

高精度スペクトルセンサによる新たな空間情報収集の取り組み ～熱赤外センサによる野生動物の検出～

田村 恵子・宮坂 聡・吉田 夏樹・宇野女 草太 (中日本航空株式会社)

1. はじめに

近年、野生鳥獣による農林業被害が全国で問題となっている。特に、ニホンジカ *Cervus nippon* (以下、「シカ」と言う) の増加による食害は、図1に示すように、野生鳥獣の森林被害面積のおよそ8割を占め¹⁾、2014年度の被害総額は65億円にも上る²⁾。静岡県富士市のように、植林地の幼樹が食害を受け成林が見込めなくなっている地域があるほか、人工林の樹皮の剥皮によって樹木が枯れるなど、林業経営への被害は深刻である。また、天然林への影響も甚大で、特定の植物群落が食害によって絶滅の危機に瀕しており、シカの生息密度が高い地域においては、シカが捕食可能な高さにある植生が食害によって消失し、裸地化して土壌が流出しやすくなっているような場所もあり、生態系への影響や、森林が持つ水源涵養機能への影響も懸念されている。2012年のシカの本州以南における推定生息数は約249万頭とされており³⁾、生息域は2011年～2014年で約1.2倍にも拡大した⁴⁾。その理由としては、①メスジカ保護政策、②高度成長期の奥地林伐採と拡大造林、③地球温暖化による豪雪の減少、④中山間地域の衰退と耕作放棄地の増加、⑤猟師の減少、⑥林道等法面緑化や荒廃地緑化、⑦天敵であるオオカミの絶滅などが挙げられる⁵⁾。

この問題を受け、2014年5月30日に鳥獣法が改正され、「鳥獣の保護及び管理並びに狩猟の適正化に関する法律」が新たに公布された。この改正において、シカを初めとする一部の鳥獣に対して、「生物多様性の確保、生活環境の保全又は農林水産業の健全な発展を図る

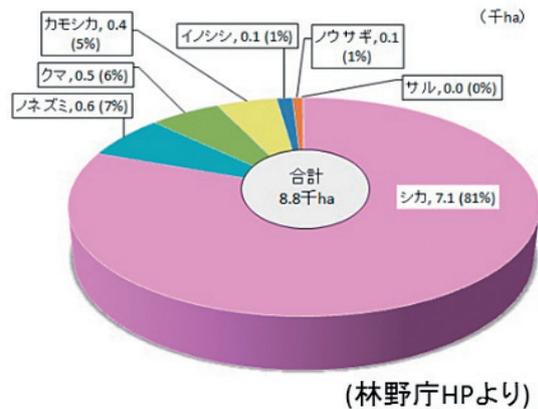


図1 シカによる被害状況
※写真はエゾシカ

観点から、その生息数を適正な水準に減少させ、又はその生息地を適正な範囲に縮小させること」を目的として、積極的な捕獲を実施することが可能となった⁶⁾。

シカの分布域が急速に拡大していることから広範囲を効率的に調査することが求められており、シカを適切に管理していくためには、個体群の動向を的確に把握し、迅速に対策を講じることが重要である。しかし、現状では、一部の地域を除いて人力による調査が主流であり、シカを効率的かつ定量的に調査する手法には課題が残る。こうした観点から、著者らは、シカの生息調査の一助とするべく、熱赤外面像によるシカの分布の把握を試みた。本稿ではその

結果と展望を報告する。

2. シカの調査手法 (地上調査法と航空機調査法)

従来のシカの地上調査法としては、主に、区画法、ルートセンサ法、糞粒法が挙げられる。

区画法は、調査地域を区分し、各分担区画に調査員を配置し、一定時間内にそれぞれの区画内を見落としのないように一斉に踏査する手法である。地図上に、踏査ルート、観察個体および観察個体の移動ルートを時刻と共に記入し、観察個体の特徴を記録することで個体識別に努め、調査終了後に重複個体を除去して生息頭数を求める。発見率を高めるため、落葉期に実施する。調査地全体をくまなく踏査する必要があるため、調査地内に立ち入り困難な場所が存在する場合は精度が低下する。

ルートセンサ法は、直接観察法の一つで、決められた調査ルートを踏査し、観察範囲内に出現した個体数を直接観察あるいは鳴き声等で確認する手法で、ライトセンサとも呼ばれる。夜間に調査ルートの両側・前方をライトで照射しながら徒歩や車で踏査し、光る動物の目あるいは姿をカウントする。発見率を高めるため、区画法と同じく落葉期に行う。調査精度は調査地域の見通しや天候などに影響される。

糞粒法は、間接観察法の一つで、西日本の九州地方や関西地方など、見通しが悪いために直接観察が困難な照葉樹林帯で用いられている。糞虫やバクテリアの活動・流水などによって、体外に排出された糞は消失していくが、シカの生息頭数が安定していれば常に新しい糞が排出されるため、ある時点での糞粒数は安定しているという考え方を利用して、個体数を推定しようとするものである。調査精度は対象種の糞の消失率が重要であり、環境に応じた地域ごとの消失率を求める必要がある⁷⁾。

地上調査の他に、航空機を用いた調査も行

われている。ヘリコプターセンサ調査は、ヘリコプターから目視カウント調査を行う手法で、個体群の動向や群れ構成、シカの越冬地利用を把握することを目的とする。一定の速度と高度で飛行し、発見したシカの群れの位置をGPSで記録する手法であり、国内ではエゾシカの調査に用いられている⁸⁾。しかし、シカの体が周辺の地物に溶け込みやすいことから、肉眼による目視調査では見落としの可能性が高くなると考えられる。

この他に、赤外線センサ (HP 型:FLIR 社 (アメリカ)) をヘリに搭載し、熱赤外面像を利用してシカをカウントする手法が試みられている⁹⁾。この研究では、熱赤外面像を用いることで、シカの検出が容易になることが示唆されている。

地上調査は、多くの時間と労力を必要とするうえ、調査精度が調査員の熟練度に大きく左右される。また、ほとんどの調査を徒歩で行う必要があるため、ルートセンサを除いてシカが活発に活動する夜間には行いくいと問題がある。また、これまで行われてきた航空機調査は、ほとんどがヘリコプターを用いたものであり、シカの姿を確認または観測するために約100mの低高度で飛行する必要がある。騒音の大きい林業用モノレールからシカを目視調査した研究では、シカが逃走したという報告もあり¹⁰⁾、騒音を伴う調査方法はシカの逃走を招き、調査精度を低下させると考えられる。

一方、本調査で用いた航空機搭載型高精細ハイパースペクトル & 熱赤外映像装置 (以下、CAST) は、固定翼航空機に搭載されており、対地高度1,000mでも40cmの解像度で温度分布の観測が可能で、約1時間程度のフライトにより1,000ha以上の範囲を調査できる。また、高高度かつ夜間でも観測が可能なることから、シカが活発に活動する時間帯に騒音による攪乱の影響無く調査できるという利点がある。

3. 検証方法

本調査では、ニホンジカが生息する奈良公園（奈良県奈良市）にて航空機による熱赤外観測を行い、熱赤外面像を用いたシカの検出を試みた。奈良公園内は上空が開けた広場が点在しており、公園内に生息するほとんどのシカは夜間でも身を隠さず広場に留まっている。2015年7月現在、約1,000頭のシカが奈良公園内に生息している。

3.1 使用機材

CASTは、中日本航空が平成27年1月に運用を開始した最新鋭のリモートセンシングシステムである。このシステムは、航空機（セスナ208）に①ハイパースペクトルセンサ（CASI-1500h；ITRES社（カナダ）、以下「CASI」と言う）、②熱赤外センサ（TABI-1800；ITRES社（カナダ）、以下「TABI」と言う）、③レーザ計測装置、④デジタルカメラを同時搭載し観測することで、可視～近赤外の領域と、熱赤外域データを同時に取得・解析することを可能にする。

表1 各センサの仕様

	CASTシステム	
	ハイパースペクトルセンサ	熱赤外センサ
機材名称	CASI-1500h (ITRES社)	TABI-1800 (ITRES社)
観測波長帯	380～1,050nm	3.7～4.8μm
観測バンド数	最大288バンド	1バンド
観測角	40°	40°
瞬時視野角	0.49mrad	0.405mrad
標準温度レンジ	—	-20～500℃
	レーザ計測装置	
機材名称	LMS-Q780 (RIEGL社)	
レーザ発射回数	100kHz～400kHz	
測距精度	0.02m	
最大スキャン角度	±30°	
計測方式	波形記録方式	
	デジタルカメラ	
機材名称	NNK-DCS4F01	
画素数	4,904×3,678	
レンズ焦点距離	36.1mm	
フットプリント	62.95°×49.26°	

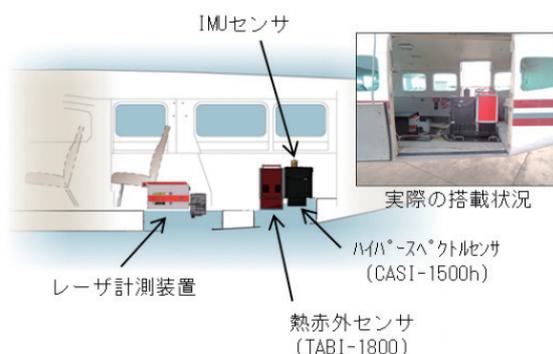


図2 搭載状況

各センサの仕様を表1、搭載状況を図2に示す。CASIは、森林調査、藻場調査、土地利用調査等に、TABIは、都市熱調査、火山調査、温排水調査等に利用することができる。また、レーザ計測装置を同時搭載することにより、詳細な地形や構造物等の高さの情報を同時に得ることができる。各センサから取得したデータを組み合わせ、例えば市街地の植生分布と温度分布の関係調査や、森林の樹種分類結果と樹高・材積を組み合わせた森林調査等、幅広い分野への利用が期待される。

本調査で主に使用したセンサは、CASTの熱赤外センサTABIである。TABIは対地高度1,000mで40cmの解像度で観測ことができ、さらに温度分解能は0.05℃と、高精度なデータを取得できる。

3.2 観測諸元

観測は、2015年9月11日19:22～20:22に、奈良公園を対象として実施した。コース図を図3に示す。飛行コースは4コース、観測範囲は約3.8km²で、同一範囲を2回観測した。隣接コースの観測時間間隔は約10分、同一コースの1回

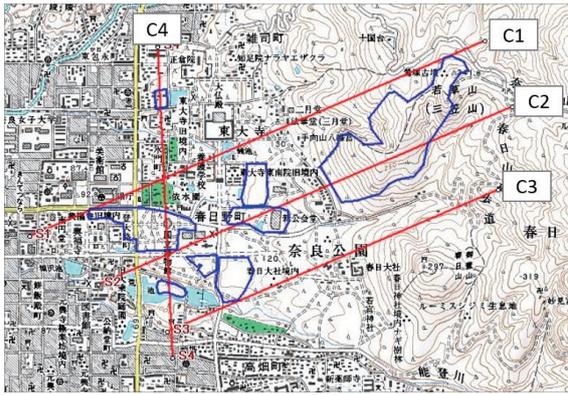


図3 観測コース図



図5 地上調査風景

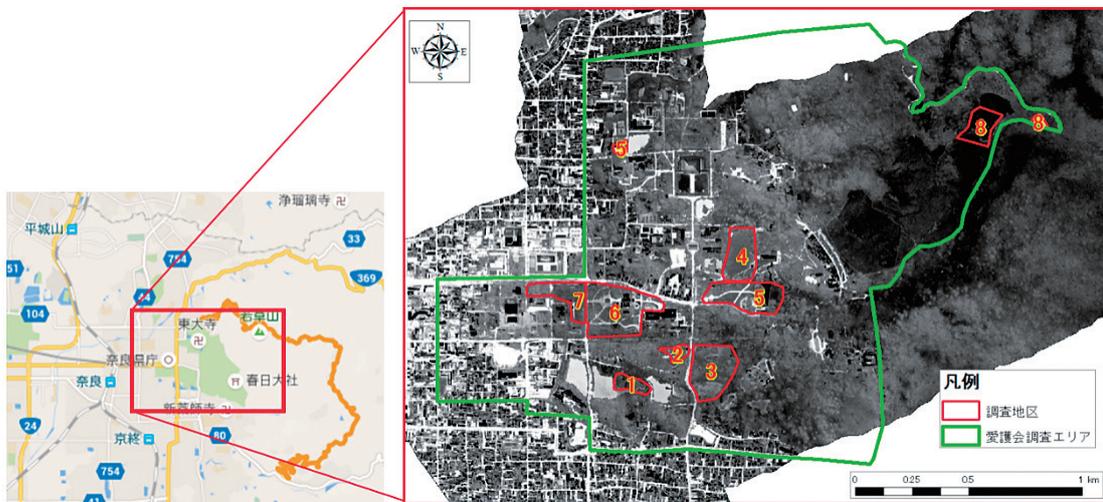


図4 調査エリア

目と2回目の観測時間間隔は約30分であった。

また、航空機調査と同日同時帯に、奈良公園内の上空が開けた数箇所のエリアで地上調査を行った。図4に示す調査エリアは、一般財団法人奈良の鹿愛護会がシカの頭数調査を行っている地域を参考に選定した。目視でシカをカウントし、シカがいた場所と頭数を詳細に記録した。また、図5のように、手持ちのサーモカメラ (NEC Avio 社製; 測定波長8~13 μ m) でも撮影を行った。

3.3 シカ判読方法

TABIによって観測した熱赤外面像を用いて画像判読を行った。判読漏れが無いよう、熱赤外面像上に一定の間隔で横断線を引き、その

線に沿って判読した。判読は周辺地物との温度差で目視によって行い、シカと判定した熱源すべてに点を打った。シカではないと明らかになった熱源に関しては白丸で囲み、他コースで誤ってシカとしないようにした。

画像判読は、奈良公園全域で観測できた頭数を知るために、図4緑枠内において行い、最後にエリア毎に集計し、地上調査結果と比較した。

4. 検証結果

4.1 熱赤外面像判読結果

図6に示すように、シカの体表面温度を熱源とする高温域は、約1m程度の点として観測された。

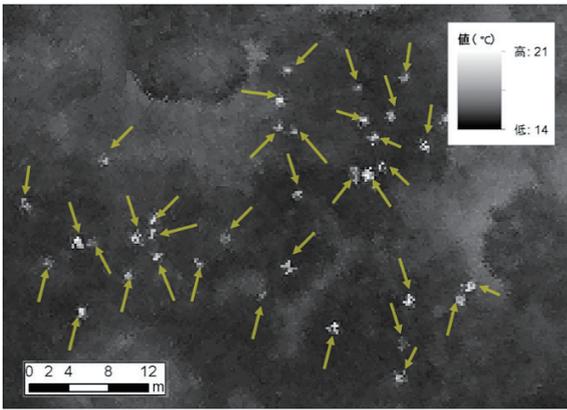


図6 シカを熱源とする高温域
黄色い矢印で示した白い点がシカ。約1m程度の大きさで捉えられている。

1回目に観測した4コースを結合処理した画像上では、図7に示すように、910頭のシカが確認できた。結合処理の際には、地上調査を行ったエリア上に複数のコースが混在しないように留意し、シカを重複してカウントしないよう配慮した。

コース毎にシカを判読した結果を表2に、コース毎の判読結果の一例を図8に示す。今回の結果では、最も多いコースで794頭、平均では約500頭のシカが、各コース上に確認できた。

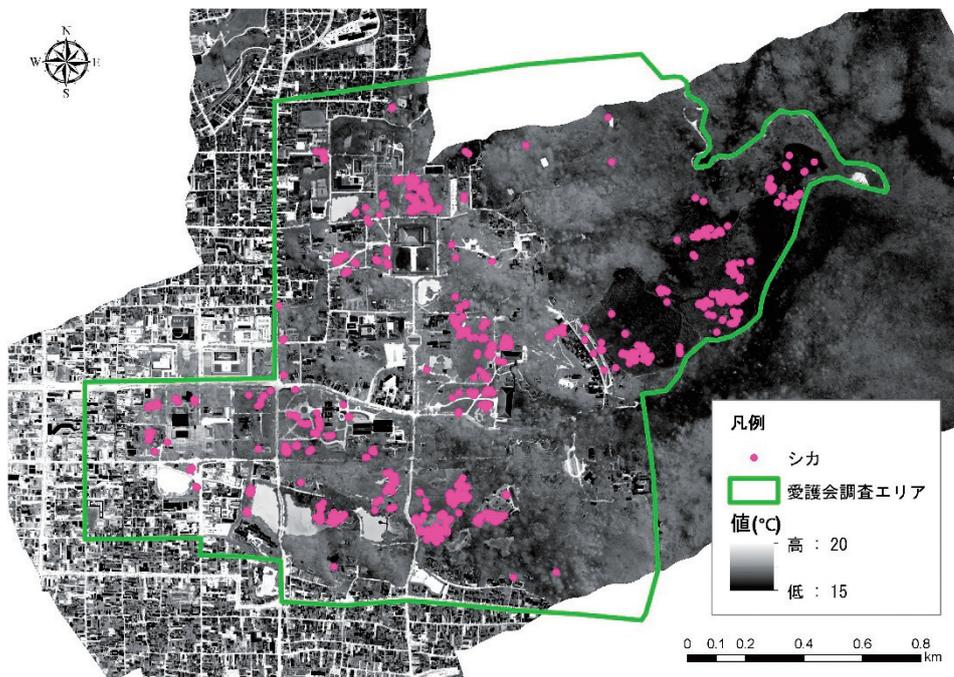


図7 シカ判読結果(全体)

表2 各コースのシカ判読結果

コース	時刻	頭数
1回目	C3 19:23	393
	C2 19:31	773
	C1 19:44	410
	C4 19:51	348
2回目	C3 20:03	451
	C2 20:09	794
	C1 20:15	512
	C4 20:21	409

※時間は、観測開始時刻を示す。

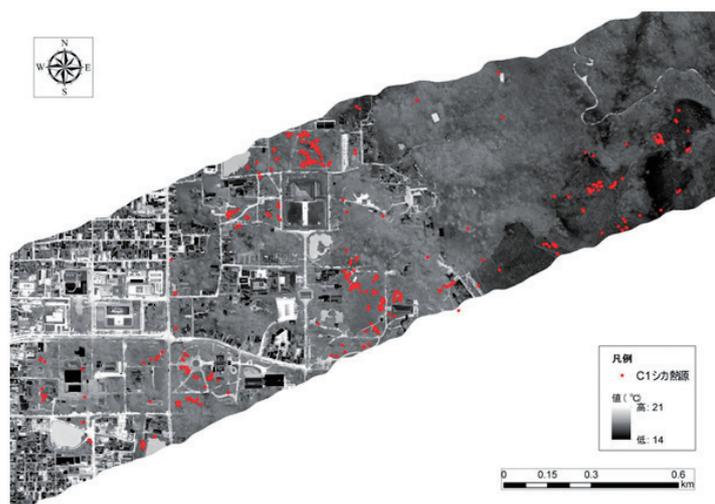


図8 シカ判読結果(C1)

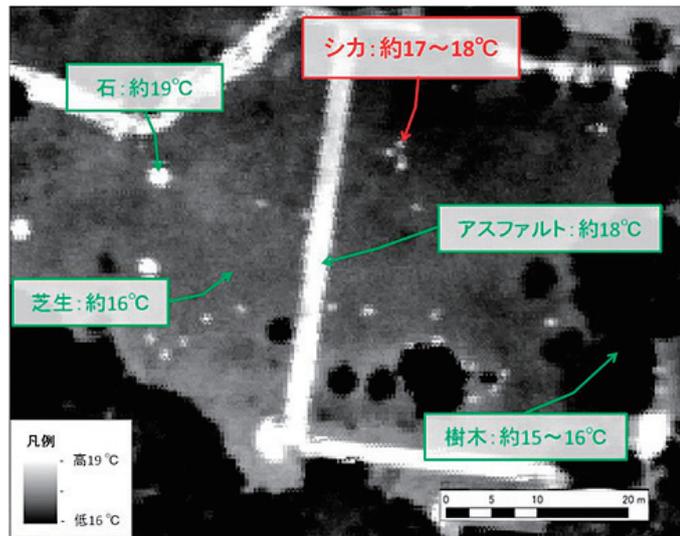


図9 地目毎の温度

温度の低い芝生にいるシカが、はっきりと捉えられている。
 なお、本稿で示す温度値は、放射率は1.0と仮定して放射率補正や大気補正等を行わず、黒体を用いて地上校正された結果をもとに温度変換された理論値である。



図10 マンホールと街灯の一例

図9に示すように、地目毎の温度は、シカが約17～18℃、植生が約15～16℃、アスファルトが約18℃であった。アスファルトや石とシカの温度はほぼ同じで、温度が高いほど白色になるよう強調表示した画像上では同じような色合いで表示されるため、シカの体がそれらの地物に重なっている場合には判読が困難であった。

また、シカと同程度の温度と形で、街灯やマンホールが観測された。街灯は点灯後数時間が経過していたため、ランプカバー部分が十分に暖められていたと考えられる。また、マンホールの鉄蓋部分は通常5cm程度の厚さがあるた

め蓄熱性が比較的高いと考えられ、観測時間の奈良市の外気温は約20℃であったことから、表面温度がこの時刻では下がりきっていなかったと考えられる。

観測されたマンホールおよび街灯の例を図10に示す。図10a)の例では、熱赤外画像上に3つの熱源が確認できるが、実際には街灯とその奥に点在するマンホールであることがわかる。また、図10b)の例では、熱赤外画像上では家屋の周りの林内に熱源が1つ確認できるが、実際には庭に設置された照明であることがわかる。これらの熱源は、温度やサイズのみではシ

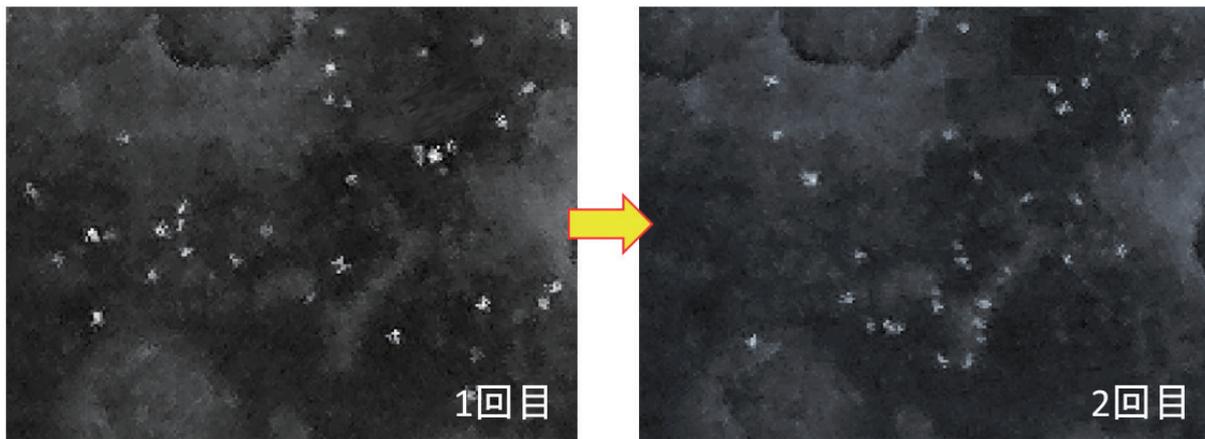


図11 観測1回目と2回目(約30分後)の比較

カと区別することが困難であったが、シカは輪郭がぼんやりとしているのに対し、街灯やマンホールは輪郭が比較的是っきりしていることから、これらの特徴を踏まえて判読することで識別が可能であった。これは、人工物が一定の温度を持つピクセルの集合体であるのに対し、シカは体の部位によって温度が違い、様々な温度のピクセルによって構成されるためと考えられる。また、図11のように、同一コースの1回目と2回目の熱赤外画像を比較し、移動の有無を確認することで人工物かどうかを判断できたことから、同一コースの複数回の観測が、動物か否かを判断する上で非常に有効であることがわかった。

4.2 画像判読結果と地上調査結果との比較

TABIによって観測した熱赤外画像の判読結果と、観測に同期して行った地上調査の結果の比較を行った。地上調査全体を通してTABI観測とのタイムラグが最小となるように計画したが、徒歩で移動したため各エリアにおけるTABI観測と地上調査の調査時間差は必ずしも一定とならなかった。ちなみに、地上調査中に、TABI観測を行っている航空機が何度か上空を通過したが、それによってシカが警戒したり移動したりするようなことは全くなかった。地上調査もTABI観測と同様に2回行っており、比較

表3 TABI観測と地上調査の検出頭数比較結果

エリア名	①熱観測 (熱源数)	②地上調査 (頭数)	時間差 (地上-熱観測)	検出率 (①/②)
公会堂北	98	96	-4分	102.1%
荒池	37	38	+3分	97.4%
博物館	18	22	+14分	81.8%
梅園	27	36	+6分	75.0%

にあたってはTABI観測に近い時間帯の地上調査結果をエリア毎に採用した。

地上調査とTABI観測の比較結果を表3に示す。「公会堂北」と「荒池」では、ほぼ100%の高い精度でシカを検出できていた。一方、「博物館」では、81%と検出率が低かったが、調査時間のタイムラグが14分と比較的大きく、シカが移動してしまったことにより精度が下がったと考えられる。さらに、「梅園」で検出率が低いのは、ウメの木等の広葉樹が点在しており、樹木下のシカが捉えられなかったためと考えられる。

図12は、「荒池」の熱赤外画像と、地上から手持ちのサーモカメラでシカを撮影した熱画像(以下、「サーモカメラ画像」と言う)とを詳細に比較したものである。TABI観測との時間差は約3分で、ほとんどのシカは動かずに地面に座っていた。

サーモカメラ画像は、TABIの熱赤外画像の下側中央付近に当たる位置から撮影してい

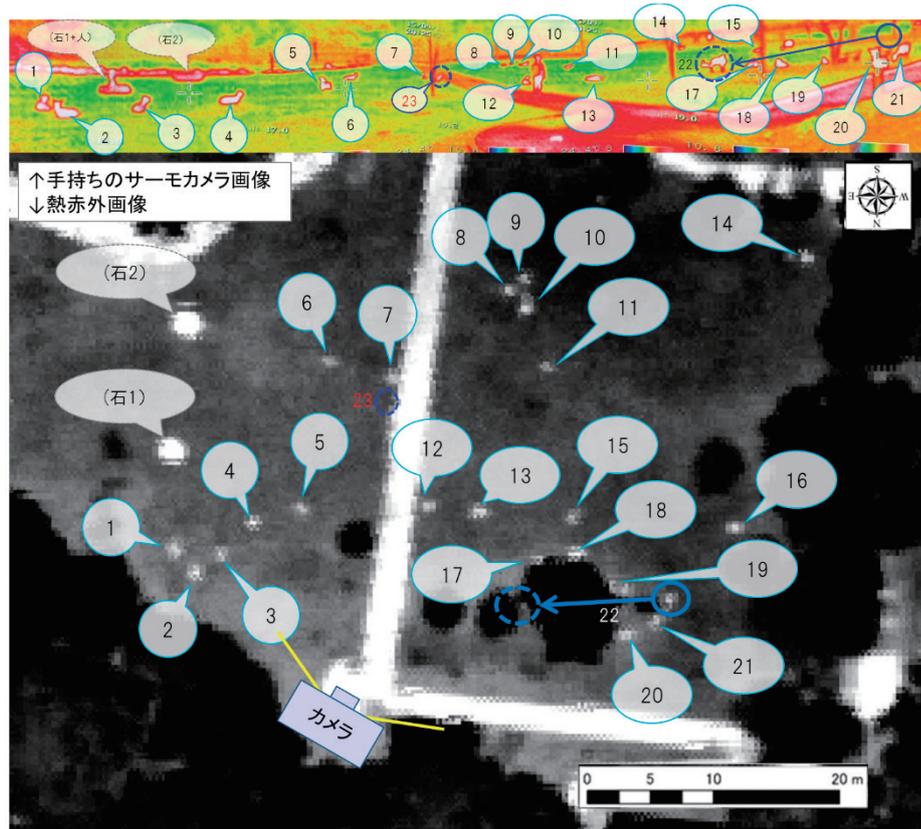


図12 サーモカメラ画像と熱赤外画像との比較

1～21のシカは、手持ちのサーモカメラ画像でも、熱赤外画像でも、同じ位置に確認できる。唯一位置が異なる22のシカは、3分の間に移動したと考えられる。また、23のシカはサーモカメラ画像では確認できるが、熱赤外画像では観測できていない。移動したか、または、アスファルト上にいるために捉えられていない可能性がある。

る。確認できた熱源に順番に番号を振っていくと、移動したと見られる22、23のシカを除いて、ほぼ全頭のシカの地上の様子を航空機による熱赤外画像でも正確に捉えられていた。なお、表3の合計頭数と図12の頭数が異なるのは、図12の比較は「荒池」の一部で行ったためである。

また、地上調査地には図13のように、街灯が無いために見通しが悪く、肉眼ではシカが容易に確認できないような場所もあったが、手持ちのサーモカメラ画像でこの場所を撮影したところ、数十頭のシカが群れを作っていることが確認できた。比較的近い場所にいるシカは、ハイビームの懐中電灯で照らすことによって、ルートセンサス法の要領で頭数をカウントできたが、広場の奥の方にいるシカを識別することは困難であった。これに対し、このような見通しの悪い場所でも、TABIの熱赤外画像では、地上

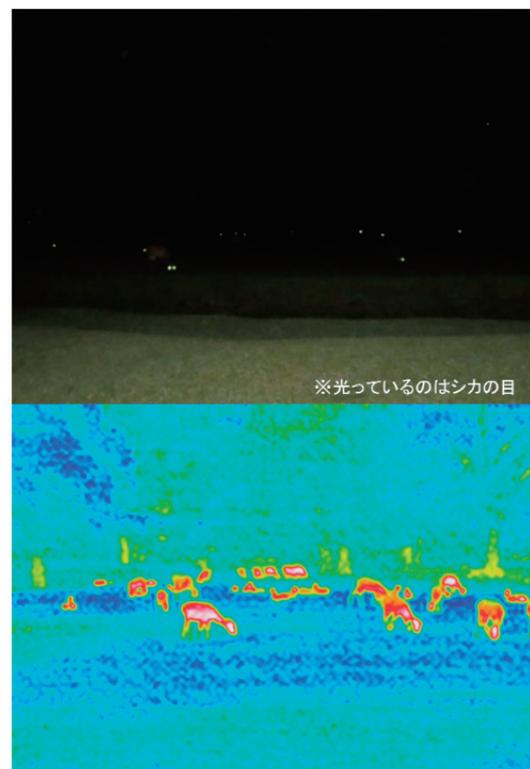


図13 現地写真(上)
手持ちのサーモカメラ画像(下)

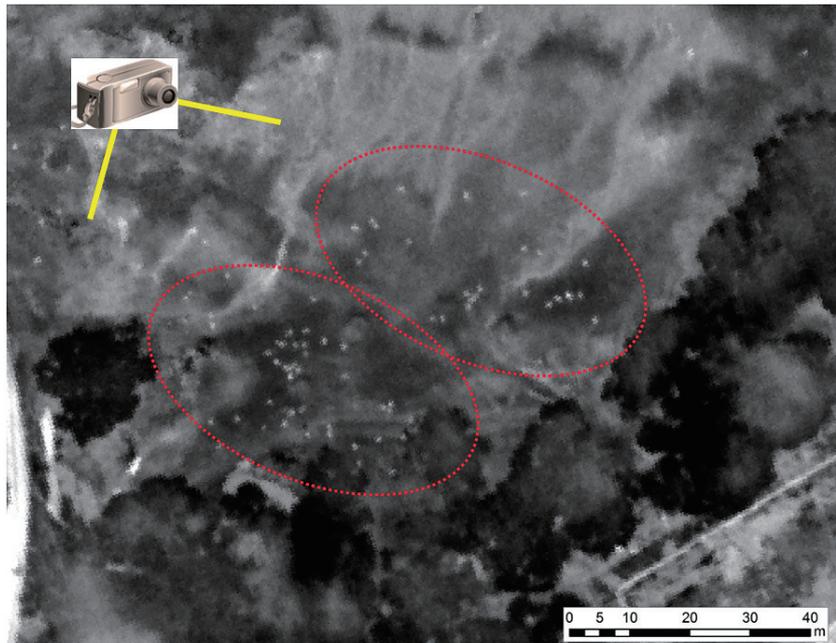


図14 地上では見通しの悪い場所の熱赤外画像（図13と同一箇所）

では十分確認できなかった場所までシカがはっきりと捉えられていた。図13と同一箇所の熱赤外画像を図14に示す。図13の現地写真は、図14の左上に当たる地点から撮影したものである。熱赤外画像判読の結果、図14の赤丸枠内には75頭、この広場全体では86頭のシカが検出できた。このことから、航空機を利用して上空から面的に観測を行うことは非常に有効であると言える。

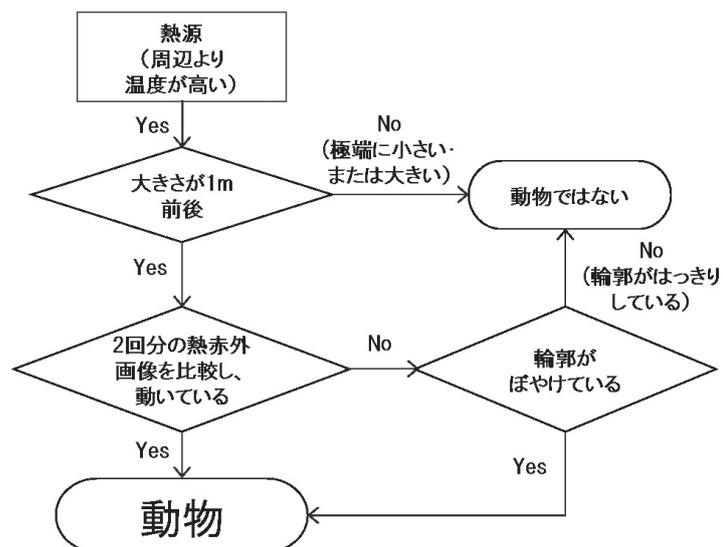


図15 シカ検出ワークフロー

5. 結果のまとめと考察

5.1 画像判読手法

TABIによる熱赤外画像の判読の結果、上空が開けていれば、高い精度で地上のシカの様子を捉えられることがわかった。ただし、樹冠が大きな広葉樹が存在している場所では、シカが樹木下に入ってしまうと検出精度が下がった。この他に、シカと同程度の大きさで形状が類似している街灯やマンホールが検出されたが、輪郭のぼやけ具合によって人工物かどうかを識別することが可能であった。また、数十分

の間隔を空けて同一コースを再度観測し、二回の熱赤外画像を比較し、熱源の移動を確認することで、動物か否かを識別することができた。以上の点を踏まえ、シカ検出において最適と思われるワークフローを図15に示す。

5.2 TABI 観測の適地

5.1で示したワークフローに従って、2016年1月に富士山西麓にてTABIによる熱赤外観測を行い、シカの判読を試みた。観測した場所は、

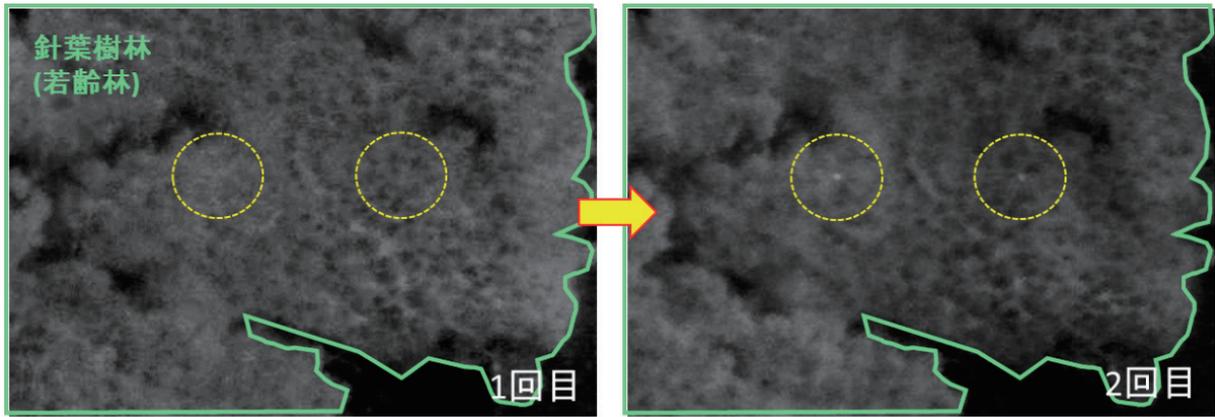


図16 富士山西麓 熱赤外画像

落葉広葉樹林と常緑針葉樹の植林地がパッチ状に分布しているエリアである。奈良公園と同様に、同一コースを二回計測し、動く熱源を検出したところ、上空から地表が透けて見えているような若齢林ではシカを検出することができた。結果の一部を図16に示す。動く熱源は -5°C 前後、周辺の森林の表面温度は $-7\sim-6^{\circ}\text{C}$ であった。寒冷地に生息する動物は断熱効果の高い毛皮に覆われており、冬季には体表温度と周辺との温度差が小さくなる場合があるが¹¹⁾、今回観測された熱源と周辺温度にほとんど差がないのもそのためと思われる。しかし、TABIは温度分解能が 0.05°C と高いため、温度差が小さい熱源でも周辺地物との識別が可能であった。

これらの結果より、上空が完全に開けた場所だけでなく、樹木の間隔が広がったり落葉していたりして、地面が十分に透けている森林帯において熱源を捉えることが可能であることが分かった。一方で、遮蔽物が多い森林内の画像判読には多少の慣れが必要であり、上空が開けた広場に比べて難易度が高かった。

観測の難易度を示す概念図を図17に示す。広葉樹は樹冠が横に広がっており密であるため、着葉期には、広場やその他の樹林帯に比べて地面が確認しにくい。また、針葉樹林は多くの場合人工林で、木が等間隔に並んでいるの

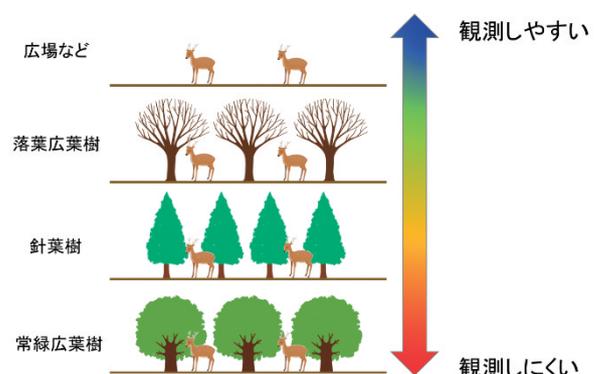


図17 対象地による観察のしやすさ

に対し、広葉樹林は樹冠の並びが不均一で生育状況にばらつきがあるため、本調査の手法によって熱源を検出できるかどうかは広葉樹林の状態に依存すると考えられる。従って、事前に対象地域の森林の生育状況や観測時期を検討し、落葉広葉樹林が含まれる場合には落葉期にあたる冬季に調査を行うことが望ましい。

また、「1. はじめに」でも述べた通り、シカによる食害は非常に深刻である。図18に示すように、下層植生が食い尽くされ、シカの嗜好性の低い植物のみが繁茂し、樹木がシカによる樹皮の皮剥ぎによって立ち枯れを起し荒廃した結果、広場のような環境となっている森林が全国に存在する。このようなシカの被害が深刻な地域に共通して言えることは、上空が開けているということである。従って、本来は観測を行いにくい常緑広葉樹林であっても、被害



図18 シカ被害が甚大で森林が消失した地域の例
 ※大台ヶ原(図左)における荒廃は台風起因するが、シカの食害が森林の状態をさらに悪化させている。

が甚大な地域では、上空からのシカ調査が可能となり、本手法が現状を把握し今後の対策を講じる上で有用であると考えられる。

このように、調査地域の現況を把握し、観測時期や場所の検討を行った上で観測を行えば、これまで人の立ち入りが難しく調査できなかったような地域でも、昼夜問わず短時間で調査が可能となり、シカ被害地の現状把握、例えばシカの侵入経路や移動経路の把握、密度推定を行うことをこれまで以上に効率よく行うことが期待できる。常緑広葉森林帯には一様に適用できないとするのではなく、本手法の向き・不向きを把握した上で、地域特性に応じた季節や時間等の観測条件の選定を行うことが重要である。

6. 今後の課題と展望

航空機に熱赤外センサ TABI を搭載し観測を行った結果、動物を熱源として検出することが可能であること、ある程度地面が透けて見えていけば、森林域でも観測が可能であることがわかった。本来なら観測が難しい常緑樹林が優勢な地域であっても、既に被害が甚大であれば上空が開けている可能性が高く、本手法が有用であると考えられる。今後の課題としては、①さらなる検出精度の向上、②熱赤外画像判読の自動化、③シカとその他の動物の識別等が挙げられる。

①に関しては、同時搭載しているレーザ計測

装置で取得したデータや、日中の調査であればハイパースペクトルセンサの可視画像を併用し、精度の向上を目指す。②に関しては、作業効率を高めるため、現在、自動化プログラムの開発を検討している。③については、現段階の検証では動物の熱源の分類には及んでいないが、熱源の大きさや検出密度等を考慮すれば、分類が可能と考えられる。

今後は検証を重ね、クマ等の大型野生獣や、タンチョウ等の野鳥、アザラシ等の海洋生物等、シカ以外の動物の検出も検討し、さらなる野生動物調査への利用の可能性について探っていきたい。

■参考文献

- 1) 林野庁：野生鳥獣による森林被害、<http://www.rinya.maff.go.jp/j/hogo/higai/tyouju.html>、2015
- 2) 農林水産省：全国の野生鳥獣による農作物被害状況、pp1、2014
- 3) 環境省：統計手法による全国のニホンジカ及びイノシシの個体数推定等について、pp1-9、2015
- 4) 環境省：全国のニホンジカ及びイノシシの生息分布拡大状況調査、pp1-3、2015
- 5) 依光良三：シカと日本の森林、pp16-24、2011
- 6) 環境省：鳥獣の保護及び狩猟の適正化に関する法律（鳥獣保護法）の一部を改正す

- る法律について、pp1、2015
- 7) 環境省 近畿地方環境事務所：生息密度把握手法解説、pp.2
- 8) 北海道：ヘリコプターセンサスの調査結果の概要、<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ks/skn/sika/heli.htm>、2015
- 9) 堀野ほか：赤外線によるニホンジカ空中センサス法の開発、哺乳類化学 33 (2) pp99-107、1994
- 10) 小山ほか：ニホンジカの食害による森林被害の実態と防除技術の開発、長野県林業総合センター研究報告 24 (24) pp1-24、2010
- 11) 山田ほか：焦電型自動撮影カメラの検知率に背景温度と動物の体表温度が及ぼす影響、東京農大農学集報 60 (1) pp57-62、2015

■執筆者

田村 恵子 (たむら あやこ)

中日本航空株式会社



(共著者) 所属は筆頭著者に同じ

宮坂 聡 (みやさか さとし)

吉田 夏樹 (よしだ なつき)

宇野女 草太 (うのめ そうた)