された音声データを元に、提案アルゴリズムを用いてシカの鳴き声の位置を推定した。4 日分の推定位置を加算的に表示して、その分布を可視化する。図 4.1.2 にその結果を示す。

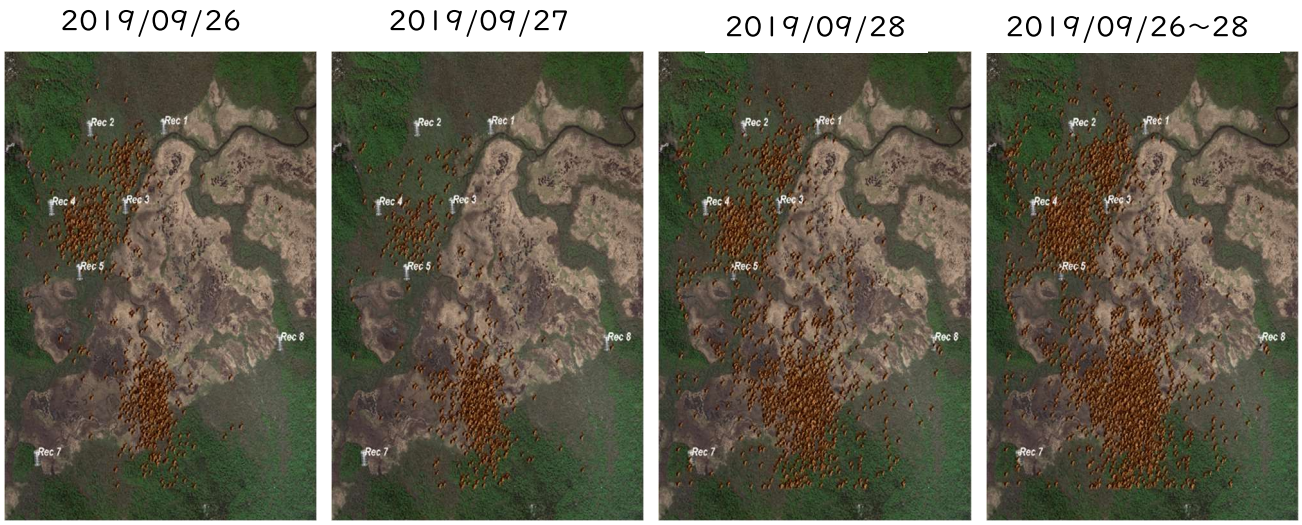


図 4.1.2　シカの鳴き声の位置を推定した結果

おおよそ 3 つ程度の一定範囲に分布が集中しているように見られる。この期間の 1 時間ごとのシカの鳴き声頻度をグラフ化したものを図 4.1.3 に示す。

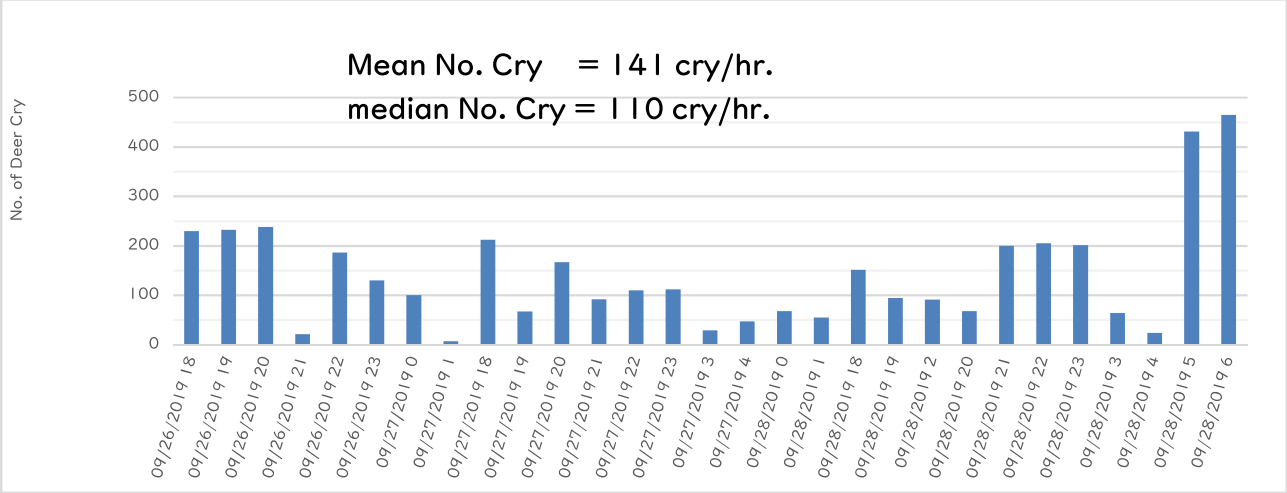


図 4.1.3　2019 年 9 月 26～28 日の間の尾瀬地域での 1 時間ごとの雄ジカの鳴き声頻度

1 時間ごとの雄ジカの鳴声の頻度は平均値 141 回、中央値 110 回であり、この山中ではこの季節、頻繁に雄ジカが鳴きあっていることが分かる。次に、一週間ほど後の 2019 年 10 月 4～14 日の鳴き声位置の推定結果との比較を図 4.1.4 に示す。

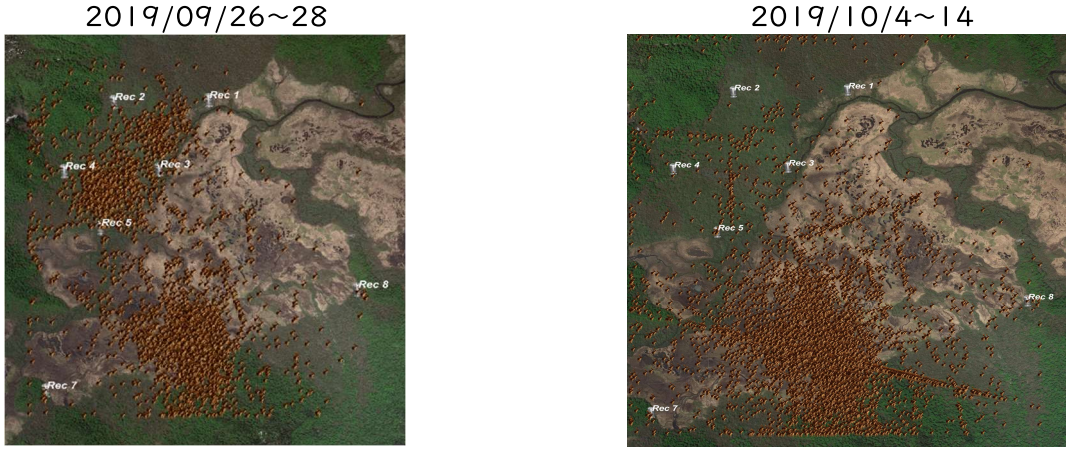


図 4.1.4　9 月末と 10 月初頭のシカの鳴き声検出位置の分布の比較

シカの生態的な理由は定かではないが、この一週間の間に大きく南へ分布が偏っていることが分かる。

最終年度では、湿原域全体において複数(7 本)のマイクロフォンからの録音データに基づいて音源位置を推定する方法を 2 年目までに得られた成果をもとに試みた。自然環境下特有のノイズが多いことと、長距離のマイクロフォン間距離という特殊なセッティングに最適化するために、フィルタリングの最適化を行い、ノイズや音量の変化にロバストな時間差を元に最適化計算によりリアルタイムに雄ジカの鳴いた位置を推定できる手法を開発した。推定される位置精度は数十メートルであるが尾瀬のような広域ではこの精度でも有効であると考えられる。

また、2019 年秋季に録音したシカ音声、データを元に山中でのシカの生態を可視化し、9 月末と 10 月初頭の分布を比較したところ、大きな違いがみられることを確認した。このような結果はシカの生態を把握するためには大変有効であるといえる。

また、本手法はシカばかりでなく多くの生物に応用できる。例えば、現在この手法は京都府亀岡市において、絶滅寸前種であるナゴヤダルマガエルの空間分布の把握に活用されている。すなわち、絶滅危惧種の把握に期待できるといえる。

（２）雄ジカの鳴声による尾瀬全域（湿原＋周辺森林域）のシカの生息数評価

ここでは、開発された雄ジカの位置推定手法とサブテーマ（3）の自動撮影カメラの観測範囲で得られた雄ジカの頭数および雄ジカに対する雌ジカと当歳の数の比率を用いて尾瀬全域のシカの生息数を推定する。

図4.1.5にサブテーマ（3）の 図4.3.5において設置された自動撮影カメラで観測された範囲内で、2019年9月26日～28日における本手法による雄ジカの鳴き声位置の推定結果と、この期間の1日ごとのシカの鳴き声頻度の結果を示した。

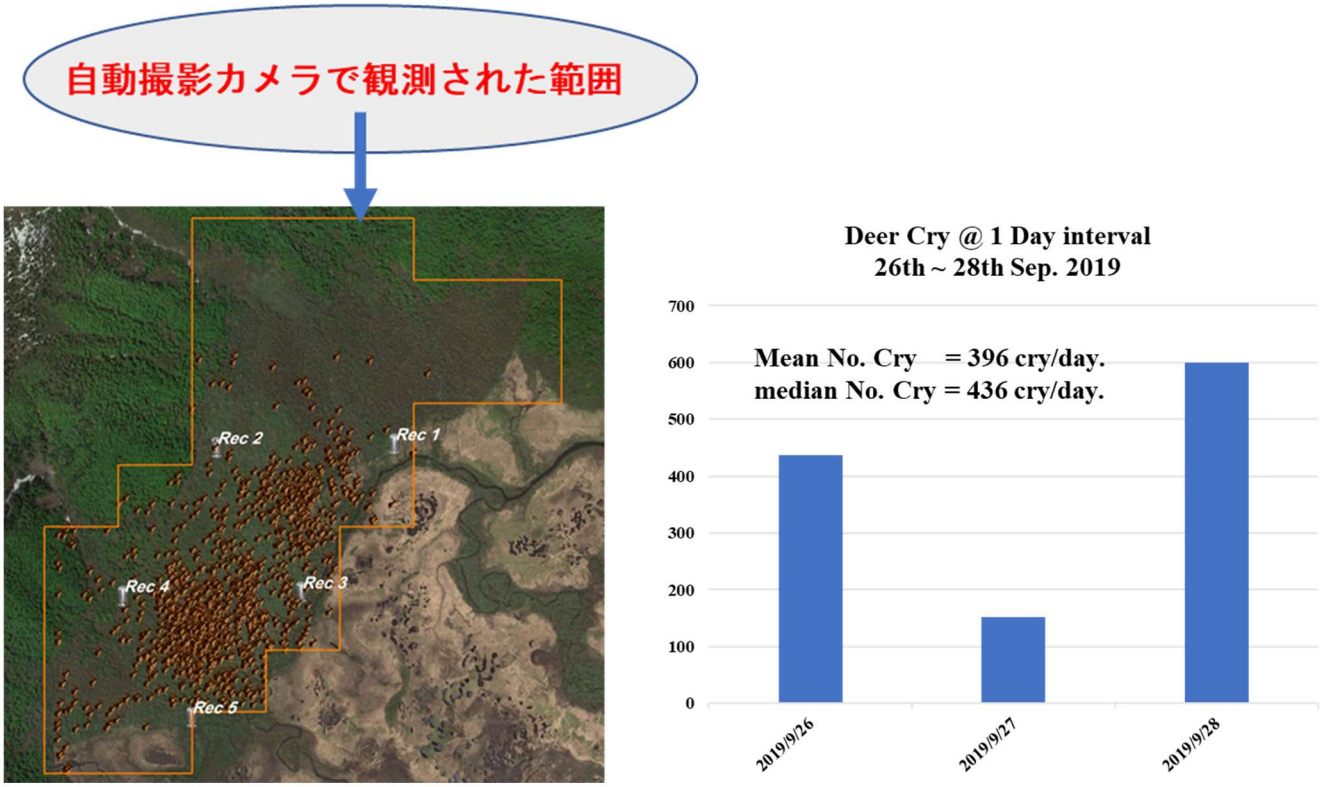


図4.1.5　自動撮影カメラで観測された範囲内で、2019年9月26日～28日における本手法による雄ジカの鳴き声位置の推定結果とこの期間の1日ごとのシカの鳴き声頻度の結果

図4.1.5より１日の雄ジカの鳴声の頻度は平均値396回であった。ここで、サブテーマ（3）の自動撮影カメラにより2019年9月26日～28日において観測されたデータからこの範囲内の雄ジカの頭数は12.69頭と推定されている。従って、１頭の雄ジカが１日に鳴く回数はおよそ29.1回と推測できる。一方、図4.1.6に湿原域における2019年9月26日～28日の雄ジカの鳴き声位置の推定結果と本手法によるこの期間の１日ごとのシカの鳴き声頻度の結果を示した。

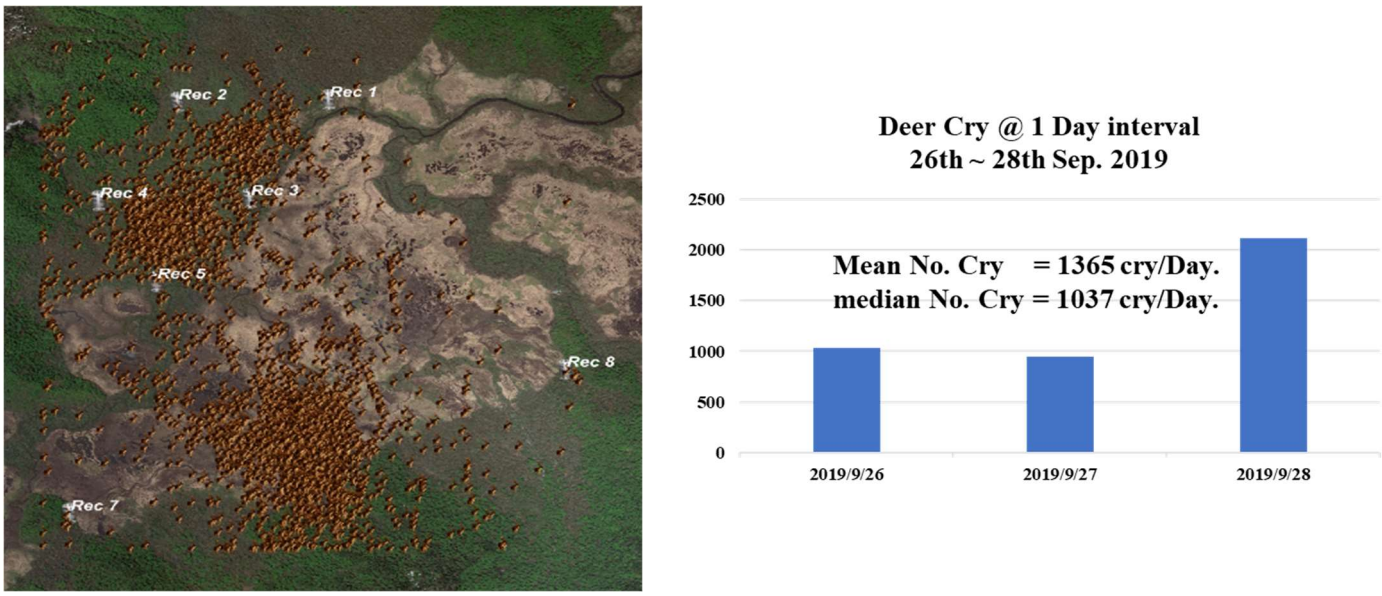


図 4.1.6　湿原域における 2019 年 9 月 26 日～28 日の雄ジカの鳴き声位置の推定結果と本手法によるこの期間の１日ごとのシカの鳴き声頻度の結果

図 4.1.6 より湿原域において、1 日の雄ジカの鳴声の頻度は平均値 1365 回であり、1 頭の雄ジカが 1 日に鳴く回数はおよそ 29.1 回であるとすると、湿原域での雄ジカの頭数は 46.9 頭と推定できる。ここで、サブテーマ（3）の自動撮影カメラの観測範囲で得られた雄ジカに対する雌ジカと当歳の数の比率は、3.0 である。従って、湿原域のシカの頭数はおよそ 188 頭と推測できる。また、１日ごとのシカの鳴き声頻度の最大と最小を考慮して計算すると、湿原域のシカの頭数は 177.6～305.1 頭と推定された。

ここで、サブテーマ（3）の図 4.3.9 と同じように尾瀬全域（湿原＋周辺森林域）を考えると、サブテーマ（3）より森林内に生息している個体数は 362.3 頭と推定されているので、尾瀬全域（湿原＋周辺森林域）のシカの頭数は 539.9～667.4 頭と推定された。

ここで、推定された尾瀬全域（湿原＋周辺森林域）のシカの頭数は、サブテーマ（3）の結果と多少重複して観測している箇所があるため多少過大評価している可能性があるが、全体の面積に対して小さいため、この数値で大きな問題はないと判断した。

また、サブテーマ（2）のシカの多くが森林域から湿原域に出てくる 5 月の推定結果と比較すると方法論が全く違うにも関わらずほぼ同じ頭数を推定しており本手法の有効性が示された。

以上より複数マイクロフォンによる尾瀬全域（湿原＋周辺森林域）のシカ個体数はおよそ 539.9～667.4 頭と結論付けられた。

ここで開発した複数マイクロフォンによるシカの個体数推定は、9 月～11 月の雄ジカの繁殖期の鳴声のデータをもとに実施された。この時期のシカは湿原内よりもその周りの山中に生息しているほうが多く、その場合、樹木等が邪魔しドローンの観測ではシカの個体数を把握することが難しいため本手法を活用が望まれる。また、尾瀬湿原以外の森林地域などでもシカの個体数の把握に有効であるといえる。

以上より複数マイクロフォンによるシカ個体の抽出法の確立、さらにサブテーマ（2）と（3）で検討している手法との融合によるシカの個体数推定が実施され、当初の本研究の最終年度目標が達成されたといえる。

今後の課題としては、長期的な観測によるシカの個体数推定の誤差評価と高精度化があげられる。特にシカの各個体の識別を鳴声から判別できればより高精度化につながると考えられる。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

- 複数マイクロフォンによりシカの鳴き声を観測し、そのデータから数理的手法により、シカの場所と生息数を評価する手法が提案され本研究の目標が達成された。これは、多数の人の中の会話からある特定の会話だけが聞こえる“カクテルパーティー効果”を実際のフィールド（尾瀬）に置き換え、シカの生息数を推定するという点が独創的である。
- 開発された雄ジカの位置推定手法の結果をもとに、サブテーマ（3）の自動撮影カメラの観測範囲で得られた雄ジカの頭数および雄ジカに対する雌ジカと当歳の数の比率を用いて（湿原＋周辺森林域）のシカの生息数推定を試みた。その結果、尾瀬全域（湿原＋周辺森林域）のシカの頭数はおよそ539.9～667.4頭と推定された。これは、サブテーマ（2）のドローン空撮とこれまでのライトセンサスの結果との比較により、ドローン空撮による結果とライトセンサスとの結果の関係を明らかにし、これまでのライトセンサスで最も発見数が多い5月の湿原全体の個体数を推定し、複数マイクロフォンの結果との比較により、その結果が妥当であることが確認され本研究の全体目標が達成された。尾瀬全域で初めてシカの頭数を明らかにした点で科学的に意義があるといえる。

（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＞

- 本研究の目標通り初年度、2年目で達成された複数マイクロフォンによる個体数推定手法は、シカ以外の動物の鳴き声をデータベース化しておくことにより、ある対象地域の動物の生息数や場所を特定できる点で応用範囲が広く、生物多様性の分野にとって有用性が高いといえる。
- 最終年度の目標通りに達成された複数マイクロフォンによるシカ個体数推定では、尾瀬全域のシカの個体数は、およそ539.9～667.4頭と推定され、ドローンによる個体数は、およそ470～696頭と推定された。マイクロフォンとドローンによるシカの個体数の推定原理は全く違うにも関わらずほぼ同じ推定結果が得られ、それぞれの手法の有効性が示された。今後、尾瀬においてこれらの手法の活用が期待される。

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) 牧雅康、奥村忠誠、沖一雄：日本リモートセンシング学会誌、受理.
ライトセンサスとドローン空撮によるシカ個体分布特定結果の比較
2) 【国際雑誌に投稿中】Salem Ibrahim Salem, Kazuhiko Fujisao, Masayasu Maki, Tadanobu Okumura and Kazuo Oki：Ecological Indicators, Detecting and tracking deer positions using sound recordings.(minor revision)

＜査読付論文に準ずる成果発表＞

1) 沖一雄、牧雅康、奥村忠誠、Salem Ibrahim Salem：日本リモートセンシング学会誌 39(5) 384-392 (2019)地上・リモートセンシングによる尾瀬ヶ原湿原におけるシカ個体数推定手法の開発プロジェクト.

＜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）

1) 沖一雄：第25回「野生生物と社会学」学会（2019）
「複数マイクロフォンによるシカ個体数推定手法の開発」
2) 峯岸優好、牧雅康・沖一雄・奥村忠誠：日本リモートセンシング学会第67回学術講演会（2019）
「ライトセンサス調査と比較した広域湿原におけるシカ個体数推定のためのドローン熱画像の有用性評価」
3) 沖一雄：野生生物と社会学会（2018）
「複数マイクロフォンによるシカ個体数推定手法の開発」
4) 沖一雄：平成30年度尾瀬・日光シカ対策ミーティング（2018）
「地上・リモートセンシングによる尾瀬ヶ原湿原におけるシカ個体数推定手法の開発」
5) 峯岸優好、牧雅康、沖一雄、長谷川匡：日本リモートセンシング学会だ65回学術講演会（2018）
「シカ個体抽出を目的とした機械学習のための超解像処理を適用したドローン熱画像の有用性評価」
6) 牧雅康、峯岸優好、長谷川匡、沖一雄：日本リモートセンシング学会第64回学術講演会（2018）
「シカ個体抽出を目的とした超解像処理ドローン熱画像の有用性の評価」

（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) 沖一雄：京都先端科学大学（高校生訪問）(2020年)「ドローンは凄い！」
2) 沖一雄：京都先端科学大学オープンキャンパス(2019年)「ドローンは凄い！」
3) 沖一雄：東京大学生産技術研究所（生研公開）(2019年)「我が国の農業再生及び地方創生のために必要な最先端技術」
4) 沖一雄：関西ネットワークシステム(2019年)「ドローン＋センシングの未来」
5) 沖一雄：尾瀬ボランティア総会（2019年）「地上・リモートセンシングによる尾瀬ヶ原湿原におけるシカ個体数推定手法の開発」
6) 沖一雄：京都亀岡近未来技術地域実装協議会・京都学園大学総合研究所連携セミナー（2019年）「付加価値情報を生み出すためのドローンセンシング」
7) 沖一雄：食料生産技術アカデミー（2019年）「ドローンセンシングから付加価値情報を抽出すためには －何が課題でどうする?－」
8) 沖一雄：第9回食料生産技術研究会（2018年）「地上・リモートセンシングによる尾瀬ヶ原湿原におけるシカ個体数推定手法の開発」

（５）マスコミ等への公表・報道等

1) 京都新聞（2020年4月28日、丹波版、18頁、「リモートセンシング（農工連携で技術革新）」）
2) 【国際雑誌アクセプト後東京大学からプレスリリースの予定】「“フィーヨフィーヨ”特徴的な鳴き声とドローン画像からシカの時空間分布を推定～環境を荒らさずに害獣や希少動物を調査～」

（６）その他

特に記載すべき事項はない。

８．引用文献

特に記載すべき事項はない。

Ⅱ－２　リモートセンシング画像によるシカ個体数推定手法の開発

福島大学農学群食農学類　　牧　雅康

平成29年度～令和元年度研究経費（累計額）：21,033千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成29年度：7,130千円、平成30年度：6,773千円、令和元年度：7,130千円）

［要旨］
シカの頭数を管理するためには、個体密度を推定する必要があり、そのための手法が求められているのが現状である。本課題では、UAV（ドローン）に搭載したカメラで得られたリモートセンシング画像を用いたシカ個体数推定手法の開発のため、効果的な飛行経路の設計や用いる機体の選定、撮影画像の処理方法について検討した。さらに、解析補助データとしての利用を考えている昼間の植生被害域推定用の画像の取得方法についても検討した。その結果、尾瀬ヶ原では、複数の回転翼ドローンを用いた空撮が効率的であり、空間解像度が10 cm程度になるように撮影することが望ましいことが分かった。さらに、空撮画像からシカを抽出する際、判読者によって結果が異なることが分かり、抽出には客観的な判断が必要であることが分かった。客観的な判断による抽出のため、深層学習モデルを用いた抽出法を検討した。その結果、自動抽出の前処理として、画像に対して超解像処理を施すことで、より信頼性の高い抽出結果を得られることが分かった。さらに、従来法であるライトセンサスとの比較により、尾瀬ヶ原ではライトが届かない場所にシカが多く出現していたことが分かり、ドローンによる空撮の有効性が確認できた。

［キーワード］
UAV(ドローン)、リモートセンシング、熱赤外画像、深層学習

１．はじめに

現在、シカの個体数の把握手法として、観測者がライトを進行方向の両側を照らしながら対象動物の位置と頭数を確認するライトセンサスや、糞塊や糞粒の密度を調べて個体密度を調査する糞塊調査や糞粒調査等が主流であり、対象地域が狭く、人の移動が困難な本報告の対象地である尾瀬ヶ原においては、木道を用いたライトセンサスが15年以上継続して行われている。ライトセンサスのメリットとして、用いる機材の調達が容易であることが挙げられるが、デメリットとして調査実施者の経験値が重要であることやライトの光が当たらないエリアのシカを見つけることが出来ないことが挙げられる[1)]。そのため、尾瀬ヶ原では、ライトセンサスによって得られた成果は経時的な頭数の変化を表す指標として利用されている。しかし、シカの頭数を管理するためには、個体密度を推定する必要があり、そのための手法が求められているのが現状である。

近年、ドローンの登場により、野生動物管理や獣害対策でのドローンの利用が期待されている[2)-5)]。さらに、ドローンに搭載可能な小型のサーモカメラが登場したことにより、ライトセンサスと同様に夜間の動物の生態調査におけるドローンの利用についても模索されている[6)]。しかし、サーモカメラ搭載のドローンを用いた調査の現状は、対象動物が出現すると思われる場所を空撮し、操縦者が目視で撮影画像を確認して対象動物であるかどうかを判断している。この方法は、尾瀬ヶ原のような広大な土地を対象とする場合は非効率であり、効率的な個体数調査に用いるための検討課題は多い。

以上を踏まえて、広域におけるドローン熱画像空撮によるシカ個体数の把握を実施し、ライトセンサスと比較することにより、ドローンによる熱画像空撮によるシカ個体数把握手法としての有用性を明らかにすること、さらには、空撮によって得られた画像からシカを抽出する方法について検討することが、ドローンを用いた空撮によるシカの個体調査手法の確立に必要であると考えられる。

２．研究開発目的

サブテーマ（2）では、尾瀬ヶ原でこれまで実施されている従来法（ライトセンサス）では困難である尾瀬ヶ原全域の調査と領域内のシカ個体数推定を可能にするため、ドローンに搭載したサーモカメラ画像を用いたシカ個体数推定手法の開発を目的とした。そのため、以下について検討した。

① 用いる機体の選定と効果的な飛行経路の設計
② 撮影画像の処理方法の検討
③ 従来法との調査結果の比較

さらに、以下についても検討した。

④ 個体数推定の補助データとしてのマルチスペクトルカメラ搭載ドローン画像の利用の検討

３．研究開発方法

用いる機体の選定と効果的な飛行経路の設計については、以下の手順で検討した。

① 各種ドローン（回転翼・固定翼）の離発着可能な場所の確認と、対象領域内の植生の把握のための現地の下見
② シカ抽出のための画像解像度の検討
③ 上記結果をもとに作成したフライトプランを用いた夜間の試験空撮の実施

具体的には、回転翼のドローンとして、市販のサーモカメラであるZemmuse XT（DJI、China）が搭載可能で、自動航行も可能な機体であるMatrice200（DJI、China）とInspire（DJI、China）を候補とした。固定翼のドローンとしては、入手のし易さ、自動航行の可否、重量を総合的に考慮してeBee+（SenseFly、Switzerland）を候補とした。そして、これらの利用を念頭に離着陸可能な場所の確認と画像の解像度の検討を行い、この結果を効果的に反映させるためのルート設計を行い、試験空撮で得られた結果を確認した。解像度の検討については、常時シカの空撮が可能な宮城県石巻市の金華山において、様々な高度から複数のシカを撮影し、その画像を用いて行った。

これらの検討によって作成した最終的なフライトプランを用いた空撮画像の処理方法については、以下の手順で検討した。

① 夜間の熱画像中のシカ抽出手法の検討（目視・オリジナル画像の比較）
② 自動抽出精度向上のための前処理法の検討（オリジナル・超解像度処理の比較）

具体的には、上述の飛行高度で得られた画像を数名で目視抽出を行い、その差異を確認した。次に、画像中のシカの自動抽出を目的として、近年、GoogleのTensorFlowなどの登場により注目されている深層学習を用いてシカ抽出モデルを作成し、その抽出精度を確認した。そして、自動抽出の高精度化を目的として、自動抽出モデルを適用する前の画像に対する超解像処理の有効性について検討した。ここで、深層学習を用いた物体抽出法として、手法の利用が容易で抽出精度が高く、かつ計算機への負担が少なくて処理速度が速いKeras-Yolo v3[7)]を用いた。また、超解像処理アルゴリズムとして、RAISR[8)]を用いた。どちらも無料で公開されているものであり、学習用の画像を用意することで、独自のモデルを学習することが可能である。

次に、本課題で提案するドローンを用いた空撮法の有効性や活用方法について、以下の手順で検討した。

① ドローン空撮と同期したライトセンサスの結果との比較による個体数や空間分布の比較
② 過去のライトセンサスの結果と同時期に実施したドローン空撮結果の個体数の比較
③ 個体数の比較から得られた知見に基づく対象領域内の個体数推定

具体的には、尾瀬ヶ原でこれまで実施されているライトセンサスとの差異を確認するため、ライトセンサスの日程に合わせて空撮を行い、それぞれで発見したシカの個体数と空間分布について比較した。次に、これまでに実施されたライトセンサスと同時期の空撮で発見できた個体数についても比較し、両手法の差異の傾向の有無を確認した。そして、その傾向をもとに頭数が最高となる時期の頭数をライトセンサスの結果から推定した。

最後に、マルチスペクトルカメラを搭載したドローンによる昼間の空撮も実施し、シカの個体数推定

の補助データとしての利用について検討した。なお、ドローンは、広範囲を1回の飛行で空撮可能なeBee+（SenseFly、Switzerland）を用いた。ドローンに搭載したマルチスペクトルカメラは、緑から近赤外域の波長帯（緑、赤、レッドエッジ、近赤外）の観測が可能なSequoia（Parrot, France）を用いた。

４．結果及び考察

（１）用いる機体の選定と効果的な飛行経路の設計

尾瀬ヶ原のような対象が広範囲となる場所を効率的に空撮するため、1回の飛行時間は15分から20分程度である離着陸のスペースが狭くて済む回転翼のドローン（Matrice 210とInspire 1）と、1回の飛行時間は1時間程度であるが、離着陸のスペースが必要となる固定翼のドローン（eBee+）を対象に、尾瀬ヶ原に適した機体の選定を実施した。その結果、固定翼ドローンで必要となる胴体着陸の場所が尾瀬ヶ原にはほとんどないことが分かった。さらに、固定翼ドローンの離陸はスペースを必要としないが、向かい風が吹いていることが望ましく、空撮を行う夜間の時間帯は、尾瀬ヶ原ではほとんど風が吹かない時間が長く続くことが多かった。このことから、研究計画の段階では、広範囲を1回の飛行で空撮可能な固定翼ドローンの使用が適していると考えていたが、上述の制約があるため回転翼のドローンを用いることが好ましいことが分かった。

次に、市販のサーモカメラであるZemmuse XT（DJI、China）を搭載した回転翼ドローン（Matrice 210とInspire 1）の利用を前提とし、効果的な空撮が可能な飛行経路の設計のため、様々な高度で撮影したシカの輪郭について確認した。さらに、設定した高度での撮影時のシカの移動について確認した。その結果、シカの動きを攪乱せずに目視および後述する超解像処理を行うためには、10cm程度になるように高度設定することが必要であることが分かった。そして、この解像度を維持して安全な空撮を行うためには、尾瀬ヶ原の空撮場所によって高度を変える、すなわち、使用するレンズの焦点距離を変える必要があることが分かった。図4.2.1は、これらの検討によって決定した最終的な飛行エリアである。図中の北側の領域では、山の斜面の樹木にドローンが衝突しないように19 mmレンズの

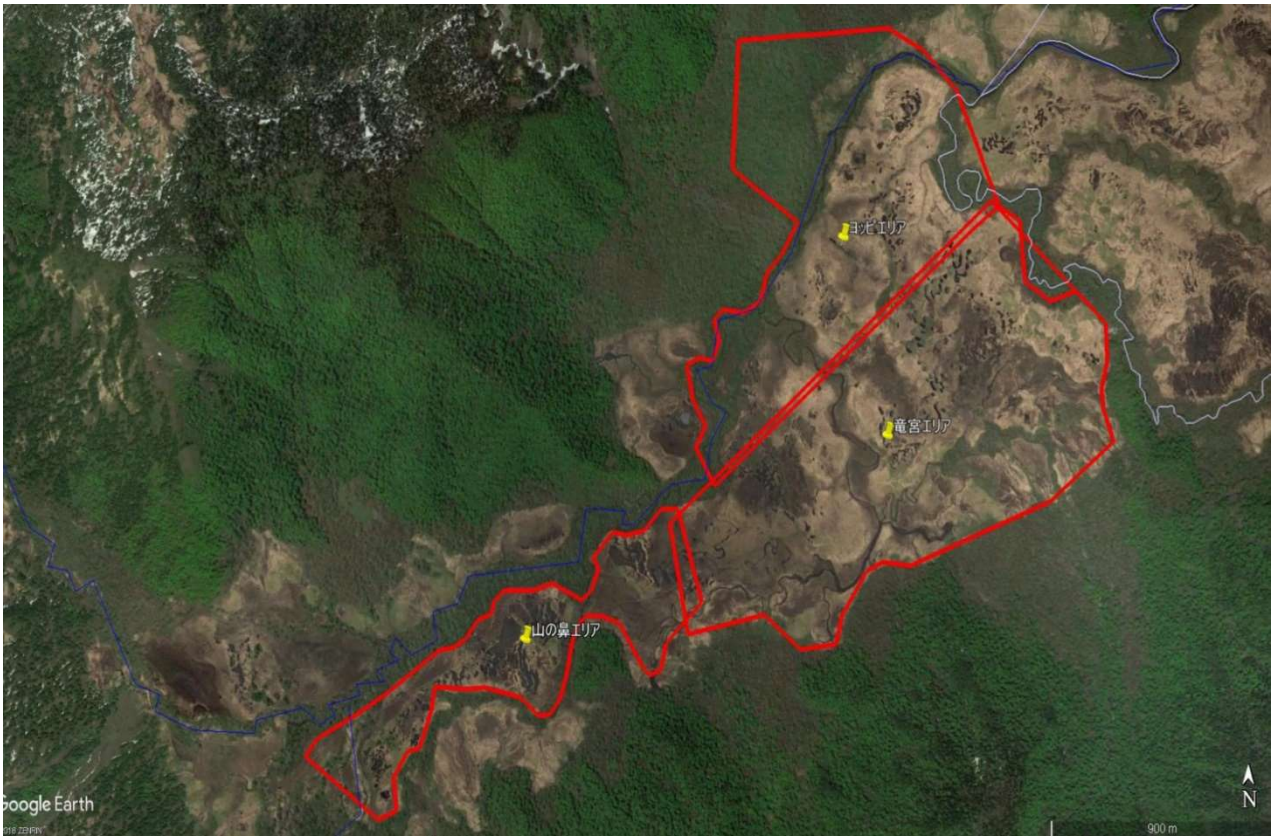


図4.2.1　ドローンの空撮範囲

サーモカメラを搭載したドローンを用いて、解像度が10 cm程度になるように高度100 mmから空撮を実施した。それ以外の領域では、9 mmレンズのサーモカメラを搭載して、高度50 mから空撮を実施した。また、空撮は、ある一か所でドローンの離発着を行うのではなく、ドローンと一緒に操縦者も木道を移動し、バッテリーの残量が少なくなった場合は近くの木道上に降ろしてバッテリーを交換し、その場所から空撮を再開する方法をとることが、短時間で空撮を終わらせるために有効であると考えた。そのため、図中の各飛行エリアは、操縦者が木道を移動しながら空撮を行うことを前提に設計した。なお、シカの移動による重複カウントの可能性をできる限り排除するため、空撮時の飛行経路間のラップ率（撮影された画像の左右の重なりの程度）を10 %として短時間で広範囲の撮影を行った。撮影経路上の写真間のラップ率（撮影された画像の上下の重なりの程度）は、経路上でのシカの移動の詳細が追跡できるように85 %に設定した。解像度が10 cm程度になるように撮影したシカ画像の例を図4.2.2に示す。この画像から、解像度10cm程度であれば、多少ぼやけているが目視でシカの大きさや姿勢の判断が可能であることが分かる。これにより、研究目標のひとつであったドローン画像の取得方法の提案については概ね達成できたと考える。

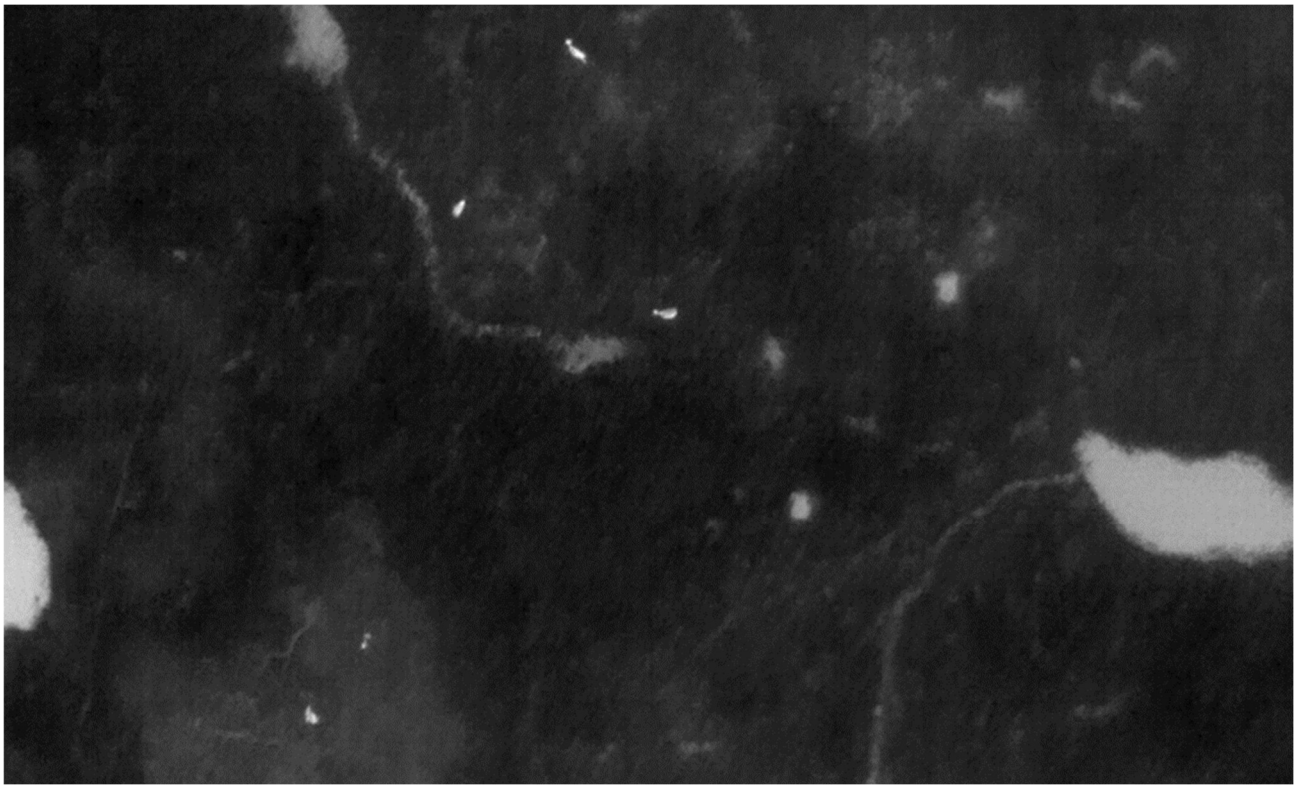


図4.2.2　ドローンによる空撮画像の例

（２）撮影画像の処理方法の検討

上述の飛行計画で得られた画像を、数名でそれぞれ目視判読を行った。その結果、解像度10cm程度の画像を対象とした場合、目視でも人によって結果が異なることが分かった。このことから、判読者の主観によらない方法、すなわち、ある基準に基づいた自動抽出方法の確立が必要であることが分かった。なお、目視判読に用いた画像は、2019年8月5日から6日、6日から7日の夜間に実施した空撮で得られた画像6487枚で、目視は空撮の後日に屋内でモニタに写真を映して、一枚ずつシカの有無を確認した。

次に、深層学習による物体抽出法のひとつであるYolo-Keras v3を用いて尾瀬ヶ原のシカ抽出モデルの学習を行った。この際、2018年6月と7月、10月に実施した空撮で得られた画像中に写っていたシカのうち、形状や大きさに留意して選んだシカを教師データとして学習を行った。なお、学習には732頭のシカ画像を用いた。図4.2.3は、学習に用いたシカ画像の例である。この図から、尾瀬ヶ原のシカを自動で抽出するためには、予め様々な形状のシカを学習させる必要があることが分かる。この

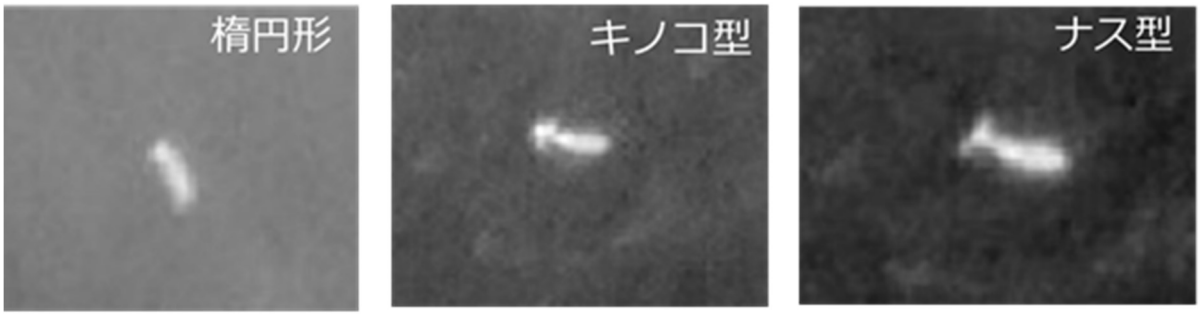


図4.2.3　学習に用いたシカの形状の例

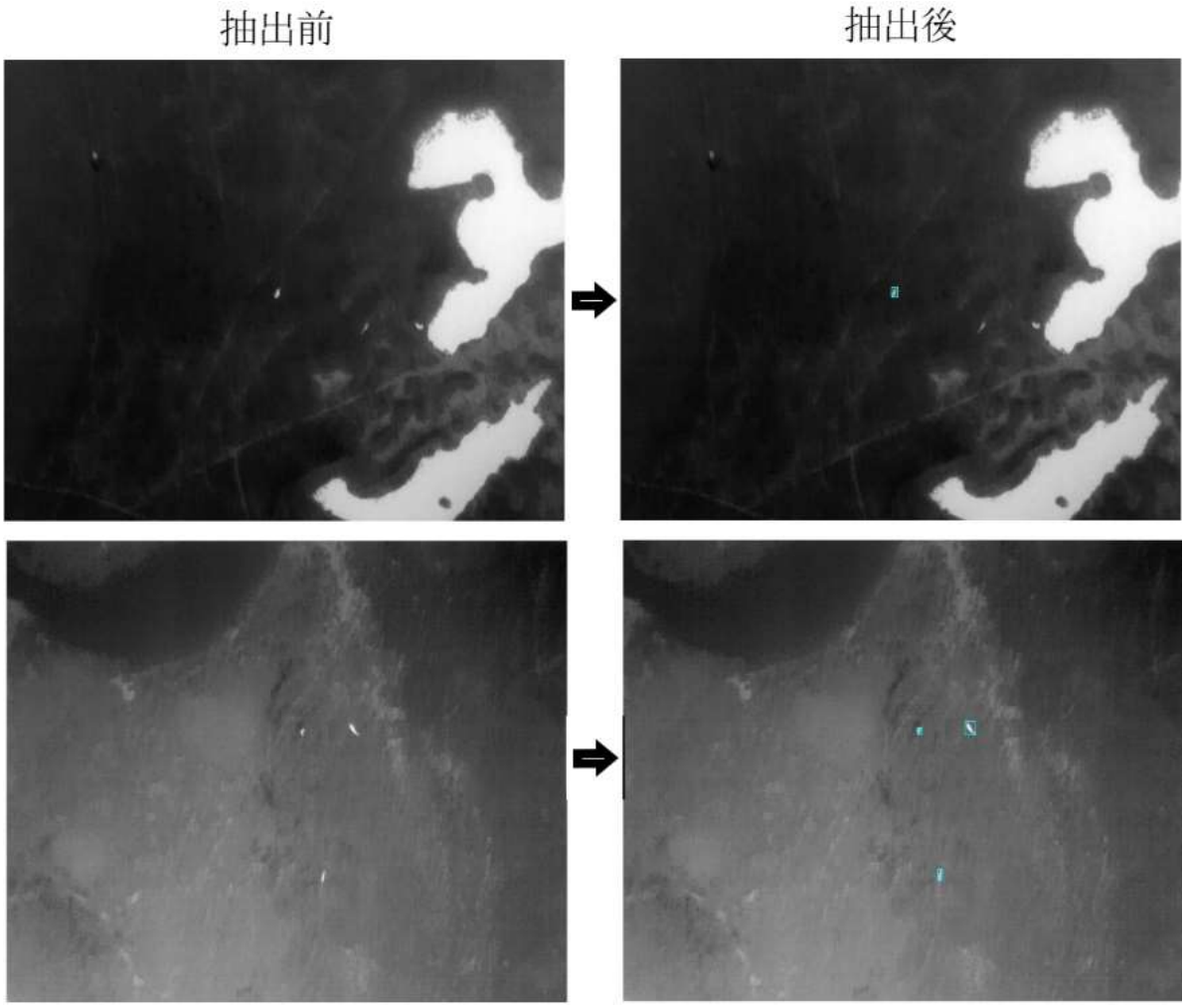


図4.2.4　深層学習モデルによる自動抽出の例

学習済みのモデルを用いて、目視判読に用いた画像のシカ抽出を行った。対象とした画像は、2019年8月5日から6日と、6日から7日の夜間に撮影された画像6487枚に対して行った。その適用例を図4.2.4に示す。この図から、画像によってシカの抽出率は異なることが分かる。表4.2.1は、目視判読で抽出した個体数との比較結果である。この表から、自動抽出による結果は、目視で抽出した個体の65.5%しか抽出できておらず、また、誤ってシカとして抽出したものは17.3%であった。深層学習による自動抽出の精度向上のためには、学習に用いる教師画像を増やすことが一般的であるが、本課題で対象としている“夜間のシカの熱画像”はこれまであまり収集されていないものであり、教師用の枚数を増やすことは困難であった。また、用いる抽出手法を変更することも一つの手段と考えられるが、抽出精度や計算機への負担、処理速度の観点から、抽出手法を変更することは問題の解決にはならないと考えられる。なお、比較対象の目視判読の結果は、4名の目視判読の結果を総合的に判断し

表4.2.1　目視による結果と深層学習モデルを用いたシカ抽出数（超解像処理前）との比較

	超解像処理前の画像を用いた場合	
目視による抽出数 （頭）	シカ 上段：抽出数 下段：抽出率	シカ以外 上段：抽出数 下段：誤抽出率
1858	1218 65.5%（1218/1858*100）	255 17．3%（255/（1218+255）*100）

て決定したものである。

そこで、近年、深層学習の精度向上の前処理として期待されている超解像処理の利用について検討した。本課題では、機械学習による超解像処理手法であるRAISRを用いた。これを用いた学習には、高解像度画像が必要となるが、ここでは、2018年3月と2019年3月に金華山で低高度撮影したシカ画像を教師データとして使用した。超解像処理前後の画像を、それぞれ図4.2.5に示す。この図から、超解像処理を施すことで、画像中のシカの輪郭が強調され、目視でも識別しやすくなることが分かる。次に、超解像処理後の画像を用いて再度学習を行った。なお、教師データは、超解像処理前のモデルで用いた画像に対して超解像処理を施したものである。この再学習したモデルによる自動抽出を、超解像処理を施した2019年8月5日から6日、6日から7日の夜間に実施した空撮で得られた画像6487枚に対して行った。その結果は、表4.2.2に示す通りである。この表から、超解像処理画像を用いた自動抽出の結果は、目視で抽出した個体の約60%しか抽出できておらず、超解像処理前よりも減少した。また、誤ってシカとして抽出したものは約6%であった。これは、超解像処理前よりも改善される結果となった。抽出数が減少した理由については今後の検証が必要であるが、誤抽出が減少した理由としては、超解像度処理によって、シカとそれ以外の輪郭や温度分布の差が明確になったことが考えられる。図4.2.6は、超解像処理によって誤抽出されなくなった物体の例である。超解像処理は、画像に写り込んだ操縦者をシカとして抽出した場合が多かったが、超解像処理後の画像では、ほとんど抽出されなかった。これらのことから、本課題においては、シカ抽出のための画像に前処理として超解像処理を施すことは、シカの抽出率自体は向上しないが、抽出された物体がシカであった確率は向上

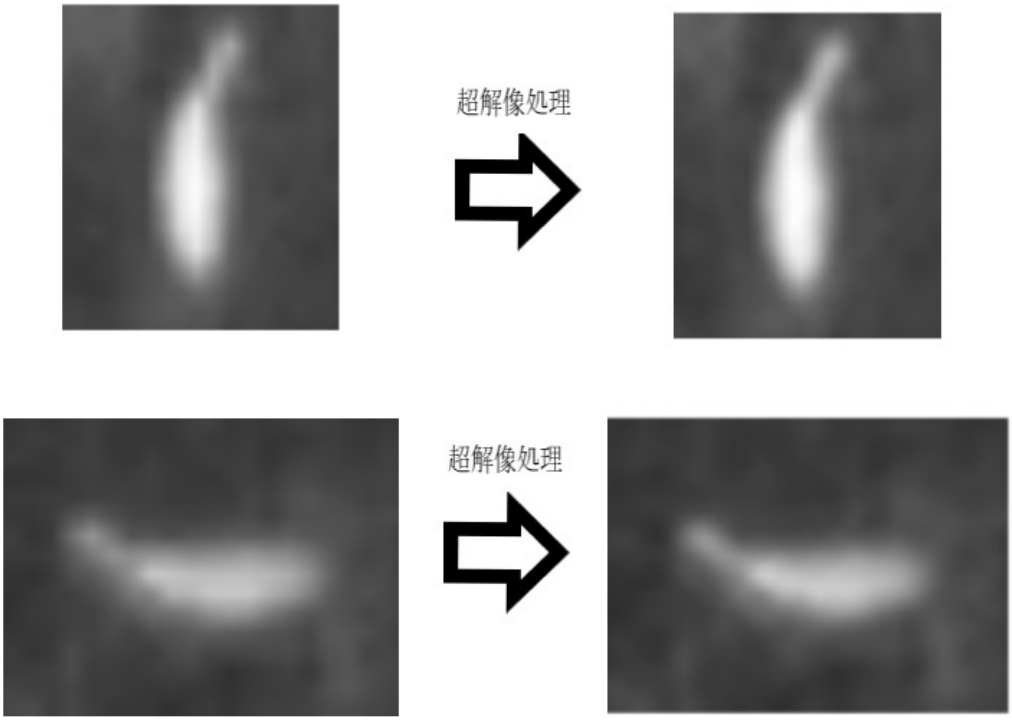


図4.2.5　超解像処理前後の画像の比較

表4.2.2　目視による結果と深層学習モデルを用いたシカ抽出数（超解像処理後）との比較

	超解像処理後の画像を用いた場合	
目視による抽出数 （頭）	シカ 上段：抽出数 下段：抽出率	シカ以外 上段：抽出数 下段：誤抽出率
1858	1086 58.4%（1086/1858*100）	71 6.1%（71/（1086+71）*100）

図4.2.6　超解像処理前の画像でシカとして誤抽出された物体（操縦者）の例

することが分かった。なお、今回は温度画像（フローティング型）に変換する前のバイナリ型の画像を用いた。その理由は、尾瀬ヶ原の1回の空撮では約3250枚の画像が撮影されるため、解析に用いる画像サイズを抑えることが処理時間の短縮に必要であったためである。今後は、学習に用いる教師データを増やすこと、または、少ない教師データでも精度の高い学習が可能と言われている脳型AIの利用についても検討する必要があると考える。このように、目標のひとつであった画像中のシカ抽出法方法の開発については、高精度な方法の提案には至らなかったが、今後の方向性や課題について示すことができたと考える。

（３）ライトセンサス（従来法）との調査結果の比較

ライトセンサスが実施された2019年8月5日に、ドローンによる夜間の空撮を実施した。ドローンによる空撮は、ライトセンサスに影響を与えないようにライトセンサスの状況を確認しながら実施した。なお、空撮方法は、上述の通りである。ライトセンサスの観測者およびドローンによる空撮の操縦者は、湿原内の木道を移動し、それぞれの調査を実施した。図4.2.7の黒の破線はライトセンサス

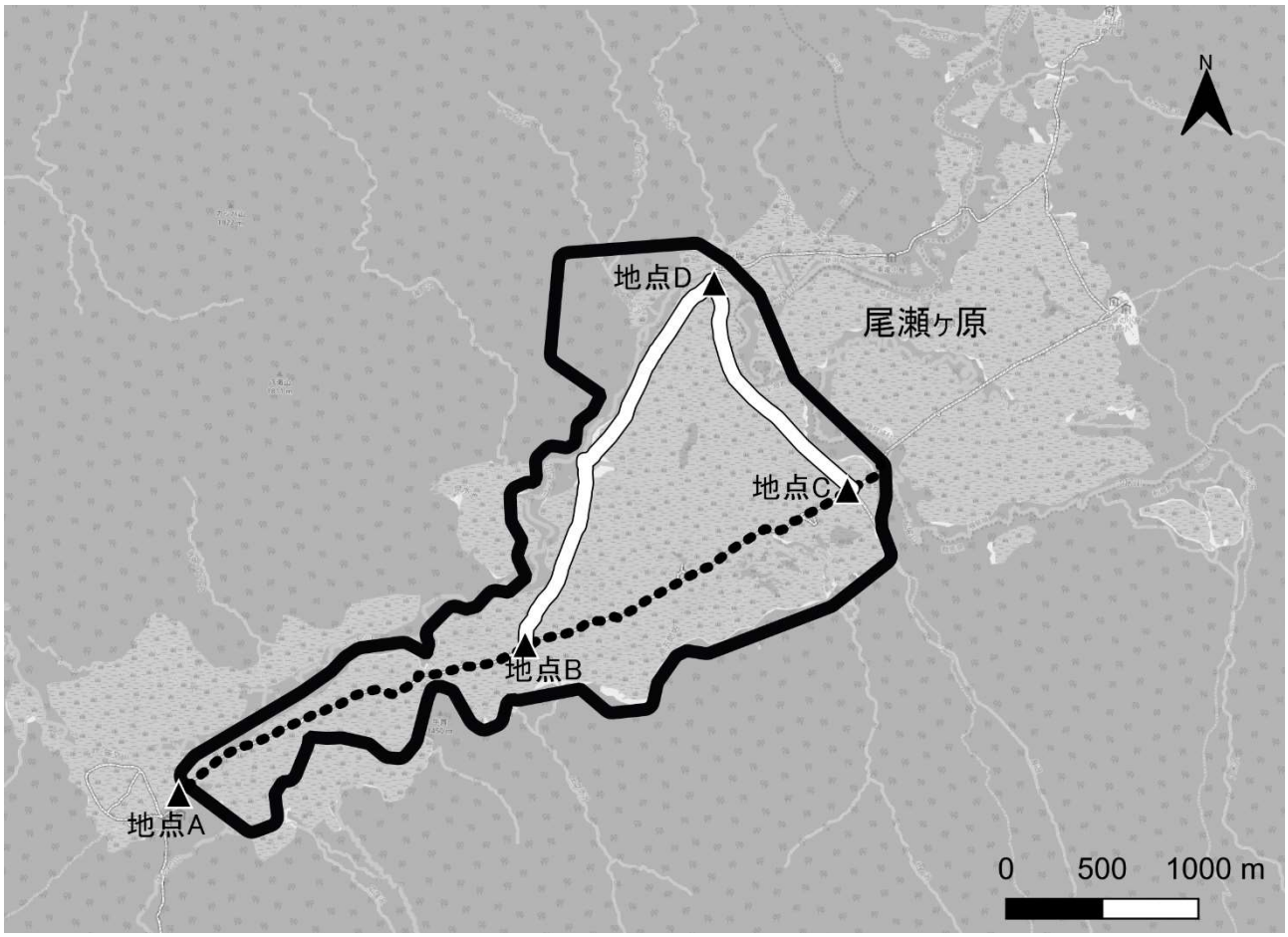


図4.2.7　ライトセンサスおよびドローンによる空撮の調査ルート

表4.2.3　ライトセンサスとドローン空撮の各地点の通過時刻

調査方法	上段：調査ルート 下段：通過時刻				
ライトセンサス	地点A 19時45分	⇒	地点B 20時30分	⇒	地点C 21時35分
ドローン空撮 （機体1：19 ㎜レンズ装着）	地点A 21時7分	⇒	地点B 22時14分		
	地点D 23時7分	⇒	地点B 25時37分		
ドローン空撮 （機体2：9 ㎜レンズ装着）	地点C 23時15分	⇒	地点B 26時5分		

のルートを示し、白の実線はライトセンサスのルートではないが、通行可能な木道を示したものである。図中の地点A、B、CおよびDは、後述の通過地点を表すものである。表4.2.3は各調査法の湿原内の調査ルートと木道上のポイント（A、B、C及びD）の通過時刻を示したものである。ライトセンサスは19時45分に地点Aを出発し、地点Bを通過して21時35分に地点Cに到着した。この間の調査時間は1時間50分である。ドローンによる空撮は、ライトセンサスへの影響を考慮し、ライトセンサスの開始時刻の約1時間20分後に地点Aから地点Bに向かって空撮を実施した。なお、空撮は、操縦者も機体の進行方向に共に移動し、バッテリー残量が少なくなった時点で、その近辺の木道上に着陸させてバッテリーを交換し、その地点から空撮を再開して空撮を行いながら地点Bまで移動した。この間の空撮時間は、バッテリーの交換を含めて約1時間10分であった。地点Bまでの空撮が終了した後に、地点CとDからのそれぞれの空撮を同時に行うため、一旦地点Aの近くの施設に戻ってバッテリーを充電した。

充電完了後、2班に分かれて、それぞれ地点CとDからの空撮を実施して地点Bに向かった。空撮方法は、地点AからBの方法と同様である。この間の空撮時間は、機器の接続トラブルによる中断も含めて、それぞれ約2時間30分と2時間50分であった。

熱画像から目視によって確認できたシカの位置情報を、ライトセンサスによる結果に重ねたものを図4.2.8に示す。図中の数字は、それぞれの調査法で確認できたシカの頭数を示す。シカの総数はライトセンサスでは42頭で、ドローンによる空撮では191頭であり、対象地域全域においてドローンによる空撮はライトセンサスの約4倍の頭数を発見できた。また、両手法で発見したシカの分布も大きく異なっていた。これらの発見できた頭数に差が生じる理由として、当然ではあるがドローンによる空撮は湿原全域が調査対象であるのに対して、ライトセンサスでは木道に沿った一定の範囲しか調査対象となっていないことが第一に挙げられる。また、ドローンによる空撮とライトセンサスの実施時刻の差は、短い場所で1時間30分程度、長い場所で5時間30分程度あり、このことも頭数や分布の差異に影響していると考えられる。なお、ライトセンサスで最も離れた位置で確認できたシカまでの距離は約300 mであった。この距離は、木道からそれぞれのシカまでの最短距離を算出し、その中で最も長かった距離である。このことから、ライトセンサスでは図4.2.9の灰色で示す範囲（2.8 km^2）には光が届いていたと考えられる。これから単位面積当たりの調査時間を算出すると、ライトセンサスとドローンによる空撮はそれぞれ約40分/km^2（110分/2.8 km^2）と約70分/km^2（70分/0.9 km^2）であった。これから、調査効率はライトセンサスの方が2倍程度高いことが分かった。しかし、図4.2.9の灰色のライトセンサスの調査範囲において、ドローンで発見できたシカの頭数は91頭である。この頭数は、ライトセンサスの約2.2倍である。空撮時の重複の可能性や調査時刻が異なることを考慮しても、ドローンによる空撮時に対象領域内のシカが移動したため発見できた場所が変わることは考えられるが、シカの頭数がライトセンサス時の約2倍になるとは考えにくい。よって、これは、用いる手法により頭数管理に必要な個体密度が大きく変わることを意味する。ライトセンサスは、ライトを照

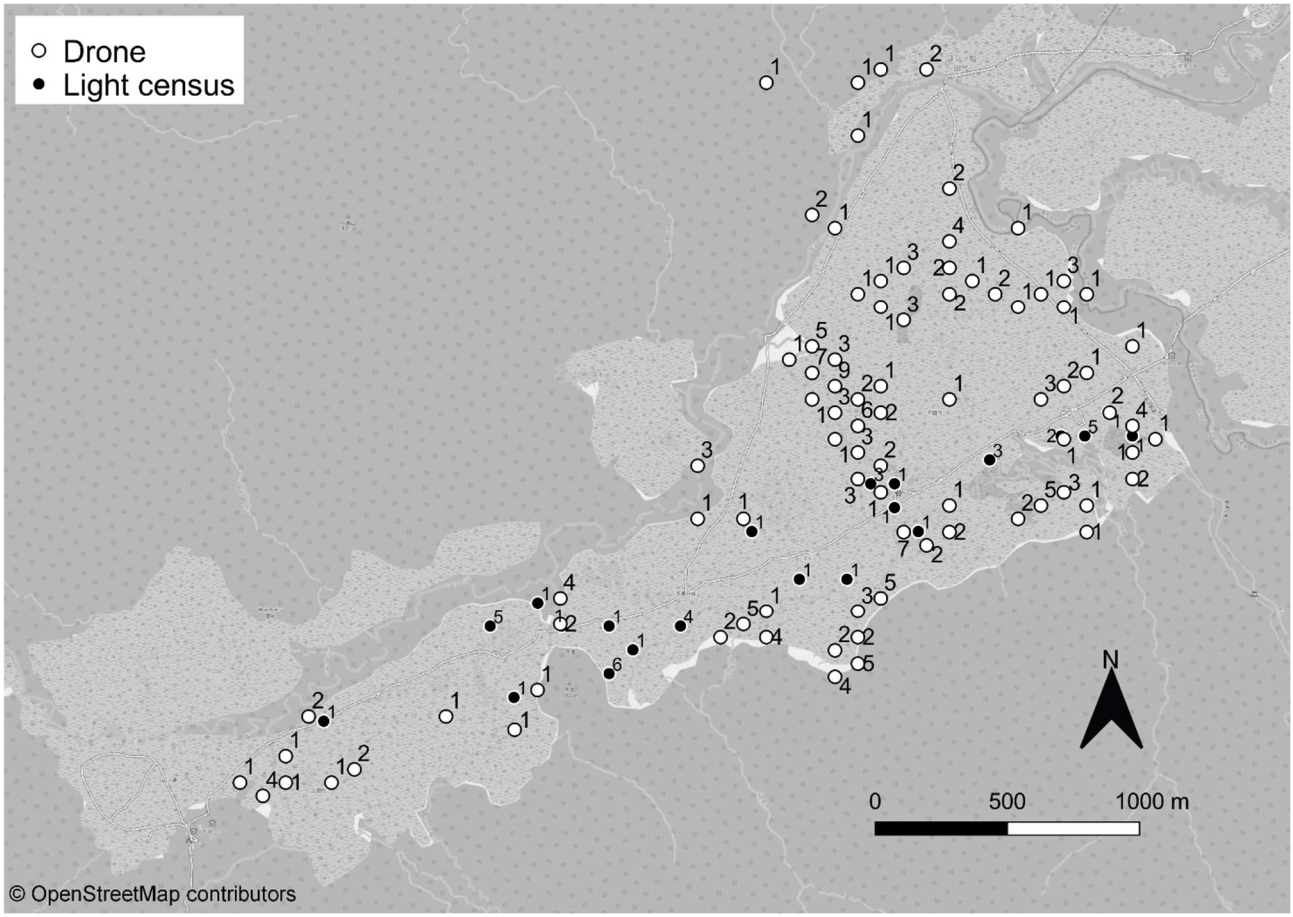


図4.2.8　ライトセンサスで発見したシカとドローンによる空撮で発見したシカの位置

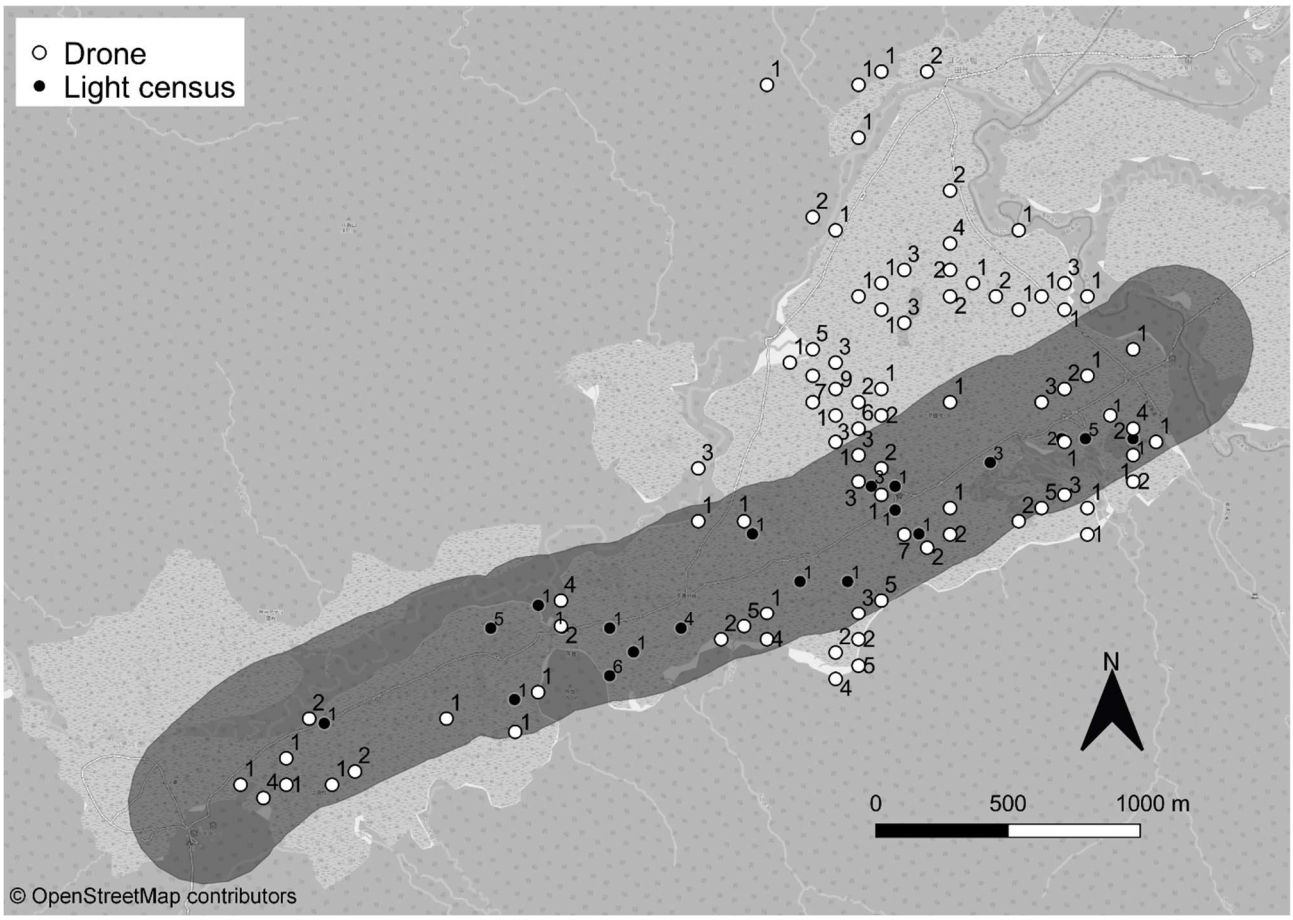


図4.2.9　ライトセンサスの観測範囲

射してシカの目の反射の有無を観察することでシカの頭数と位置を特定する。このことから、ライト照射時のシカの顔の向きや姿勢によっては、目の反射を確認できない場合がある。これに対してドローンによる空撮は、湿原内の熱源を上空から観測しているため、ドローンとシカの間に遮蔽物がほとんどない尾瀬ヶ原では熱源を見落とすことはない。よって、この点が発見できた頭数に差が生じる主な理由であると考えられる。この結果から、調査効率についてはドローンによる空撮よりもライトセンサスの方が高いが、尾瀬ヶ原で行われているライトセンサスの調査ルートからでは発見が不可能な場所にシカが多く出現していたこと、さらに調査時のシカの向きや姿勢によって、多くのシカがライトセンサスでは発見されなかった可能性があることが分かった。

ドローンによる空撮で発見数が多くなる傾向は、過去のライトセンサスとの比較においても見られた。表4.2.4は過去10年間のライトセンサスと2018年と2019年に実施したドローンによる空撮で発見された個体数の比較結果である。この表から、ドローンによる空撮は、ライトセンサスの2.5倍から3.7倍（平均2.9倍）の個体数を発見できたことが分かる。図4.2.10は、ライトセンサスで発見できた個体数の過去10年間の月別の平均値である。この図から、尾瀬ヶ原では5月に最も多くのシカが湿原に現れることが分かる。そこで、上述のライトセンサスとドローンによる空撮の関係をもとに、2019年の5月のライトセンサスによって発見されて188頭から湿原内の総個体数を推定した結果、470頭（188頭×2.5）から696頭（188頭×3.7）のシカが生息していたと考えられる。ライトセンサスでは、初夏の個体数が最大となり、マイクロフォンによる個体数推定が行われた秋にかけて個体数は少なくなる。これは、この間に尾瀬ヶ原のシカの個体数が減少したと考えるよりも、時期によって餌場が変わった（初夏：草花の多い湿原、秋：木の実が多い林内）と考えるほうが自然である。この仮定のもと、サブテーマ（1）とサブテーマ（2）のそれぞれで推定した個体数と比較した結果、同程度の個体数（サブテーマ（1）：540～667頭、サブテーマ（2）：470～696頭）であった。このことから、

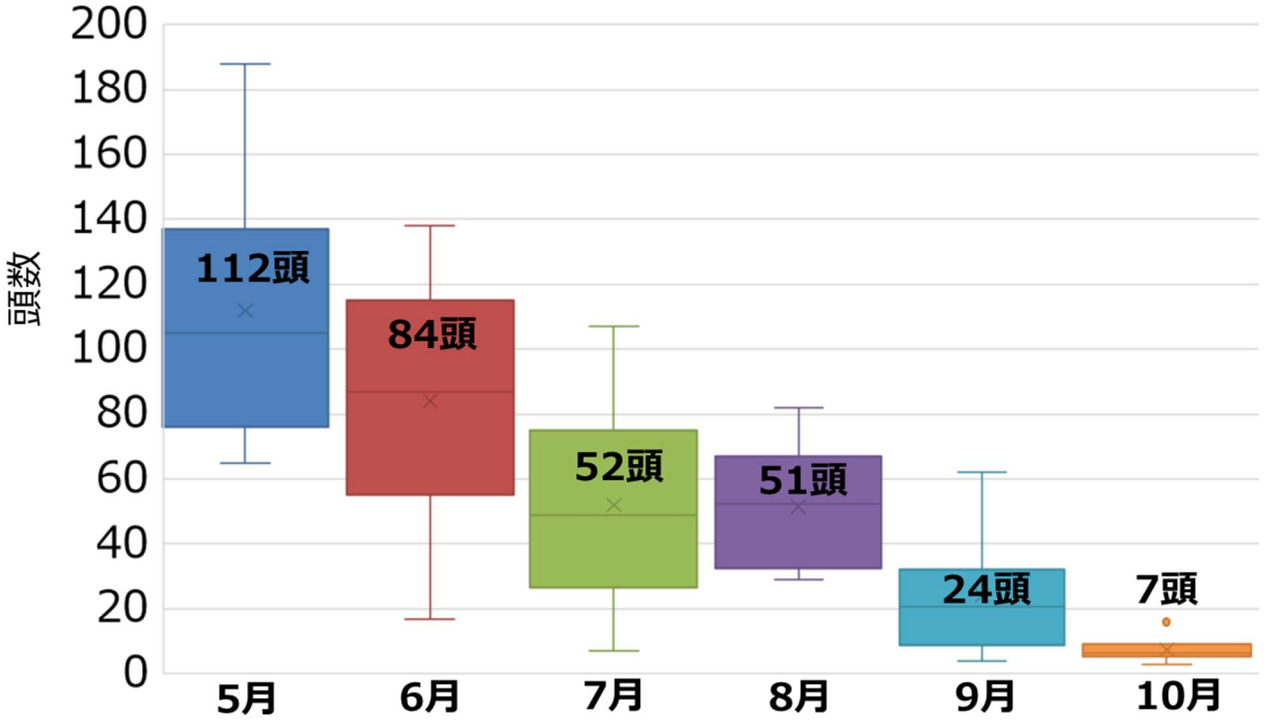


図4.2.10　ライトセンサスによって発見されたシカ個体数の過去10年間の月別平均値

表4.2.4　ドローン空撮とライトセンサスによって発見された頭数の各月の比較

ドローン空撮	ライトセンサス
131頭 （2018年7月11日）	52頭 （平成22年～令和1年の7月の平均値）
191頭 （2019年8月5日）	51頭 （平成22年～令和1年の8月の平均値）
63頭 （2019年9月26日）	24頭 （平成22年～令和1年の9月の平均値）

尾瀬ヶ原では、上空の開けた湿原を餌場としている時期はドローンによる空撮を、上空が閉じた森林を餌場としている時期はマイクロフォンを用いて個体数を推定することが有効であると言える。

上述の結果から、ドローンによる空撮はライトセンサスと比較すると、調査ルートの制約がある場所においてシカの頭数を把握する上で有効な手段になり得ると考えられる。しかし、ドローンによる空撮では、撮影時のシカの姿勢によって映り方が変わるため、画像だけでは性別や年齢を特定することは困難である。また、湿原周囲の林内のシカは、ドローンによる空撮では発見することは困難である。よって、林内の頭数把握や群れの構成把握を目的とした調査には、これらの点で優れているライトセンサスが有効であると考えられる。

これらの検討については当初の研究目標にはなかったが、これらの検討結果は、今後の尾瀬が原での個体数調査手法の発展に寄与すると考える。

（4）個体数推定の補助データとしてのマルチスペクトルカメラ搭載ドローン画像の利用の検討

シカが出現した場所の特徴を把握するため、2019年9月26日にマルチスペクトルカメラ（Sequoia）を搭載した固定翼ドローン（eBee+）を用いて昼間の湿原の空撮を実施した。図4.2.11は、空撮画像に2019年8月5日の夜に発見されたシカの位置を重ねたものである。この図から、湿原内の木道からでは確認することが困難な小川沿いや池の周辺で多くのシカが確認されていたことが分かる。このように、上空から詳細に植生を観測することは、シカの好む場所の特定や、今後重点的に観測を実施する

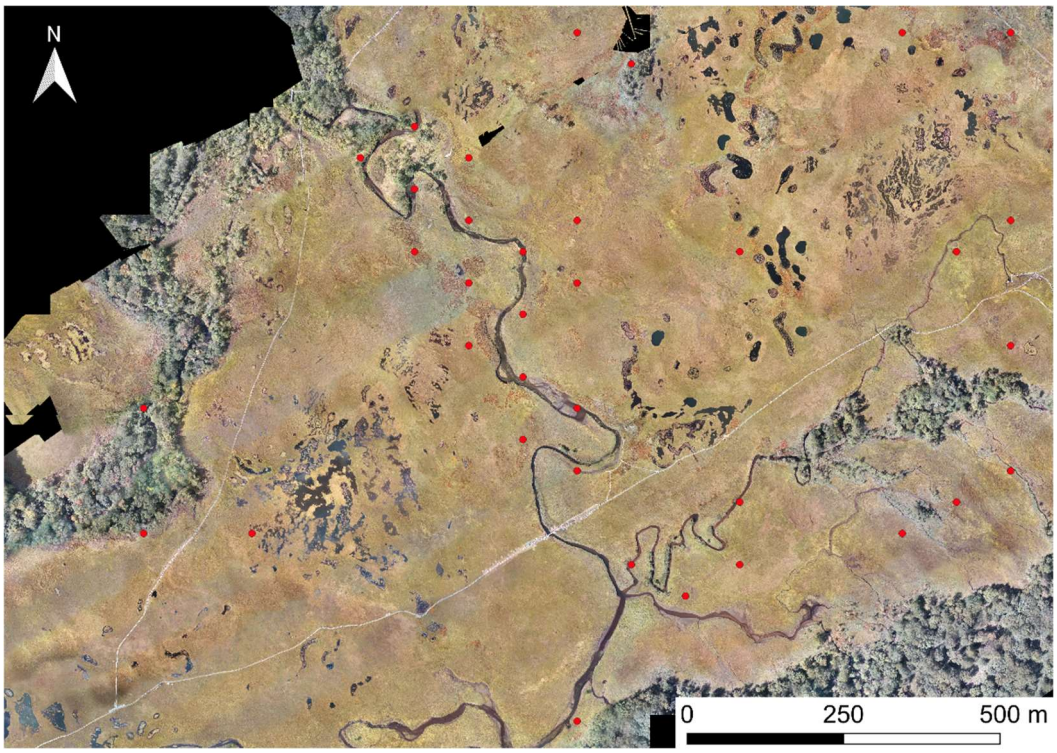


図4.2.11　シカの発見場所の植生の様子。赤丸：シカの発見場所

場所の選定に活用可能であると考えられる。このことから、研究目標であった昼間の画像の利用方法を示すことができたと考える。ただし、被害の推定手法の検討については、今後目視に頼らない方法を目指す場合は、画像処理の方法について検討する必要がある。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

尾瀬ヶ原のような上空が開けた場所でのシカの発見を念頭に、サーモカメラ搭載ドローンによる夜間の空撮画像の取得方法と処理方法を検討した。その結果、従来法であるライトセンサスでは発見困難な場所にいるシカが発見されたこと、さらに、移動に制限がある場所でも広域の観測が可能であることが確認され、効果的なシカのモニタリング方法の一つであることが示唆された。

ドローン空撮とこれまでのライトセンサスの結果との比較により、ドローン空撮による結果とライトセンサスとの結果の関係を明らかにし、これまでのライトセンサスで最も発見数が多い5月の湿原全体の個体数を推定し、サブテーマ（1）の結果との比較により、その結果が妥当であることが確認されたことは科学的に意義があるといえる。

（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＞

本課題では、従来法のライトセンサスとの比較結果を示した。これにより、湿原のような上空が開けた場所でのドローンを用いた空撮の有効性が確認されたため、試験的に導入されることが期待される。

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) 牧雅康、奥村忠誠、沖一雄：日本リモートセンシング学会誌、受理.
ライトセンサスとドローン空撮によるシカ個体分布特定結果の比較

2) 【国際雑誌に投稿中】Salem Ibrahim Salem, Kazuhiko Fujisao, Masayasu Maki, Tadanobu Okumura and Kazuo Oki：Ecological Indicators, Detecting and tracking deer positions using sound recordings.(minor revision)

＜査読付論文に準ずる成果発表＞

1) 沖一雄、牧雅康、奥村忠誠、Salem Ibrahim Salem：日本リモートセンシング学会誌 39(5) 384-392 (2019)地上・リモートセンシングによる尾瀬ヶ原湿原におけるシカ個体数推定手法の開発プロジェクト.

＜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）

1) 峯岸優好、牧雅康・沖一雄・奥村忠誠：日本リモートセンシング学会第67回学術講演会（2019）
「ライトセンサス調査と比較した広域湿原におけるシカ個体数推定のためのドローン熱画像の有用性評価」

2) 牧雅康：第25回「野生生物と社会学」学会（2019）
「ドローンを用いたシカ個体数推定手法の開発」

3) 牧雅康：システム農学会2019年度春季大会（2019）
「夜間のドローン空撮画像を用いた尾瀬ヶ原のシカ個体抽出」

4) 牧雅康：第24回「野生生物と社会学」学会（2018）
「リモートセンシング画像によるシカ個体数推定手法の開発」

5) 峯岸優好、牧雅康、沖一雄、長谷川匡：日本リモートセンシング学会だ65回学術講演会（2018）
「シカ個体抽出を目的とした機械学習のための超解像処理を適用したドローン熱画像の有用性評価」

6) 牧雅康、峯岸優好、長谷川匡、沖一雄：日本リモートセンシング学会第64回学術講演会（2018）
「シカ個体抽出を目的とした超解像処理ドローン熱画像の有用性の評価」

（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) 福島大学オープンキャンパス（2019年8月11日）にて成果紹介
（ポスター展示のため参加者不明）

（５）マスコミ等への公表・報道等

1) 【国際雑誌アクセプト後東京大学からプレスリリースの予定】「“フィーヨフィーヨ”特徴的な鳴き声とドローン画像からシカの時空間分布を推定～環境を荒らさずに害獣や希少動物を調査～」

（６）その他

特に記載すべき事項はない。

８．引用文献

1) Gonzalez、 L. F.、 Montes、 G. A.、 Puig、 E.、 Jonson、 S.、 Mengersen、 K. and Gaston、 K. J. 2016. Unmanned aerial vehicles (UAVs) and artificial intelligence revolutionizing wildlife monitoring and conservation. Sensors 16. DOI: 10.3390/s16010097.
2) Hodgson、 J. C.、 Baylis、 S. M.、 Mott、 R.、 Herrod、 A. and Clarke、 R. H. 2016. Precision wildlifemonitoring using unmanned aerial vehicles. Scientific Reports 6. DOI: 10.1038/srep22574.
3) 鬼頭孝治. 2016. 獣害対策におけるドローンの利用可能性. 農業食料工学会誌78:196-200.
4) 兼田一幸・前田貴信・槇田論. 2019. ドローンを用いたツシマヤマネコ位置測定システムの実証実験. 佐世保工業高等専門学校研究報告55:7-10.
5) 森光由樹. 2018. バイオロギング：ウェアラブルカメラ端末やドローンを用いた哺乳類・霊長類行動学. 霊長類研究34:41-51.
6) 上野裕介・栗原正夫. 2016. 猛禽類調査における新技術の適用可能性と技術的検証. 土木技術資料:40-43.
7) Redmon J. and Farhadi A. 2018. YOLOv3: An incremental improvement. arXiv:1804.02767v1.
8) Romano Y., Isidoro J. and Milanfar P. 2016. RAISR: Rapid and accurate image super resolution. arXiv: 1606.01299v3.

Ⅱ－３　従来手法による個体数推定とオス個体の行動圏に含まれるシカ個体数の推定

株式会社野生動物保護管理事務所　　奥村　忠誠

平成29年度～令和元年度研究経費（累計額）：21,391千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成29年度：7,251千円、平成30年度：6,889千円、令和元年度：7,251千円）

［要旨］
尾瀬ヶ原に生息するオスジカにGPS首輪を装着し、オスジカの行動と移動速度について把握した。自動撮影カメラの撮影頻度とGPS首輪から得られた移動速度を元にガス分子モデルを用いてシカの生息数の推定を行ない、他の手法の検証データとして用いることを目的とした。また、自動撮影カメラで撮影されたオスジカとメスや当歳シカの比率を調べ、サブテーマ(1)のマイクロフォンによる推定を補完するデータとして用いた。
これらのデータを元に生息密度を計算すると、平成29年度は18.29頭/km2、平成30年度は8.53頭/km2、令和元年度は19.44頭/km2となり、平成30年度だけ低い生息密度となっていた。今回の調査地の面積は、2.66kmであることから、調査範囲内の推定生息頭数は、平成29年度は48.69頭/km2、平成30年度は22.71頭/km2、令和元年度は51.75頭/km2となった。
令和元年7月～10月を月ごとに推定した結果、7月は密度が低かったが、8月、9月と密度が高くなっていた。その後10月には少し密度が下がっていた。
この値を用いて令和元年10月の尾瀬ヶ原周辺の森林域に生息する個体数を推定したところ、362.28頭と推定された。

［キーワード］
個体数推定、オス個体、GPS首輪、自動撮影カメラ、尾瀬ヶ原

１．はじめに

尾瀬では1990年代半ば（平成一桁代）からシカの生息が確認されるようになり、シカによる自然植生への影響が顕在化し生態系への不可逆的な影響が懸念されている。対策として、物理柵による植物の保護とシカの個体数削減のための捕獲が行われているが、必要な捕獲数についての目標が設定されていない。それは、尾瀬にどの程度のシカが生息しているかが不明であり、捕獲圧の設定が困難であるからである。そこで、尾瀬の個体数を推定するために、テーマ（1）のマイクロフォンとテーマ（2）のドローンを用いた推定手法の開発を実施し、その評価手法として本研究を実施することとした。

２．研究開発目的

尾瀬ヶ原に生息するオスジカにGPS首輪を装着し、オスジカの行動と移動速度について把握した。自動撮影カメラの撮影頻度とGPS首輪から得られた移動速度を元にガス分子モデルを用いてシカの生息数の推定を行ない、他の手法の検証データとして用いることを目的とした。また、自動撮影カメラで撮影されたオスジカとメスや当歳シカの比率を調べ、サブテーマ(1)のマイクロフォンによる推定を補完するデータとして用いた。

３．研究開発方法

（１）GPS首輪の装着

本調査で使用するGPS首輪はドイツのVectronic Aerospace GmbH社（以下、Vectronicとする）製Vertex Plus（図3.3.1）とした。GPS首輪は、GPSを搭載した野生動物追跡用の首輪である。GPSを用いた野生動物の個体追跡は1990年代後半からアメリカを中心として大型野生動物に実用化されてきたが、近年は首輪自体の小型化と多機能化が進み、日本でも各地でツキノワグマやシカ、サル等への装着が報告されている。GPS首輪の利点は、個体位置の測定（以下、測位とする）を自動的に行い、その測位間隔も任意に設定できることである。GPS首輪本体は、専用ソフトを用いてパソコンに接続することで、データのダウンロードやスケジュール設定が可能である。さらにイリジウム通信機能を介して、インターネットを経由してシカの測位データを取得することができ、尾瀬地域での長距離移動個体の追跡には最適だと考えられる。測位された位置データはGPS首輪本体のメモリに蓄積され、データはGPS首輪本体を回収し、パソコンとケーブルを接続することで取得することもできる。GPS首輪回収のため、本体部分には脱落装置が内蔵されており、任意の期間を経過すると、GPS首輪本体の脱落が可能になる。今回の業務ではシカの季節移動および各季節の環境利用について把握するため、装着から1年後に脱落するように設定した。そのため、バッテリーの消耗を抑えGPS首輪を1年間作動させることを目標として、測位間隔は1時間に設定した。オプションとしてモータリティセンサー（死亡状態センサー）とアクティビティーセンサー（行動センサー）、温度センサーが内蔵されており、今回は更にシカの前方を動画で記録できるビデオを内蔵したGPS首輪を用いた。動画撮影は2時間おきに15秒間行うように設定した。

脱落装置を含めたGPS首輪の重量はおよそ800gであり、成獣シカの体重と比較すると3%以下に収まるため、行動に対する影響は大きくないと考えられる。

図3.3.1　GPS首輪（GPS Plus）。

（２）捕獲方法

捕獲作業中にシカを発見した際は目視でシカの体重を予測し、GPS首輪の装着の可否を確認した後、装着可能と判断した場合は、不動化するためエア式吹き矢型麻酔銃等を用いて麻酔薬を投与した。不動化には、塩酸ケタミン200mgと塩酸キシラジン200mgの混合液を用い、副作用を取り除くために硫酸アトロピンも適宜追加した。GPS首輪の装着作業と同時に可能な限りイヤタグの装着と外部計測を実施し、作業終了後に塩酸アチパメゾールを投与し、個体の覚醒と放獣が順調に進むよう努めた。覚醒後は個体が立ち上がり歩き始めるのを目視し、個体の健全性を確認した。

シカは捕獲の際の過度なストレスにより、捕獲性筋疾患を引き起こすことで死亡する例が報告され

ている（鈴木，1999）。そのため、捕獲によるストレスを最小限に抑えることができる捕獲手法の選択が必要である。そのため、個体が自由に活動できる状態（フリーレンジ）において麻酔薬を投与する手法を選択した。

（３）捕獲期間

各年度の捕獲期間と日数を表3.3.1に示した。初年度はGPS首輪の準備に日数を要したため、捕獲日数が少なくなった。2年目以降は20日以上の日数で捕獲を行った。

表3.3.1　捕獲期間

年度	日程	日数
平成29年度	10/23～29	7日
平成30年度	7/2～6、7/23～27、8/21～24、10/8～12、10/15～22	27日
令和元年度	5/19～23、5/27～31、10/14～18、10/21～26	21日

（４）自動撮影カメラ調査

自動撮影カメラは、センサーに動物が反応すると静止画を3枚撮影し、その後動画を20秒撮影するように設定した(図3.3.2)。これを1回のイベントとしてカウントし、1回のイベントが終わると次にセンサーが反応するまでに1分間のインターバルをおくように設定した。3年間のカメラの設置期間は表3.3.2にまとめた。

図3.3.2　自動撮影カメラ（Ltl-Acorn6310W MARIFセレクト）

表3.3.2　自動撮影カメラの設置期間と日数

年度	設置日	回収日	設置日数
平成29年度	10月4日	10月26日	22日
平成30年度	6月30日	10月26日	119日
令和元年度	7月8日	11月2日	118日

（５）行動圏の推定

各個体から得られた測位データをもとに、繁殖期（9～10月）の行動圏を推定した。推定方法は固定カーネル法を用いて、行動圏及びコアエリア（集中利用エリア）の解析を行った。

（６）従来手法による個体数推定

野生動物の個体数推定の方法はいくつかあるが、今回は自動撮影カメラを用いた手法を用いて行なった。方法はRowcliffe et al.（2008）を用いた。式は以下のようになる。

$$D=g*y/t*\pi/vr(2+\theta)$$

ここで、gは群れサイズ（頭数）、y/tは撮影率、vは移動速度（km/日）、rは探知距離（m）を示す。カメラのパラメータである探知角度と探知距離はどのカメラも同じとし、角度は100度、距離は10mとした。

この方法は、すでに国内でも取り入れられており、姜ら（2011）や池田ら（2013）による報告があるほか、国立公園等のシカ管理でも利用されている。

この方法は、カメラの探知範囲で撮影される確率と撮影された平均群れサイズと群れの移動速度から密度を推定する。今回の調査では約400mに一台の自動撮影カメラにより、シカの群れサイズと撮影頻度を調べ、群れの移動速度はシカにGPS首輪を装着してその移動データから移動速度を算出することとした。

４．結果及び考察

（１）個体の捕獲と追跡

初年度は台風の影響により予想していたよりも捕獲チャンスがなく、捕獲頭数は0頭であった（表4.3.1）。2年目にはメス1頭、オス3頭の合計4頭を捕獲し、3年目にはオス1頭を捕獲した。3年間で合計5頭のシカにGPS首輪の装着を行った。

各個体の追跡期間は表4.3.2に示した。平成30年度に装着した4個体は令和元年の夏から秋にかけて首輪を回収した。これらの個体は、最低1年間は追跡ができていた。令和元年度に装着した個体については現在も追跡中である。

追跡個体は夏から秋にかけて捕獲をしているため、冬には一度越冬地へ移動していることになる。シカの位置を地図に示した（図4.3.2）。全ての個体は冬季に南下し、メスの個体1801は栃木県の中禅寺湖の南側で越冬していた。個体1802は片品村の役場裏側あたりで越冬していた。個体1803と個体1901は栃木県の足尾地域で越冬していた。個体1804は栃木県の川俣温泉近くで越冬していた。南下する傾向は同じであったが、越冬地は様々であった。尾瀬から越冬地への経路と越冬地から尾瀬への経路はほとんど同じ経路を通る傾向がみられた。

表4.3.1　捕獲個体一覧

個体番号	捕獲日	性別	推定体重	推定年齢
1801	平成30年7月2日	メス	55kg	7歳
1802	平成30年7月5日	オス	65kg	2歳
1803	平成30年10月8日	オス	85kg	5歳
1804	平成30年10月21日	オス	85kg	5歳
1901	令和元年10月23日	オス	90kg	10歳

個体1801

個体1802

個体1803

個体1804

個体1901

図4.3.1　捕獲時の写真

表4.3.2　追跡期間と測位地点数

個体番号	捕獲日	最終追跡日	測位地点数	状況
1801	平成30年7月2日	令和元年8月1日	9378	GPS首輪回収済み
1802	平成30年7月5日	令和元年8月1日	7477	GPS首輪回収済み
1803	平成30年10月8日	令和元年10月23日	8352	GPS首輪回収済み
1804	平成30年10月21日	令和元年10月25日	8266	GPS首輪回収済み
1901	令和元年10月23日	令和2年5月1日	3788	追跡中

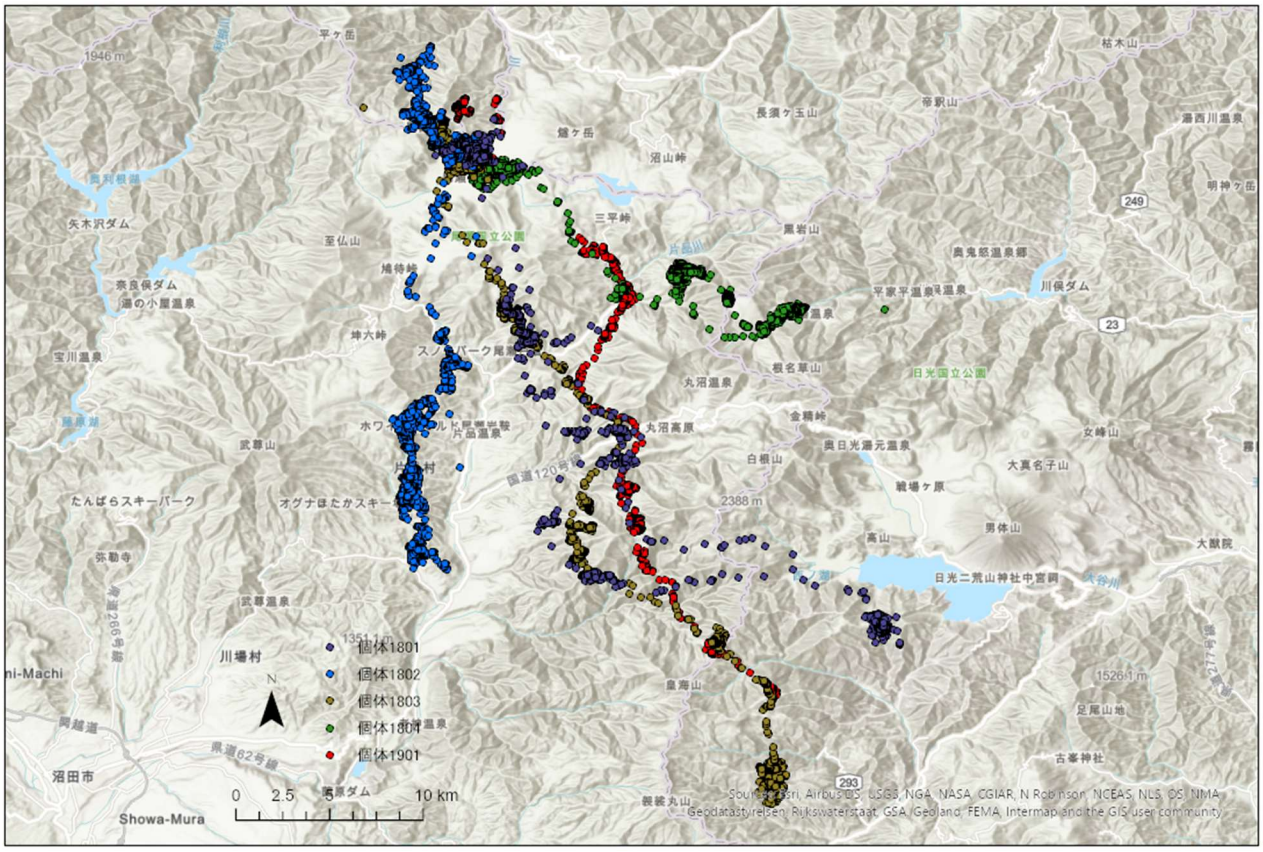


図4.3.2　追跡個体の移動状況

（２）繁殖期の行動圏面積

尾瀬ヶ原のシカの繁殖期である9月から10月の行動圏を求めた。個体によっては越冬地への移動を開始している個体もおり、行動圏面積は様々であった。2018年の繁殖期に追跡のできた4個体では、個体1802は移動を行っていたため、片品村戸倉地域にも行動圏が形成されていた（図4.3.3）。その他の3個体は尾瀬ヶ原周辺に行動圏が形成され、そのうち最も大きい行動圏を形成したのは個体1804であり、面積は361.6haとなった（表4.3.3）。また、カメラによる個体数推定を行った範囲を利用していた個体は個体1803のみであった。2019年の繁殖期においても、個体1804は越冬地の移動を開始しており、尾瀬ヶ原の南東にも大きな行動圏を形成していた（図4.3.4）。個体1803については2019年も自動撮影カメラの設置地域に行動圏を形成しており、その面積は269.0haとなっていた。今回装着した個体のうち1801はメス個体であり、それ以外の個体はオス個体である。オス個体の行動圏の重複は2018年も2019年も季節移動により行動圏が大きく推定された個体との重複を除くと、ほとんど重複はみられることはなかった。

表4.3.3　繁殖期（9～10月）の行動圏面積（ha）

年	個体名	コアエリア	行動圏
平成30年	個体1801	9.5	45.8
	個体1802	1125.9	6801.7
	個体1803	61.9	247.9
	個体1804	57.8	361.6
令和元年	個体1803	50.9	269.0
	個体1804	814.9	4546.6
	個体1901	66.8	410.8

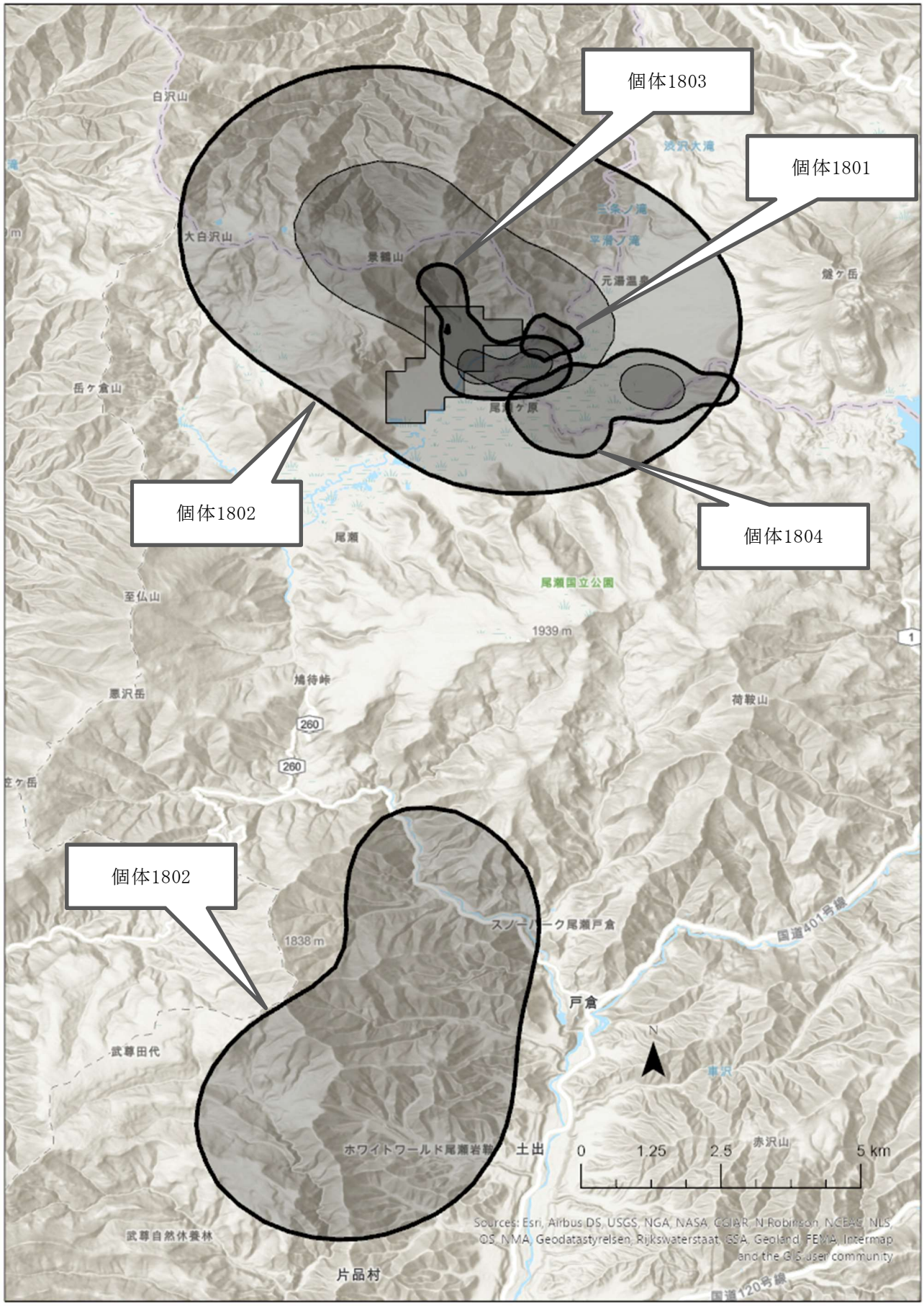


図4.3.3　平成30年9月～10月の行動圏（3個体）

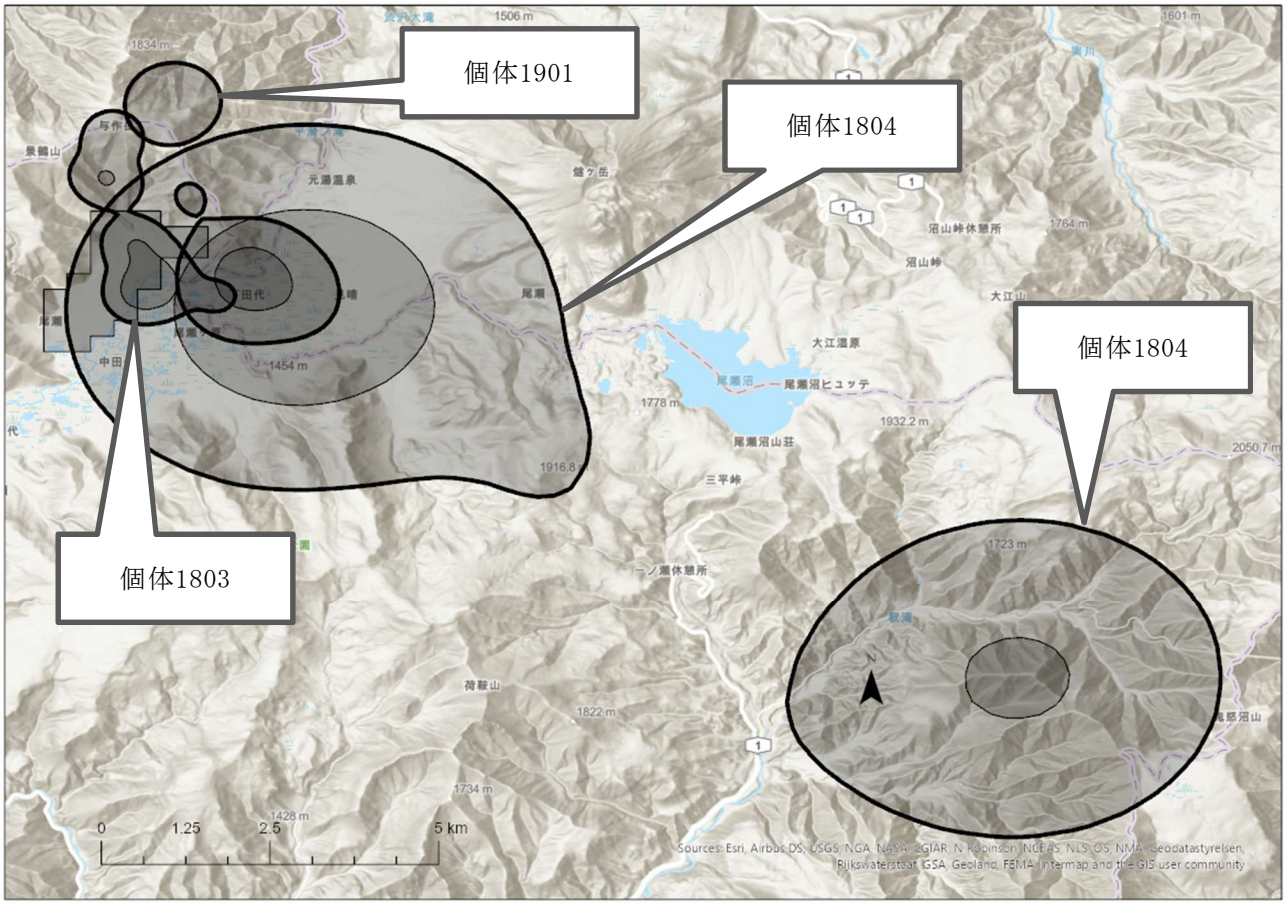


図4.3.4　令和元年9月～10月の行動圏（3個体）

（３）移動距離

生息密度を推定するために移動距離を算出した（表4.3.4、表4.3.5）。移動距離は1時間ごとの地点間の距離をGISで算出し、1日単位で集計した。移動距離は季節移動が起こる10月に長くなる傾向が見られた。

表4.3.4　個体ごとの1日あたりの平均移動距離（m）

年	月	個体1801	個体1802	個体1803	個体1804
平成30年	7	1864.6	614.1 663.0	0.0	0.0
	8	1686.4	663.0	0.0	0.0
	9	1783.7	760.5	0.0	0.0
	10	1674.1	1953.0	3276.6	959.9
令和元年	7	1798.1	656.0	756.4	658.0
	8		177.8	378.5	664.4
	9			1151.7	1397.6
	10			1232.3	2475.2

表4.3.5　令和元年7月～10月の1日あたりの平均移動距離（m）

月	1日あたりの平均移動距離
7	793.4
8	497.1
9	955.3
10	1909.8

（４）自動撮影カメラ調査

自動撮影カメラは推定する範囲に400mメッシュを作成し、そのメッシュごとに1台設置した。設置台数は33台となった（図4.3.5）。

平成29年度は設置期間が短かったため、撮影された頭数は少なく652頭となっていた（表4.3.6）。また、オスとメス当歳の合計頭数の比をみると、調査期間が10月のみだった平成29年度は0.66とオスのほうが多くなっていたが、平成30年度と令和元年度はそれぞれ1.36、1.89となっており、オス以外の性年齢区分の割合が高くなっていた。令和元年度の7月から10月では月が経つにつれてオスの割合が下がる傾向がみられた（表4.3.7）。

平成29年度は北側の沢付近や南側でオスが多く撮影される傾向がみられた（図4.3.6）。平成30年度と令和元年度においても、南側の滝ノ沢周辺のカメラでオスが多く撮影されていた（図4.3.7、図4.3.8）。また、撮影頭数も山側の傾斜が変わる地域や南側で多くなっていた。

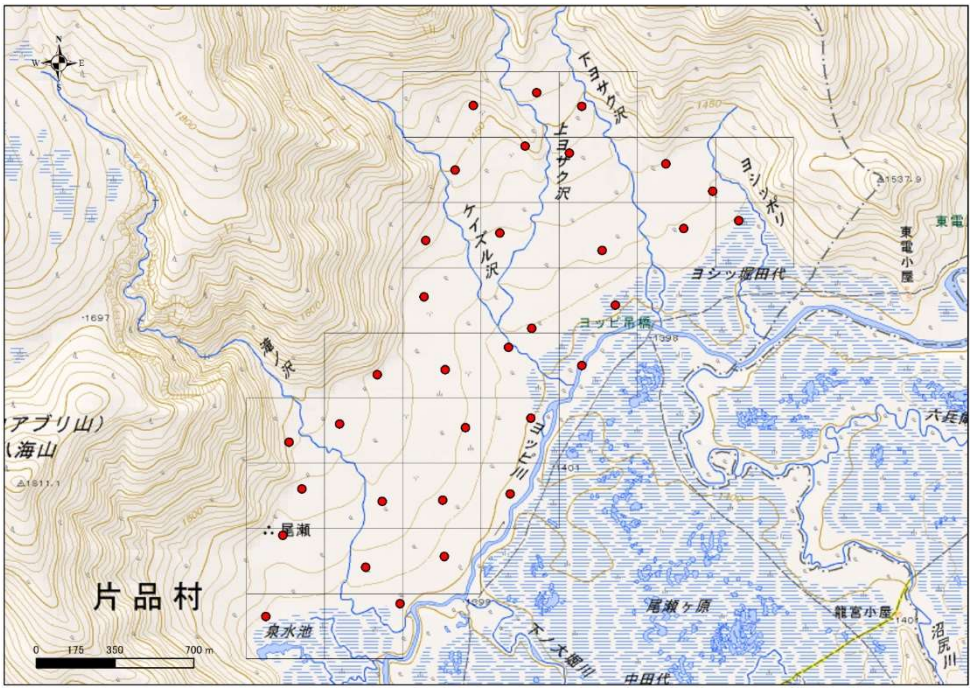


図4.3.5　自動撮影カメラ設置位置

表4.3.6　年度における性年齢区分ごとの撮影枚数とオスとその他の性年齢区分の比

年度	オス	メス	当歳	不明	合計	オス対メス当歳の合計の比
平成29年度	280	159	26	187	652	0.66
平成30年度	1138	979	566	830	3513	1.36
令和元年度	1523	2161	713	1366	5762	1.89

表4.3.7　令和元年の性年齢区分ごとの撮影枚数とオスとその他の性年齢区分の比

月	オス	メス	当歳	不明	合計	オス対メス当歳の合計の比
7	14	147	57	62	280	14.57
8	63	425	179	231	898	9.59
9	265	622	174	358	1419	3.00
10	1140	953	300	695	3088	1.10

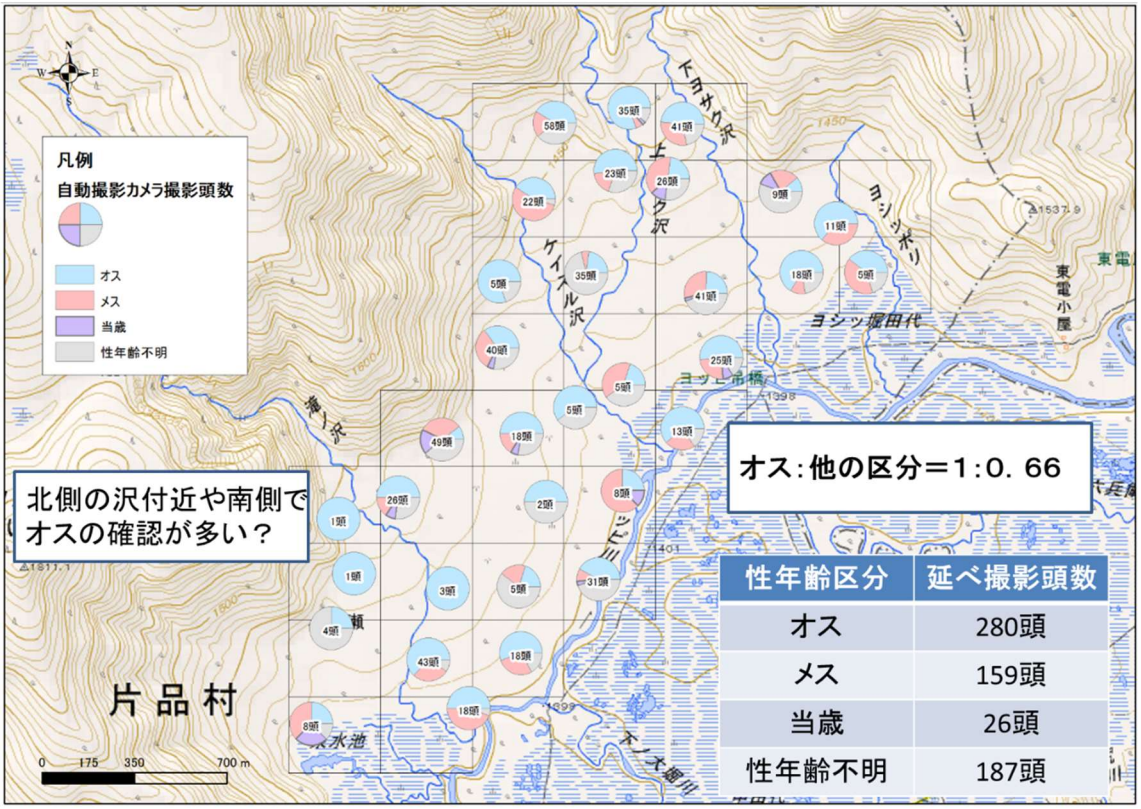


図4.3.6　平成29年度の自動撮影カメラの撮影頭数

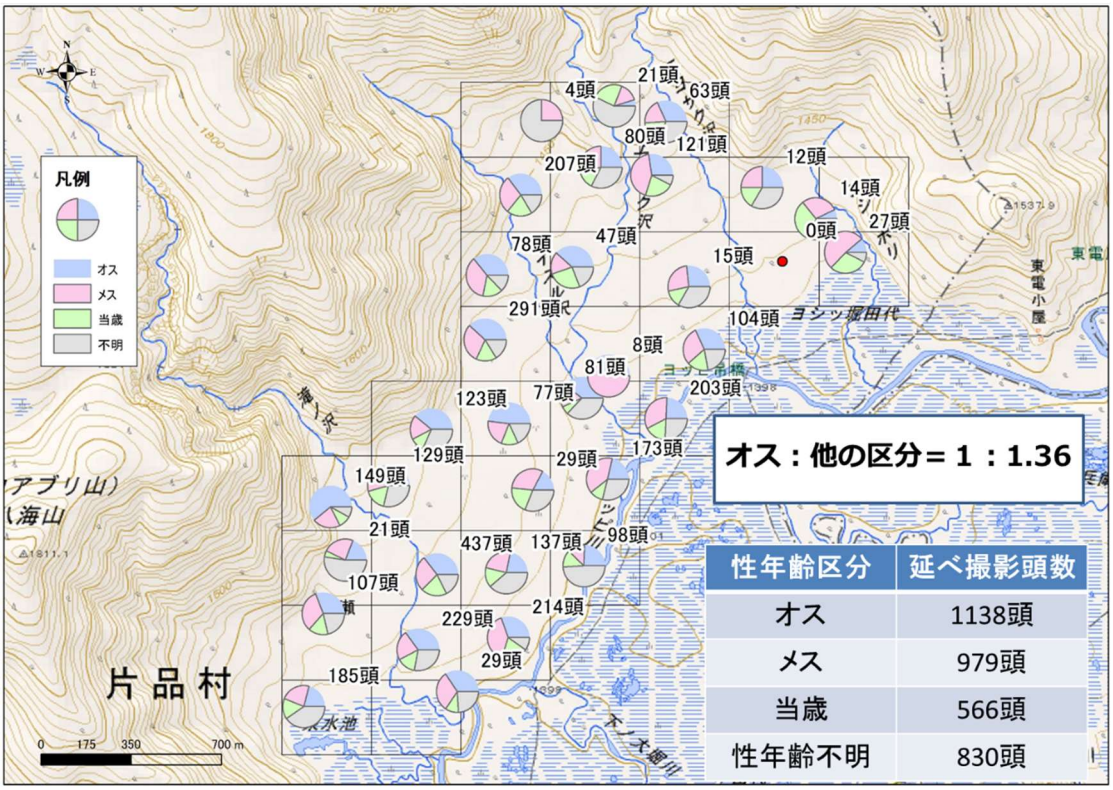


図4.3.7　平成30年度の自動撮影カメラの撮影頭数

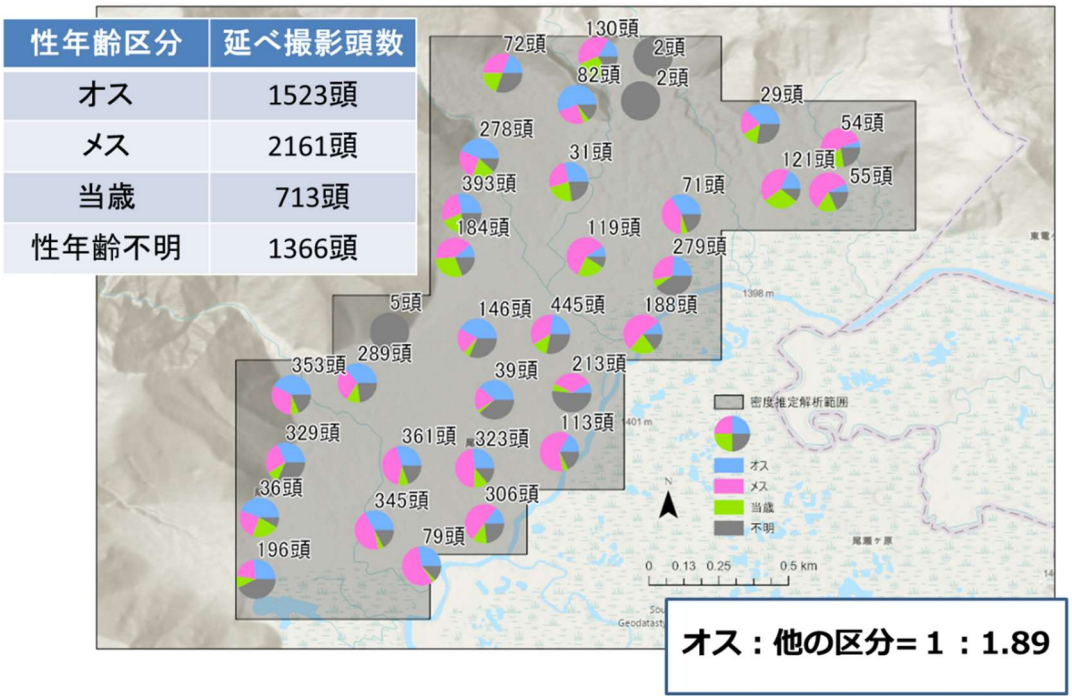


図4.3.8　令和元年度の自動撮影カメラの撮影頭数

（５）従来手法による個体数推定

個体数の推定に必要なパラメータを表4.3.8と表4.3.9に整理した。群れサイズは撮影された写真をもとに平均群れサイズを算出した。また、移動速度は今回追跡したGPS首輪装着個体のデータを使うことを基本としたが、平成29年度時点ではGPS首輪の装着ができていなかったため、環境省が所有しているニホンジカの移動に関するGPS首輪のデータを利用した。平成29年の自動撮影カメラを行なっている期間中に調査地周辺を利用している個体は2個体おり、そのデータから1日あたりの移動距離は0.937kmであった。

これらのデータを元に、生息密度を計算すると、平成29年度は18.29頭/km^2、平成30年度は8.53頭/km^2、令和元年度は19.44頭/km^{2}となり、平成30年度だけ低い生息密度となっていた。今回の調査地の面積は、2.66kmであることから、調査範囲内の推定生息頭数は、平成29年度は48.69頭/km^2、平成30年度は22.71頭/km^2、令和元年度は51.75頭/km^{2}となった。

令和元年7月～10月を月ごとに推定した結果、7月は密度が低かったが、8月、9月と密度が高くなっていた。その後10月には少し密度が下がっていた。

この値を用いて10月の尾瀬ヶ原周辺の森林域に生息する個体数を推定した。今回推定の対象とした森林の面積は30.14km^{2}のため、森林内に生息している個体数は362.28頭と推定された（図4.3.9）。

表4.3.8　年度ごとの推定生息数

年度	群れサイズ (g)	移動速度 (km/日)(v)	撮影率 (y/t)	推定密度	推定生息数	期間
平成29年度	1.23	0.94	0.166	18.29	48.69	10月4～26日
平成30年度	1.24	1.71	0.14	8.53	22.71	6月30～10月26日
令和元年度	1.33	1.43	0.25	19.44	51.75	7月8日～11月2日

表4.3.9　令和元年7月～10月の推定生息数

月	群れサイズ	移動速度	撮影率	推定密度	推定生息数
7月	1.29	0.79	0.07	4.75	12.64
8月	1.29	0.50	0.15	16.56	44.09
9月	1.31	0.96	0.33	19.08	50.80
10月	1.36	1.91	0.40	12.02	32.01

図4.3.9　推定に用いた森林範囲と自動撮影カメラ調査範囲

（６）オス１頭の行動圏に含まれる推定個体数

当初の目的に含まれていた、オス１頭の行動圏内に含まれる個体数を推定した。個体数推定を行った地域と重複する行動圏を持っていたのは個体1803だけであった。そのため、個体1803の行動圏内に生息する推定個体数を計算した。個体1803は平成30年度の行動圏面積が2.48km^2、令和元年が2.69km^{2}であった。この年の推定密度はそれぞれ8.53頭/km^2、19.45頭/km^{2}であることから平成30年度は21.15頭、令和元年は52.32頭が生息していると推定された。

（７）GPS首輪に内蔵されたビデオカメラで撮影された動画データの解析

当初の目的には含まれていなかったが、GPS首輪に内蔵されたビデオカメラで撮影された動画の解析を行った。解析対象は個体1801のメス個体とした。時間帯ごとの利用環境割合をみると、日中はササをよく利用し、薄明薄暮の時間帯には森林を利用していることがわかった（図4.3.10）。次のその環境でどんな行動をしているかを調べた（図4.3.11）。その結果、主に日中に利用していたササ群落では反芻に費やす時間が最も長くなっていた。また、湿原や河川などの見晴のいい場所では移動のために利用している様子が伺えた。ササ群落、森林、林縁では、毛づくろいや授乳などの社会行動が確認された。

また、ビデオカメラでは口元が撮影されるため採食している植物を見ることができる。動画で確認された採食物をみると、少ない植物種ではなく想像していたよりも多くの植物種を利用していること

がわかった（表4.3.10）。また、撮影回数ではササを採食している回数が最も多くなっていた。更には、湿原性の植物であるミズバショウやギョウジャニンニクなども採食しており、湿原への影響も確認できた。これらのデータは生態学的にも貴重なデータであるとともに、今後、これらの植物が自生している場所を探すことで、シカを効率的に捕獲できる可能性があると考えられた。

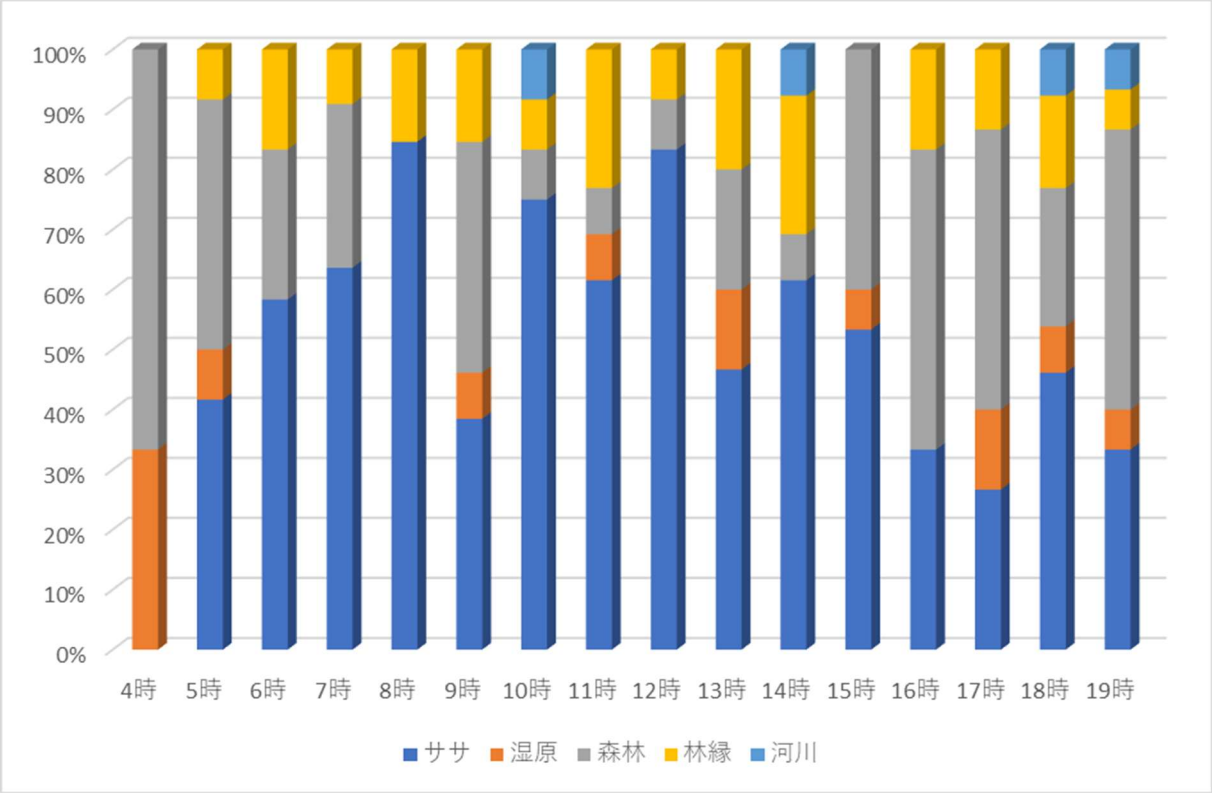


図4.3.10　時間帯ごとの利用環境割合

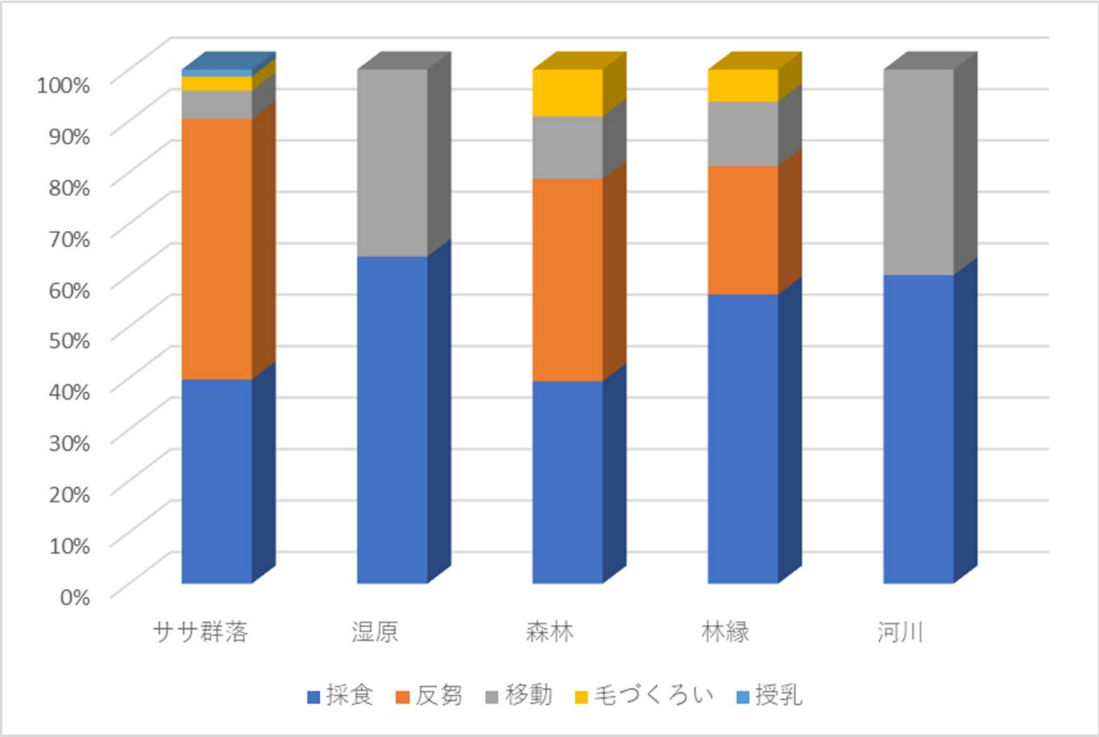


図4.3.11　環境ごとの行動割合

表4.3.10　ビデオカメラで確認された採食物

採食物	撮影回数
アオダモ	1
オオカメノキ	1
オオバクロモジ	2
カエデ属	1
ヒトツバカエデ	1
ヤナギ属	1
サクラ属	1
タカネミズキ	2
広葉樹	2
ギョウジャニンニク	1
サワフタギ	1
ジャコウソウ	1
シダ？	1
トウダイグサ属	1
ミズバショウ	4
ササ（チシマザサ）	21
グラミノイド	2
枯葉・落葉	3

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

本研究は既往の研究を含んでおり、すでに実務でも使われ出している。しかし、多くの場合はシカの移動速度を計測する場合に、他の地域の移動速度などを参考に密度を推定している。今回は推定地域でシカにGPS首輪を装着し、それにより得られた移動速度データを使っていることでより信頼される密度推定になっていると思われる。また、シカの行動を動画で確認できたことは、国内においてとても稀で先進的な取り組みであると思われる。これらのデータは生態学的にも貴重であるが、シカの管理においても役立てていける可能性が示された。より多くの個体にビデオカメラを装着することでシカの生態や行動が更に解明されていくものと思われる。

今回の結果から当初の目的であった、行動圏の推定、行動圏の重複の確認、オス１頭の行動圏に含まれる個体数推定を行い、更には尾瀬ヶ原全体の個体数推定とGPS首輪に内蔵されたカメラによる動画データの活用方法の提案を行なうことができた。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

GPS首輪を装着しシカの移動を追跡する技術は行政においても活用されている。シカの管理を行う上で、特に季節移動がある地域であればシカの移動を把握することは、シカの管理を効率的に行うことにつながる。そのため、ますますGPS首輪の活用が望まれる。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

今回初めてカメラ付きのGPS首輪を活用した。その中で、シカの管理に役立ちそうな情報も得られており、今回の成果を広く周知することで今後のシカ管理の中で活用されていくことが見込まれる。

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) 牧雅康、奥村忠誠、沖一雄：日本リモートセンシング学会誌、受理.
ライトセンサスとドローン空撮によるシカ個体分布特定結果の比較

2) 【国際雑誌に投稿中】Salem Ibrahim Salem, Kazuhiko Fujisao, Masayasu Maki, Tadanobu Okumura and Kazuo Oki：Ecological Indicators, Detecting and tracking deer positions using sound recordings.(minor revision)

＜査読付論文に準ずる成果発表＞

1) 沖一雄、牧雅康、奥村忠誠、Salem Ibrahim Salem：日本リモートセンシング学会誌 39(5) 384-392 (2019)地上・リモートセンシングによる尾瀬ヶ原湿原におけるシカ個体数推定手法の開発プロジェクト.

＜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）

1) 奥村忠誠：第24回「野生生物と社会」学会（2018）
「尾瀬におけるシカ問題と従来手法による個体数推定」

2) 奥村忠誠：第25回「野生生物と社会」学会（2019）
「センシング技術を活用して野生動物管理を行う」

（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) 奥村忠誠：尾瀬ボランティア総会（2019）「尾瀬とシカのこれからを考える」

（５）マスコミ等への公表・報道等

1) 【国際雑誌アクセプト後東京大学からプレスリリースの予定】「“フィーヨフィーヨ”特徴的な鳴き声とドローン画像からシカの時空間分布を推定～環境を荒らさずに害獣や希少動物を調査～」

（６）その他

特に記載すべき事項はない。

８．引用文献

特に記載すべき事項はない。

III. 英文Abstract

Development on Methods for Estimating Population Size of Deer with Ground and Remote Sensing Techniques

Principal Investigator: Kazuo OKI
Institution: The University of Tokyo
4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 143-8505, JAPAN
Tel: +81-3-5452-6128 / Fax: +81-3-5452-6383
E-mail: kazu@iis.u-tokyo.ac.jp
Cooperated by: Fukushima University, Wildlife Management Office Inc., Kyoto University of Advanced Science

[Abstract]

Key Words: Microphone ground sensors, Unmanned aerial vehicle (UAV), Light census surveys

The Ozegahara Marshland and Lake Ozenuma, both in Oze National Park, are known as Japan's largest mountain wetlands, and more than 1,000 years have passed since their formation. A valuable plant community grows in Oze, which was registered as a Ramsar Convention-registered wetland in 2005. The natural environment and the value of its vegetation are widely recognized, and the park sees 300,000-400,000 tourists visiting each year, peaking when the wetland vegetation flowers in May-July. However, deer have been seen since the mid-1990s, and their effects on the natural vegetation have become apparent. There is concern about irreversible effects on ecosystems.

Until now, changes in the number of sightings from light census surveys have been used primarily as an index for the deer population in Oze. However, since the light census survey is strongly influenced by weather conditions and the movement of deer on the day of the survey, observation errors in the data easily become large.

Deer are currently being caught both inside and outside the Oze wetland area, but the number of catches required to reduce vegetation damage in Oze has not yet been established. There is need for a new density survey method that can determine population size in places that are difficult for people to enter, such as Oze.

In the present study, we developed a method for evaluating the deer population in Ozegahara using microphone ground sensors and an unmanned aerial vehicle (UAV). Specifically, we first developed a deer population estimation method using a microphone, followed by a deer population estimation method using the UAV. We then carried out a comparative examination of the accuracy of these deer population estimation methods. We propose these new methods for estimating deer populations in wetlands, which

are difficult for humans to enter.

Our research results showed that the deer population estimated by the microphone was 539.9 to 667.4 in the Oze area, and the drone estimated it to be 470 to 696. Although the two methods for estimating the deer population are completely different, almost the same results were obtained, indicating that these methods are effective. It is expected that these methods will be utilized in Oze in the future.