



Title	マイクロ波レーダの動物行動記録への応用
Author(s)	岩熊, 敏夫; Iwakuma, Toshio; 野原, 精一 他
Description	電子資料追加
Citation	低温科学, 80, 465-475
Issue Date	2022-03-31
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.80.465
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/84945
Type	departmental bulletin paper
File Information	34_p465-475_LT80.pdf, 本文



マイクロ波レーダの動物行動記録への応用

岩熊 敏夫¹⁾, 野原 精一²⁾

2022年2月8日受付, 2022年2月28日受理

マイクロ波レーダモジュールを搭載した電波式行動記録装置による野生動物のモニタリング手法を尾瀬で検討した。この装置を湿原および河岸付近に設置し、同時に設置したトレイルカメラの撮影記録と比較した。トレイルカメラは湿原内では木道上の歩行者を記録し、河岸付近では夜間に動物を記録し、鳥も記録していた。背景に対する物体の表面温度差と動きにより作動するトレイルカメラは、調査開始・終了時の人の動きを記録していないことが多く (false negative)、人または動物が記録されていた場合 (true positive) と記録されていない場合 (false positive) の平均気温を比較すると、前者の方が低かった。一方、電波式行動記録装置は常時マイクロ波を送信し、移動する対象物との相対速度を検出するため、カメラに写された人や動物のほか、夜間に動物の動きと推定される信号を多数検出した。幅広い温度領域で記録を行える電波式行動記録装置を、被写体を確認できるカメラと併用し野生動物モニタリングに応用することが推奨された。

Application of a microwave Doppler radar system for monitoring animal behavior

Toshio Iwakuma¹, Seiichi Nohara²

A radio-wave motion recorder equipped with a microwave-radar module was tested for monitoring animal behavior in the Oze area. Recorders were placed at various places of a mire and at the riverside together with trail cameras for comparison. The trail camera near the mire boardwalk caught hikers walking on it while the camera at the riverside caught animals at night and birds as well. For trail cameras operated only on the occasion detecting moving objects with surface temperatures different from background objects, often failed to detect movements of a researcher at the start and at the end of the survey (false negative). Mean temperatures when images were recorded with humans or animals (true positive) was lower than mean temperatures when images were recorded with no humans or animals (false positive). The radio-wave recorder emitting microwave radiation all the time for detecting moving objects, recorded many signals that were regarded as animals moving at night. It was recommended to use the radio wave equipment for wildlife monitoring under a wide range of air temperatures together with trail cameras for the identification of species.

キーワード：尾瀬, マイクロ波レーダ, トレイルカメラ, モニタリング手法, 動物行動
Oze area, microwave radar, trail camera, monitoring method, animal behavior

責任著者
岩熊 敏夫
連絡先
〒108-0074 東京都港区
e-mail: toshio.iwakuma@nifty.com

1) 北海道大学
2) 国立環境研究所 生物多様性領域
1 Hokkaido University, Sapporo, Japan
2 Biodiversity Division, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan

1. はじめに

野原 (2012) は尾瀬の動物相に関する文献を整理し、6 目 12 科 32 種の哺乳類、15 目 37 科 118 種の鳥類の生息記録があることを示した。第 1 次総合学術調査時点 (1950～1952 年度) では尾瀬地域にはニホンジカ (*Cervus nippon*, 以下「シカ」と略す) はいないとされていた (徳田, 1954)。内藤・木村 (1996) が 1995 年に下田代にシカが侵入したことを報告して以来、尾瀬地域における植生攪乱地が増加する傾向にあるため、御池田代において赤外線センサーカメラを用いたシカの生息状況調査が継続され (木村ほか, 2016)、同様な調査は山ノ鼻研究見本園など (斎藤ほか, 2004) や尾瀬東部 (木村・内藤, 2006) で行われている。

赤外線センサーとカメラを組合せたセンサーカメラはフィルムカメラの頃から長い間野生動物調査に用いられてきた (斎藤ほか, 2004; 木村・内藤, 2006; 木村ほか, 2016)。非積雪期の尾瀬東部におけるセンサーカメラ調査では 8 目 8 科 8 種の動物が撮影され、画像の 66% をシカが占めていたことから 2004 年時点で尾瀬の至る所にシカが侵入していると判断された (木村・内藤, 2006)。

センサーカメラを用いた調査では、機種によって検知範囲や感度が異なり、また木漏れ日や植物の揺れを赤外線センサーが感知することもあることから、1 調査地点に複数台の同一機種のカメラを設置することが推奨されている (環境省, 2019)。近年はより安価なトレイルカメラが普及し、様々なモニタリングに活用されている。このトレイルカメラについても、メーカーによって性能は様々で、センサー感度やトリガースピードは機種による差が非常に大きいことが指摘されている (浪花ほか, 2009)。

本研究では野生動物の行動を把握する新規手法として、電波式行動記録装置を湿原および河川脇に設置し、同時に設置したトレイルカメラの撮影記録と比較を行いつつ、行動記録装置の有効性を検討した。二つの装置は原理的に異なり、トレイルカメラが赤外線を発する対象物の動きを検知したときのみ作動するのに対し、電波式行動記録装置は常時マイクロ波を送信し、移動する対象物との相対速度を検出する。すでに同一原理の計測装置は、電波流速計として河川流量観測に用いられている (山口・新里, 1994; 手計, 2018)。同型式の電波流速計では橋上で電波送受信部を俯角 45° に保つことで水平距離 10～12 m (直線距離 14～17 m) の河川表面流速を安定的に計測している。このことから、電波送受信部に周波

数計を接続することにより直線距離約 20 m までの野生動物の行動を捕捉可能と考えた。予備的な実験で、電波送受信部から 6 m までの距離で人の動きを検知することを確認している (電子資料 2 図 1)。

本研究はシカの侵入により湿原の劣化が懸念される尾瀬ヶ原において、電波式行動記録装置を用いて、シカなどの野生動物の行動を連続的にモニタリングする手法の開発を目指した。トレイルカメラの作動状況、取得画像データとの照合により、装置の性能を検討した。

2. 方法

2.1 調査地点

2017 年 6 月 6～7 日に尾瀬ヶ原上田代から中田代のドローン撮影を行い、山ノ鼻研究見本園において特定されたシカ道 (図 1) に沿って M1, M2, M3 および M5 の地点を設定した (標高 1,410～1,412 m)。M3 地点は研究見本園外周木道と中央を貫通する木道の交差点近くに位置している (図 2a)。上田代では川上川から分岐して猫又川に合流する河川の右岸に K3 地点を設定した (標高 1,408 m)。2019 年 8 月 7 日に撮影したドローンから K3 地点付近の地形・植生の把握を行った (図 2b)。

2018 年 7 月 16～19 日に研究見本園の M1～M5 地点で調査 1 を行い、2019 年 9 月 17 日～10 月 10 日に上田代の K3 地点で調査 2 を行った。対応する期間の気象観測は山の鼻ビジターセンター裏の地点 Y1 (標高 1,411 m) で行った。また、時間降水量は国土交通省鳩待峠観測所ならびに三平峠観測所の観測記録を参照した (図 1)。

2.2 電波式行動記録装置

電波式行動記録装置 (以下「行動記録装置」と呼ぶ) は電波送受信部 (K55D-45, 東建エンジニアリング)、計測制御部 (RT7 周波数計, 東建エンジニアリング) および 12V 単 1 乾電池ボックスで構成されるレーダである。計測制御部では 0.2 s 毎の計測値 5 回分を平均し、マイクロ SD カードに記録する。制御部と電池ボックスをプラスチックケースに収納し調査地点に設置した (図 3)。

電波送受信部に搭載しているドップラーモジュールの送信周波数代表値は 24.2 GHz、水平ビーム幅 (半値幅) は 80°、鉛直ビーム幅は 32°、動作温度範囲は -40～85°C である。装置の動作温度範囲は -20～60°C である。調査 1 ではトレイルカメラから約 30 cm 離して地上 45 cm 高さに電波送受信部を設置した。調査 2 ではトレイ



図1：研究見本園（M1, M2, M3, M5）、上田代（K3）、山の鼻ビジターセンター裏（Y1）の調査地点および近隣雨量観測所（鳩待峠および三平峠）。

ルカメラの30 cm上に、地上180 cm高さに設置した。送信方向の俯角は 4° であった。

対象物がレーダ方向に移動しているとき、反射波はドップラー効果によって周波数偏移を起こす。 f_0 を送信

$$f_D = [(c + v_r) / (c - v_r) - 1] f_0 \approx 2 (v_r / c) f_0 \quad (1)$$

で表される（電子情報通信学会，1991）。任意の方向に移動する対象物の速度を v 、速度方向と電波送受信部に対する半径方向との間の角度を a とすれば、

$$f_D = 2 f_0 (v / c) \cos a \quad (2)$$

である。これに $c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ 、 $f = 24.2 \text{ GHz}$ を代入すると、

$$f_D = k v \cos a = k v_r, \quad k = 161.3 \text{ m}^{-1} \quad (3)$$

となる。

表1に調査に使用した2つの周波数計について、各周波数帯の中心ドップラー周波数およびドップラー周波数に対応する対象物の相対速度を示す。

電波送受信部に対する人間の相対速度への周波数計の応答を調べる予備実験を行った。電波送受信部との相対距離を6 m, 5 m, 4 m, 3 m, 2 m, 1 mの6段階にとり、

周波数、 v_r を対象物の電波送受信部に対する半径方向の相対速度、 c を光速とすると受信波の周波数偏移（ドップラー周波数） f_D は、

低速歩行（ $0.14 \sim 0.24 \text{ m s}^{-1}$ ）、通常歩行（ $0.91 \sim 1.44 \text{ m s}^{-1}$ ）の2段階の速度で電波送受信部に向かって1 m移動する動作を10回ずつ繰り返した。5.5 mの平均距離でも低速に移動する対象物を十分に捕捉していた。また、正負いずれの向きの移動でも同じ強度の信号が得られていた（電子資料2図1a, b）。

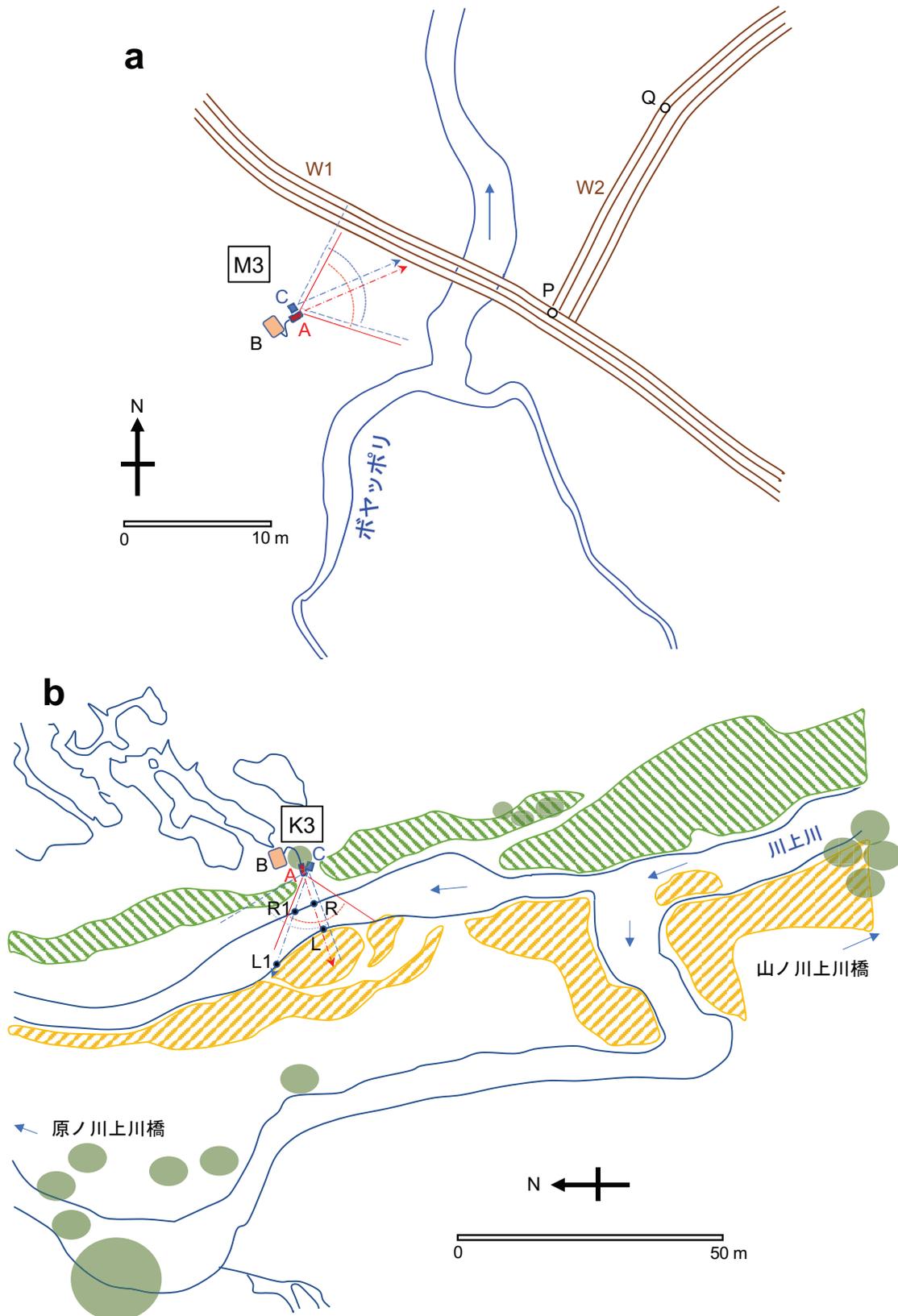


図2：(a) 研究見本園 M3 地点付近および (b) 上田代 K3 地点付近の詳細。動物行動記録装置の電波送受信部 (A) の送信方向と水平ビーム幅 (半値幅) を赤色鎖線と実線で示し、計測制御部と乾電池ボックスを格納したプラスチックボックス (B) の位置を青枠で示す。トレイルカメラ (C) の撮影方向と画角は青色鎖線と破線で示す。図 2a には外周木道 (W1) と中央を貫通する木道 (W2) を示したが、T または C から木道上の P までは約 18 m、Q までは約 28 m である。図 2b では T から送信方向に分岐河川右岸 (R) までの水平距離は約 5 m、左岸 (L) までの水平距離は約 10 m である。C から撮影方向に右岸 (R1) までの距離は約 6.5 m、左岸 (L1) までの距離は 16 m である。茶色斜線部はヨシ、緑色斜線部はササ、緑色の円は樹木を示す。

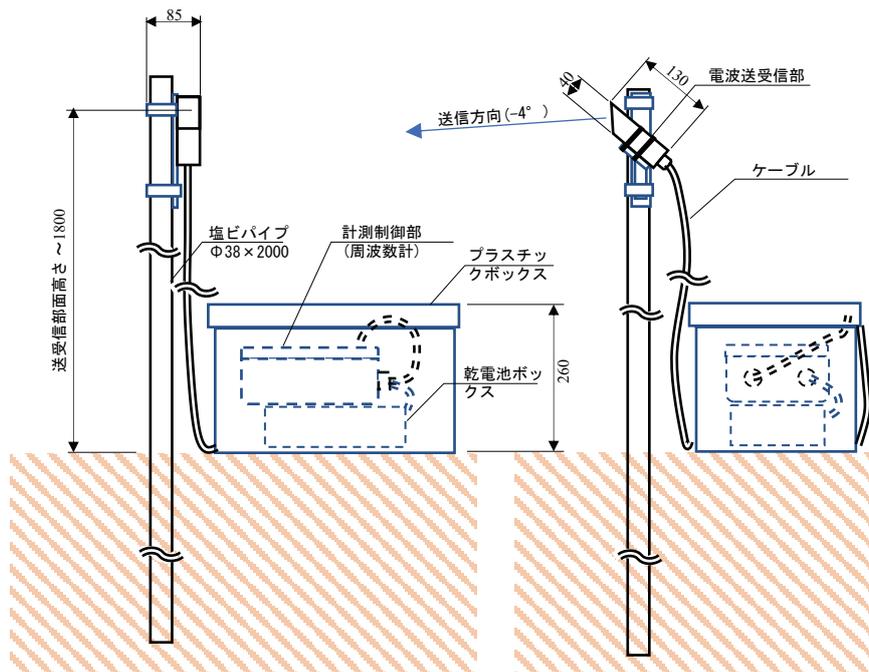


図3：動物行動記録装置の構成（電波送受信部、計測制御部、乾電池ボックス）と設置方法（K3地点）。電波送受信部の送信方向は俯角 4° である。研究見本園（M1, M2, M3, M5）における調査では電波送受信部高さは45 cm、送信方向は仰角 15° に設定した。

表1：ドップラー周波数帯に対応する電波送受信部と対象物の相対速度。

RT7型周波数計1

周波数帯	中心周波数, f_D Hz	対応する相対速度, v_f	
		m s^{-1}	km h^{-1}
P1	0.75	0.0046	0.017
P2	3.2	0.020	0.071
P3	16.6	0.103	0.37
P4	95	0.59	2.1
P5	550	3.4	12.3

RT7型周波数計2

周波数帯	中心周波数, f_D Hz	対応する相対速度, v_f	
		m s^{-1}	km h^{-1}
P1	0.7	0.0043	0.016
P2	3	0.019	0.067
P3	16.5	0.102	0.37
P4	96	0.60	2.14
P5	541	3.4	12.1

以上をふまえ、行動記録装置で調査を行う際には、開始時と終了時に、電波送受信部から約6 m 遠方より約 1 m s^{-1} の速度で歩行して接近、または歩行して離れる行動を信号として記録し、時間の較正を行った。調査1の結果より、単1乾電池8本1組で54時間連続作動可能であったことから（電子資料2 図2c, d）、調査2では3組並列の乾電池を電源として約1週間の連続観測を行った。

2.3 トレイルカメラ

トレイルカメラ（Fivanus）の受動型赤外線センサー

（PIRセンサー）は 25°C よりも低い温度で25 mまでの熱と動きを、側面のセンサーでは 120° の角度で検知して撮影を開始する。調査1ではM1, M2, M3, M5の各地点に、塩ビパイプポールに50 cm高さにトレイルカメラを取り付け、各シーン3枚の静止画撮影を行った。調査2ではK3地点の木の幹に1.5 mの高さに取り付け、各シーン3枚の静止画と5秒の動画撮影を行った。調査開始時および終了時に行動記録装置に調査者の動作を記録する際に、トレイルカメラにも画像として記録されることがあった。その場合にはその行動の時間によりトレイルカメラの時計の較正を行った。

2.4 気象項目

山の鼻ビジターセンター（山の鼻気象観測所，地点 Y1）裏の気象ロボット脇にポールを立てて地上高度 2 m の位置にセンサーシェルターを取りつけ，温湿度センサー（LR9502，日置電機）を設置した．温湿度ロガー（データミニ LR5001，日置電機）はポリ容器内に収納し，2 分間隔で瞬時値の記録を行った（2018 年 7 月および 2019 年 9～10 月）．

山の鼻気象観測所では 2016 年以後降水量を測定していないため，近隣の観測所のデータを使用した．山の鼻気象観測所で 1981 年から 2010 年の夏期に測定された日降水量は国土交通省鳩待峠観測所ならびに三平峠観測所（図 1）の観測データとの相関が高かったことから（岩熊・野原，2022）．両観測所の時間降水量（国土交通省，2021）を参照した．

2.5 データ解析

トレイルカメラの動物の撮影記録の有無を目的変数とし，気温を説明変数とした分散分析を行った．データ解析および統計解析には RStudio 上の R3.5.2（R Core Team，2020）を使用した．

3. 結果

3.1 調査 1

調査期間（2018 年 7 月 16 日～19 日）の気温は 11.7℃～29.2℃であった（電子資料 2 図 2）．7 月 17 日に行動記録装置のデータ回収と地点間の移動を行い 19 日に装置を回収した．2 組の装置（装置 1 および装置 2）を場所と期間を変えて使用することで，合計 4 地点での観測を行った．地点 1, 2, 5 では周囲の草高は約 30～40 cm であったが，地点 3 では草高が 50 cm であったため，この地点では電波送受信部が草の影響を受けた．

3.1.1 電源

周波数計の電源電圧は気温と連動して変動し，17.5℃の日較差で約 0.6V 変動した．夜間の電池電源による周波数計の作動には注意を要する．周波数計は電源電圧が 10.4V に低下すると記録を停止し，電圧が 10.5V 以上に回復すると正時（0:00，1:00 など）に記録を再開した．夏の野外では単 1 アルカリ乾電池 8 本で約 54 時間連続して動作可能であった（電子資料 2 図 2b）．これより長い期間の連続調査には，その期間に応じて並列で電池数を増設すればよい．7 月 19 日 7:50～8:15 の間装置の回収を行ったが，外気の湿度が 100% のため（電子資料

2 図 2a），電池表面に結露がみられ，調査期間中の夜間から朝にかけて結露が発生していたと推測されたが，電源の性能への影響は不明である．

3.1.2 周波数帯別信号（電子資料 2 図 3～電子資料 2 図 6）

どの地点においても，6 時～18 時の間に周波数帯 P1～P5 の信号（電圧値）が高くなり，昼に上昇するトレンドとノイズおよび何らかの信号の組合せを示した．周波数帯 P1 と P2 は，電波送受信部との相対速度 0.4～2 cm s⁻¹ の遅い速度の動きを検出するので，主に微風による草の揺らぎや蒸発散による乱流の影響が検出されていると考えられる．周波数帯 P4 と P5 の信号は電波送受信部との相対速度 0.6～3 m s⁻¹ 程度，P3 は 0.1 m s⁻¹ 程度の速度を検出するので，動物の動きを捉えると考えられる．また，装置の設置時と回収時の人の動きは周波数帯 P3，P4 および P5 に明瞭なスパイク信号が記録されていた（電子資料 2 図 3～電子資料 2 図 6 の P 印）．

3.1.3 動物行動記録（電子資料 2 図 3～電子資料 2 図 6）

高周波数帯の P4 と P5 の信号から，地点 1 では 21 時～23 時の間に動物の行動と考えられるスパイク状の信号が複数回検出された．

高周波数帯／低周波数帯信号比である P4/P1，P5/P1，(P4+P5)/P1 および (P4+P5)/(P1+P2) を調べてみると，いずれの比も，昼間（6 時～18 時）の P4 と P5 の信号ノイズが低減され，特異的なスパイク信号がより明瞭に示された（電子資料 2 図 3～電子資料 2 図 6）．一方で，夕方と早朝を含む夜間（18 時～6 時）の P4 と P5 の信号ノイズは増幅された．

P4/P1，P5/P1，(P4+P5)/P1 および (P4+P5)/(P1+P2) の間の違いは小さいことと，1～3 m s⁻¹ 程度の比較的速い物体の動きを示す指標としては P5 を含む指標が適当と考えられることから，周波数帯 P5 の信号と P5/P1 の周波数帯信号比により，人または動物の動きを特定した（電子資料 1 表 1a）．動物の動きと考えられるスパイク状の信号は，地点 1 では夜間に 8 回，夕方と午前に 1 回ずつ確認された．地点 2 では夜間に 5 回，早朝に 2 回，地点 5 では夜間に 4 回，地点 3 では夜間に 8 回，夕方に 3 回，早朝に 2 回確認された．スパイク状の信号 34 個の時間帯分布は日没から日の出までの間で 24 回で，そのうち 19 回は 19 時～23 時の間に集中していた（電子資料 1 表 1b）．

3. 1. 4 トレイルカメラ画像記録（電子資料1表2）

M1～M5の全ての地点において、観測開始時と終了時の観測者の移動は周波数帯P4およびP5に記録されていた（電子資料2図3～電子資料2図6）。トレイルカメラでは、M2の観測開始時のみ撮影されていた。また、調査者の到着と退出は各地点で観測開始時と観測終了時にあわせて4回撮影されるべきであるがM1とM5では全く記録されておらず、M2とM3ではそれぞれ2回記録されていたのみであった。

行動記録装置の観測期間内に、M1で8回、M2で11回、M5で6回、M3で27回、全てにおいて昼間のみ撮影が行われていた。さらに、M1、M2、M5では動物等は一切記録されていなかった（電子資料1表2）。

M3地点では27回の撮影全てが木道上の歩行者を捉えていた（電子資料1表2）。この地点は研究見本園の外周木道（図3a, W1）と中央を貫通する木道（図3a, W2）とが交差する地点（図3a, P）を見通す位置にあり、画像は全て木道W2を歩行する人を、ほぼ同じ位置で捉えていた（木道W2上のPからQに向かう区間）。トレイルカメラ（C、電波送受信機Aとほぼ同じ位置）から見た歩行する人とその進行方向が成す角度および人までの距離は、Pで $\angle CPQ \approx \angle APQ \approx 120^\circ$ および $CP \approx AP \approx 18\text{ m}$ 、Qで $\angle CQQ' \approx \angle AQQ' \approx 147^\circ$ （Q'はPQの延長線上の点）および $CQ \approx AQ \approx 28\text{ m}$ であった。トレイルカメラに対して円周方向の速度成分はP、Qの間で歩行速度の0.87～0.54倍、電波送受信機から半径方向の速度成分はP、Qの間で歩行速度の0.5～0.84倍であると推定された。一方で、外周木道W1はW2よりもカメラに近い位置にあり、距離も近いところでは約8mであったが、歩行者は記録されていなかった。

M3で歩行者を記録した時刻と行動記録装置の周波数帯P4の信号、周波数帯P5の信号および高周波数帯／低周波数帯信号比P5/P1を比較すると、概ね合致していたが、行動記録装置の方が遙かに多い回数の物体の動きを検出していた（電子資料2図6）。

Y1で測定された気温から、トレイルカメラ撮影時刻における気温を求めた（電子資料1表2）。M1～M5の全ての地点をまとめて、画像中に歩行者その他の動物類が記録されていない場合の気温の平均値は25.50℃（14.2～27.8℃, n=24）となり、歩行者が記録されている場合の平均値23.63℃（16.7～27.6℃, n=28）よりも高かった（ $p=0.0354$, Welch's t-test）。

3. 2 調査2

動物行動記録装置の調査期間（2019年9月17日～24

日）の気温は4.4℃～22.7℃（図4a）、トレイルカメラの調査期間（9月17日～10月10日）の気温は-0.3℃～23.0℃であった。

トレイルカメラが動物を撮影した時刻と行動記録装置の各周波数帯の信号、およびP5/P1などの信号比の記録とを比較すると、動物撮影時刻と合致する行動記録装置の信号ピークを複数の周波数帯に見つけることができた。P3以上の高周波数帯だけでなく、P1やP2など低周波数帯にも大きな信号ピークを検出できることがあった。川岸を移動する動物の動きは、遠方から電波送受信機に向けて近づくにつれて電波送受信機との角度は鋭角から鈍角になる。そのため、電波送受信機との相対速度は動物の移動速度に近い値から非常に遅い速度へ変化し、様々な周波数帯で信号として検出される。例えば図3bで、右岸を下流から上流（R）に向かう場合、Aから10m離れた場所では進行方向と電波送受信機（A）の半径方向が成す角度は約30°、Aに対する相対速度は移動速度の0.87倍、6.5m離れたR1（ $\angle A R_1 R \approx 50^\circ$ ）では0.64倍、最近接地点（R）では0倍になる。M3で信号として検出された木道の歩行者の動き（電子資料2図6）と比較すると、M3では速度の変化域が非常に大きいため、結果が異なった（図5）と考えられる。

9月17日～24日の間に降水イベントが5回観測されていた（図4c, d）。9月17日の22～23時には動物の動きと共に降水もカメラに収められていたが鳩待峠観測所で降水量が記録されたのは18日1～2時の間で、同日夕方の画像には増水の形跡はみられていない。他の降水イベント時にも川上川に顕著な増水はもたらししていないと推測された。その後台風の影響により、10月4日の3:00から24時間に鳩待峠で42mm三平峠で36mmの降水量が観測された（図4c, d）。この期間は映像が記録されておらず、10月5日の午後に、増水した川と共に木に止まる鳥が記録されていた（電子資料1表3）。

トレイルカメラ画像中に動物類が記録されていない場合の気温の平均値は19.33℃（10.1～22.7℃, n=17）で、動物類が記録されている場合の平均値11.78℃（6.9～20.5℃, n=102）よりも高かった（ $p=1.1 \times 10^{-6}$, Welch's t-test）。気温を説明変数、画像中の動物類の有無を目的変数とした分散分析により、動物類の撮影は気温に依存していることが示された（ $p=5.79 \times 10^{-15}$, 表2）。

4. 考察

本研究で使用した二つの装置は作動方法が原理的に異なる。電波式行動記録装置は常時マイクロ波を送信し、

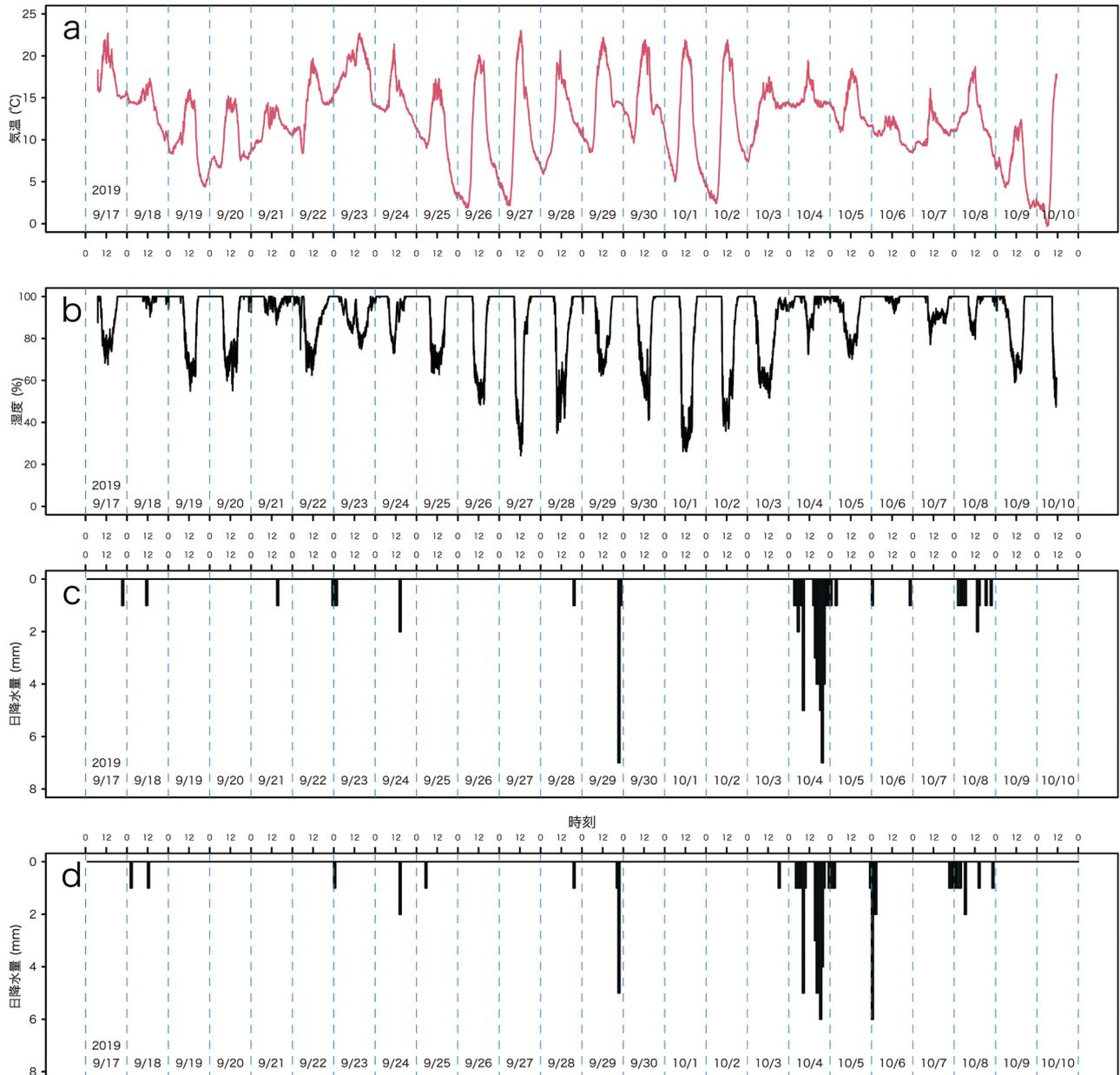


図4：2019年9月17日～10月10日の期間の山の鼻ビジターセンター裏（Y1地点）における（a）気温，（b）湿度，（c）鳩待峠観測所時間雨量（国土交通省，2021），（d）三平峠観測所時間雨量（国土交通省，2021）。

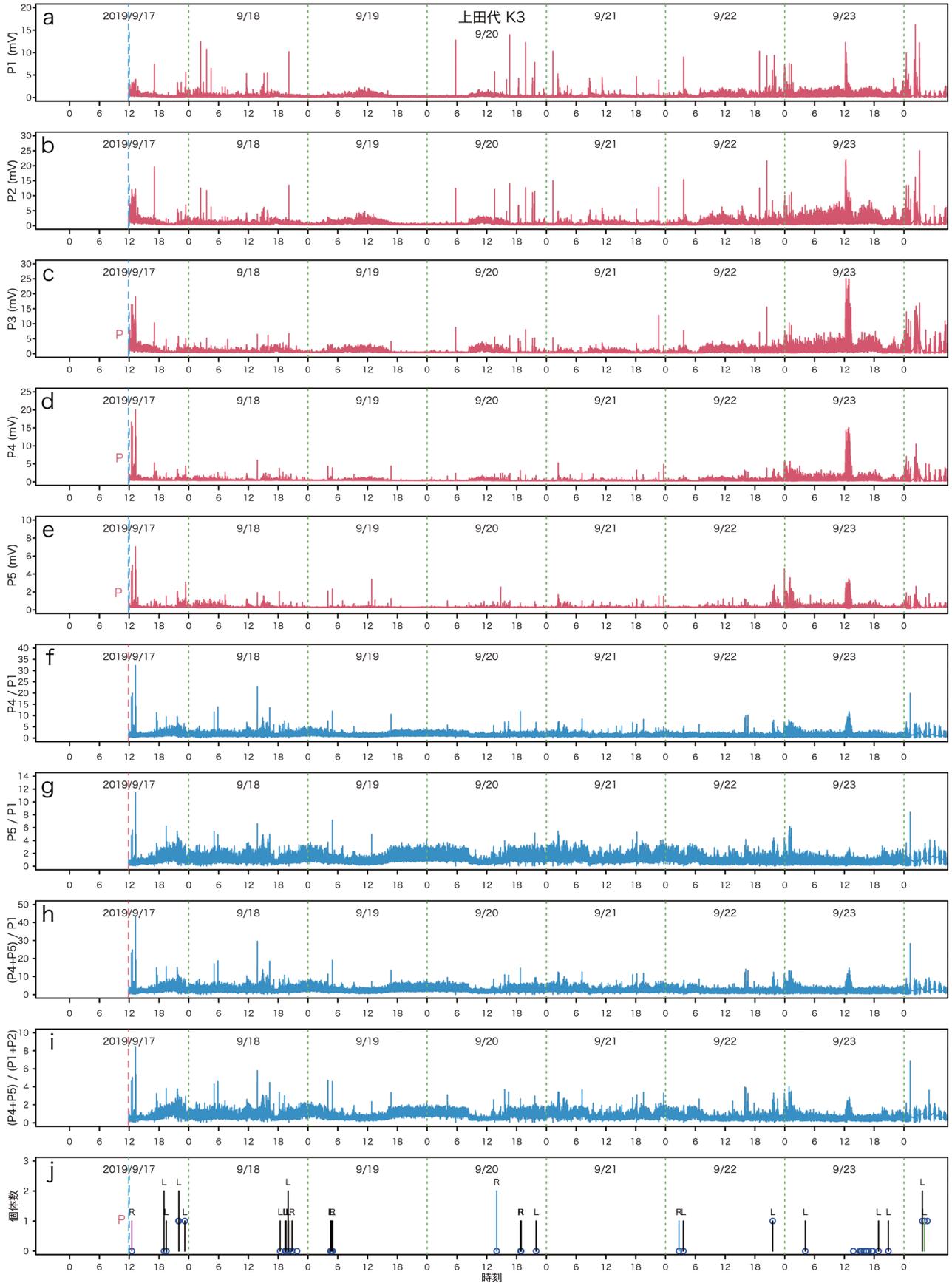


図5：(a) ~ (e) 周波数計の周波数帯別信号 P1 ~ P5 (mV), (f) 高周波数帯/低周波数帯信号比, P4 / P1, (g) P5 / P1, (h) (P4+P5) / P1, (i) (P4+P5) / (P1+P2), (j) トレイルカメラで記録された動物の時刻別個体数, 赤線：人間, 黒線：シカ, 青線：鳥, ○印：雨または風になびく草木を撮影, R：右岸個体, L：左岸個体, P：観測開始時に調査者の動きを記録した (図5 c, d, e, j).

表 2: トレイルカメラ画像中の哺乳類・鳥類の有無を目的変数, 気温を説明変数とした分散分析. K3 における 1999 年 9 ~ 10 月の観測期間内のデータ (電子資料 2 表 3) と, Y1 における気温測定値を用いた.

	自由度	平方和	平均平方和	F 値	p
気温	1	5.9367	5.9367	80.442	5.79×10^{-15} ***
残差	117	8.6347	0.0738		

移動する対象物との相対速度を検出する. 少なくともビーム幅内の物体の様々な方向・速度の動きをほぼ漏らさず検出できる. 調査 1, 調査 2 のいずれの温度環境下でも支障なく作動していたと考えられる.

トレイルカメラは背景に対する物体の表面温度差と動きにより作動する. 物体の表面からトレイルカメラに到達する光は, 透過光を無視すれば, 物体からの放射と周囲の熱を反映した物体表面の反射光の合計である. トレイルカメラの PIR センサー内部の焦電素子の温度は, 物体から受ける光によって変化する. 温度変化で焦電素子の表面に発生する電荷が信号として検知される (Welbourne et al., 2016). カメラから放射状に配置された感知軸内で, 背景とは表面温度が十分に異なる対象物が横切る時に信号が検出される.

本研究においてトレイルカメラは, ①調査開始・終了時の人の動きを記録していないことが多く (false negative, 調査 1), ②人または動物が記録されていた場合 (true positive) と記録されていない場合 (false positive) の平均気温を比較すると, 前者の方が低かった (調査 1, 2). ①の調査 1 における false negative は, 観測開始時・終了時の調査者の移動が 6/8, 調査者の到着と退出が 14/16, 合計で 20/24 (83%) であった. Newly et al. (2015) はタイムラプスカメラで記録された餌場のヒツジの動きを基準にして, 同時に使用した一般用のトレイルカメラの画像記録を調べ, false negative 率が 49 ~ 68% に及ぶことを示した. 本研究の調査 1 では調査者がトレイルカメラに向かう線上を移動していたために, 感知軸の PIR センサーに検知されず false negative とされていた可能性が高い.

②に関しては調査 1, 調査 2 のいずれの場合も, 撮影時の気温が低い場合に人や動物が記録されていることが示された. PIR センサーは背景として大気温度を測っているわけではない. 背景の湿原, 河川や草木の表面温度はモザイク状に異なるであろうが, 同一地点で観測を行う場合, 平均的には気温と相関を保ちながら経時変動をすると考えられるので, 気温は背景の表面温度の指標とみなせるであろう. 本研究の場合, 平均気温が低いほど, 人または動物の表面温度と背景の表面温度との差が大きかったと言える. 気温の高い夏期には人間の動きに

反応していなかった. ただし, 木道上では比較的気温の高い 27.5 ~ 27.6°C の環境下でもカメラに記録されていたことから (電子資料 1 表 2), トレイルカメラに使われる PIR センサーは, 同一機種であっても使用条件により動物の検知機能は大きく異なるようである. 浪花ほか (2009) によれば, メーカーによりトレイルカメラの性能は様々であり, 動物を感知するセンサの感度や, センサーが動物を感知してから撮影されるまでの時間については機種ごとの差が非常に大きい. 現行の機種において留意すべき事項であろう.

湿原内の 4 地点の観測ではトレイルカメラは木道に近い M3 地点で歩行者を記録した以外に動物等は記録していなかった. 河岸付近の K3 地点のカメラは夜間にシカを捉えていたほか, 鳥も記録していた. 電波式行動記録装置はこれら人や動物の行動を検知しており, さらに, 主に夜間に動物の動きと推定される信号を多数検出した. 行動記録装置はトレイルカメラよりも遙かに多くの対象物の動きを検知していたが, 単独ではその対象物の種類を特定できない. 電波式行動記録装置は高温でも低温でも記録を行える. トレイルカメラを併用することで動物の種類を記録しつつ詳細な行動の観測を行える. 周波数帯別の信号強度から, 動物までの距離と速度を推定することも可能となろう.

信号に及ぼす風による植生の揺らぎの影響や, 風および蒸発散による大気乱流拡散の影響の解明は今後の課題である. マイクロ波レーダは感雨計や流速計としても使われることから, 降水または大気中水分量, 蒸発散量や風速などを同時に記録している可能性がある. 各周波数帯の信号処理によりこれらの環境因子を分離し定量化することが可能であるか, 更なる検討が必要である. 野外におけるモニタリング機器として継続使用できるためには, ソーラーパネルの利用など電源の安定供給が必要である. さらに, 通信環境が整備されればリアルタイムに動物行動をモニタリングすることも可能になろう.

トレイルカメラに起こりがちの false negative や false positive を補うため, カメラを同一地点に複数台 (環境省, 2019) あるいは方向を変えて複数台 (Pease et al., 2016) 設置することが推奨されている. 近年の画像解析技術の発展はめざましいが, それでも画像解析が万能とは言え

ず、トレイルカメラにそれとは異なる原理の電波式行動記録装置を組み合わせることで、モニタリングの精度が高まることが期待される。

謝辞

本研究は第4次尾瀬総合学術調査(2017～2019年度)の一環として行われた。また、2017年度環境省生物多様性保全事業「尾瀬地域における生物多様性保全推進のための情報整備事業」(尾瀬総合学術調査推進協議会)の長期広域モニタリングシステムの構築の一環として行われた。関係諸機関への現地調査許可申請にあたっては、事務局である公益財団法人尾瀬保護財団にご尽力いただいた。株式会社東建エンジニアリングにはマイクロ波応用の計測装置一式を研究用として貸与いただいた。温湿度計測、ドローン撮影およびトレイルカメラ調査は科学研究費補助金「ダム湖沼・湿原における環境放射能の流出評価に関する研究」(基盤研究(B),代表:野原精一)の補助を受けて行われた。

引用文献

- 電子情報通信学会(1991)レーダ信号処理技術. 電子情報通信学会, 東京.
- 岩熊敏夫, 野原精一(2022)尾瀬地域内外における降水量の空間相関. 低温科学, **80**, 549-570.
- 環境省自然環境局国立公園課(2019)ニホンジカに係る生態系維持回復事業計画策定ガイドライン. URL: <https://www.env.go.jp/press/106643.html> (2019年3月27日参照)
- 木村吉幸, 菅原宏理, 内藤俊彦(2016)尾瀬国立公園御池田代のニホンジカ-平成26年(2014)の自動撮影装置(センサーカメラ)調査. 尾瀬の保護と復元, **32**, 1-7.
- 木村吉幸, 内藤俊彦(2006)尾瀬地域のニホンジカについて-平成16・17年(2004・2005)の自動撮影装置による調査結果. 尾瀬の保護と復元, **27**, 51-71.
- 国土交通省(2021)水文水質データベース. URL: <http://www1.river.go.jp/> (2021.11.20参照)
- 斎藤 晋, 片山満秋, 峰村 宏(2004)尾瀬の大型哺乳類第1報-ニホンジカの踏み跡や採食植物など. 尾瀬の自然保護, **27**, 43-47.
- 内藤俊彦, 木村吉幸(1996)尾瀬のニホンジカについて. 尾瀬の保護と復元, **22**, 89-94.
- 浪花彰彦, 榎本浩志, 揚妻直樹, 芦谷大太郎, 野田真人(2009)ユズの絞り滓を採食利用する野生動物の行動観察:自動撮影デジタルカメラを用いた観察手法の有効性について. 北方森林保全技術, **27**, 20-26.
- Newey, S., P. Davidson, S. Nazir, G. Fairhurst, F. Verdicchio, R. J. Irvine and R. van der Wal (2015) Limitations of recreational camera traps for wildlife management and conservation research: A practitioner's perspective. *Ambio*, **44**, S624-S635.
- 野原精一(2012)尾瀬の自然環境の概要. 低温科学, **70**, 9-20.
- Pease, B. S., C. K. Nielsen and E. J. Holzmüller (2016) Single-camera trap survey designs miss detections: Impacts on estimates of occupancy and community metrics. *PLoS ONE*, **11**(11), e0166689. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166689>.
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.
- 手計太一(2018)河川水文観測の発展. 水文・水資源学会誌, **31**(6), 568-570.
- 徳田御稔(1954)尾瀬ヶ原周辺の哺乳類. 尾瀬ヶ原-尾瀬ヶ原総合学術調査団研究報告(尾瀬ヶ原総合学術調査団編):681-683, 日本学術振興会, 東京.
- Welbourne, D.J., A. W. Claridge, D. J. Paull and A. Lambert (2016) How do passive infrared triggered camera traps operate and why does it matter? Breaking down common misconceptions. *Remote Sens. Ecol. Conserv.*, **2**, 77-83.
- 山口高志, 新里邦生(1994)電波流速計による洪水流量観測. 土木学会論文集. **497/II-28**, 41-50.

電子資料1表

電子資料2図

電子資料は本文pdfとともに北海道大学学術成果コレクション HUSCAP で閲覧可能.

(<https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/journals/index.php?jname=173>)