

音声解析を用いた高高度飛翔型希少コウモリ類の分布調査と信頼性

小柳恭二*・***・瀧井暁子**・泉山茂之**

*信州大学大学院総合理工学研究科

**信州大学山岳科学研究拠点

***現所属：東洋蝙蝠研究所 奈良市広岡町213-3

要 約

長野県に生息するコウモリ類19種のうち13種は県のレッドリストに記載されているが、その希少性を評価するための生息状況調査はほとんど行われていない。本報告では、長野県レッドリストで絶滅危惧I B類に指定されている高高度飛翔型コウモリ3種、ヤマコウモリ (*Nyctalus aviator*)、ヒナコウモリ (*Vespertilio sinensis*)、クビワコウモリ (*Eptesicus japonensis*) の分布を音声解析により明らかにした。本研究では、これら3種の既知のねぐらにおいて出洞時の探索音声(モデル音声)をTime Expansion型バットディテクターを用いて録音したものを基準音声として音声解析を行い、県内37ヶ所で採集した1,078コールについて種判別を試みた。さらに、クラスター分析、正準判別分析および機械学習により種判別の信頼性について検討した。その結果、クラスター分析を使った集団間の距離による判別評価でヤマコウモリ10ヶ所、ヒナコウモリ7ヶ所およびクビワコウモリ7ヶ所を新たに確認した。また、正準判別分析と機械学習による判別率はいずれの種も90%以上と高かった。以上から、これら3種について音声解析を用いて高精度に分布調査を行うことが可能であることが示された。

キーワード：音声解析, コウモリ類, 種判別, 長野県, 分布調査

はじめに

飛翔性小型哺乳類であるコウモリ類(Chiroptera)は、1,401種に分類され¹⁾、地球上の全哺乳類種数の21.3%を占めている²⁾。コウモリ類は有視界飛行するオオコウモリ類(Mega Chiroptera, 191種)と反響定位飛翔するコガタコウモリ類(Micro Chiroptera, 1,210種)に大きく分類される。反響定位とは、鼻腔や口腔から発する超音波を対象物にあて、その反響波によって対象物の位置を特定する飛翔方法である。コウモリ類は食性の幅が広く、オオコウモリ類は果実や花蜜、コガタコウモリ類は昆虫、節足動物、爬虫類、両生類、魚類、鳥類および哺乳類を採食する。また、コウモリ類は主に夜行性であり、昼間はねぐらで休息する。ねぐらの場所は、樹木の枝、樹洞、樹皮の下、枯葉、洞穴、岩の隙間および家屋などの人工構造物と多様である。

このようにコウモリ類の種数が多く、多様な生態を示す理由には元来、熱帯林を起源としていたコウモリ類が餌資源やねぐらのニッチ間競合で高緯度方

向へ適応拡散したためとされている³⁾。拡散の過程で、温帯や亜寒帯性気候への適応として冬眠や長距離の季節移動といった生活様式を獲得し、世界各地で種分化が進み種多様性を生み出す源となった⁴⁾。そのため、生物多様性保全や生態系機能維持の観点から、希少種とされるコウモリ類は多い⁵⁾。また、コウモリ類は生態系において様々な役割を担っている。例えば、オオコウモリ類は熱帯雨林の重要な種子散布者であり⁶⁾、花蜜食のオオコウモリ類は植物の送粉者としなくてはならない存在である⁷⁾。主に虫食性のコガタコウモリ類は、一晩で体重の半分以上もの食物を採食するため、昆虫発生量の抑制機能を担うことが知られている⁸⁾。

現在、国際自然保護連合(IUCN)ではコウモリ類の約72%(1,001種)を絶滅のおそれのある種に指定しているが⁹⁾、このうちの54%(538種)については十分な分布情報が把握されておらず生息実態に基づいた適切な希少性評価がされていない⁹⁾。コウモリ類は、口腔または鼻腔から超音波を発して障害物の位置を特定する反響定位を利用した飛翔や採食を行うため、人間の視覚と聴覚から存在を捉えることが困難なことが適切な評価がなされていない大きな理由の一つである^{10, 11)}。

受付日 2022年12月23日

受理日 2023年2月14日

日本の各都道府県におけるコウモリ類の希少性についても適切に評価されているとは言い難い。長野県では、市街地に生息するイエコウモリ (*Pipistrellus abramus*) や確認事例の少ない未評価2種も含む19種のコウモリ類が確認されているが¹²⁻¹⁴⁾、このうち13種(68%)は長野県レッドリストに指定されている。生息情報の多くは森林伐採時の偶発的な発見、死体拾得情報や少数の研究者による捕獲調査によるもので、分布情報が極めて少なく、特定の地域に偏っており、生息分布調査や個体数調査による広域的な生息実態は把握されていないために希少性評価が十分に議論されていない。なかでも、翼長幅狭型の翼形¹⁵⁾を有し、飛翔高度が地上から約30 m以上の高空におよぶ高高度飛翔型コウモリ類は、かすみ網やハープトラップによる捕獲が困難で一部地域でねぐらが確認されているのみで、分布情報が極めて少ない。長野県には高高度飛翔型コウモリ類が3種生息しており、ヤマコウモリ (*Nyctalus aviator*) とクビワコウモリ (*Eptesicus japonensis*) は環境省レッドリスト絶滅危惧Ⅱ類¹⁶⁾、ヒナコウモリ (*Vespertilio sinensis*) は長野県レッドリスト絶滅危惧ⅠB類に指定されている。

コウモリ類の希少性を正確に評価するためには、新たな調査方法を用いた積極的な分布情報の収集が必要である。1980年代以降、コウモリ類の空間利用はTime Expansion型バットディテクターに代表される音響機器により調査されてきた。近年は、受信感度と音声解像度の高い超音波録音によって詳細な音声解析(ソノグラム解析)が可能となり¹⁷⁾、海外ではこの手法を用いた種判別事例が多く報告されている¹⁸⁻²¹⁾。記録メディアの発達により、2010年頃からは大量の自動録音とデータ解析が可能となった²²⁾。これらの技術により、コウモリ類が飛翔時に発する超音波(以下、エコロケーションコール)の周波数帯域、音圧および音声構造タイプを種、地域、環境ごとに整理した音声ライブラリーを作成することが可能となる。音声解析による種判別研究が盛んなヨーロッパでは、2015年に音声ライブラリーによる音声解析手法のガイドラインが作成されている²³⁾。音声ライブラリー作成にあたっては、集団で利用するねぐら前で出洞直後に多くの個体のエコロケーションコールをモデル音声として記録することが有効である。日本においても2004年以降、エコロケーションコールの音声構造の特徴が報告され^{24, 25)}、船越(2010)²⁶⁾は、音声解析によるコウモリ類の種判別の可能性について言及している。

本研究は、長野県に生息する高高度飛翔型希少コウモリ3種(ヤマコウモリ、ヒナコウモリ、クビワコウモリ)の分布を音声解析により明らかにすることを目的とした。本研究では、既知の出産・哺育場所として集団で利用されているこれら3種のねぐらにおいてエコロケーションコールのモデル音声を記録し、県内全域において音声録音を行い、音声ライブラリーを作成した。さらに、これらの音声とモデル音声を統計的に比較して音声解析による種判別の信頼性について検討した。

調査地および方法

1. 調査地

(1) モデル音声の録音

モデル音声は、3種の既知のねぐらにおいて録音した。対象種が夕方出洞した直後に、ねぐら前の開放空間においてエコロケーションコールを録音した。これらのねぐらは、目視と捕獲調査により生息種が同定され、出産・哺育コロニーの形成が確認された^{27, 28)}。ヤマコウモリは佐久市中込の社寺林、ヒナコウモリは同市中佐都の北陸新幹線橋脚、クビワコウモリは松本市乗鞍のペンションでそれぞれ録音を行った(図1)。

(2) 比較音声の録音

モデル音声録音場所のねぐら前と類似した開放空間で比較音声を録音した。録音場所は、長野県の一級河川6水系の4地域(千曲川、天竜川、高瀬川・姫川、木曾川・奈良井川)37サイトとした(図1, 附表1)。調査サイトは、調査地内で偏りのないよう、各水系において環境省2次メッシュ図(10 km×10 km)1メッシュにつき1サイトに設定した。

以下に、各調査域の標高と2019年の年間平均気温と降水量²⁹⁾および土地利用と植生の概要を示した。分析整理の便宜上、各水系の上流から水系名の頭文字と番号を付し分析コードとした。

a. 千曲川水系

13サイトで音声録音を行った(標高308~1,387 m)。最も標高の高いサイトは、水系上流部の南佐久郡川上村の1,387 mである。年平均気温は7.9°C、年平均降水量は1,481 mmとなっている。植生はカラマツ(*Larix kaempferi*)植林、ハンノキ属(*Alnus* sp.), サワグルミ(*Pterocarya rhoifolia*)およびミズナラ(*Quercus crispula*)を主とする落葉広葉樹林である。河川に高水敷はなく、多くが自然護岸であった。

中流部にあたる佐久市は扇状盆地で水田、果樹

園，住宅地が広がる．年平均気温は11.6℃，年平均降水量は1,203 mm である．高水敷の植生はニセアカシア (*Robinia pseudoacacia*)，ハンノキ属，サワグルミ，コナラ (*Q. serrata*) を主とする落葉広葉樹林であり，オギ (*Miscanthus sacchariflorus*)，ススキ (*M. sinensis*) を主とする高茎草地にオオアレチウリ (*Sicyos angulatus*) 等のマント群落が耕作地の中にモザイク状に分布する．

下流部にあたる長野市は内陸盆地で住宅地，果樹園が広がる．年平均気温は12.9℃，年平均降水量は965 mm である．高水敷の植生はニセアカシア，サワグルミ，コナラを主とする落葉広葉樹林とオギ，ススキ等の高茎草地やオオアレチウリ等のマント群落が果樹園やグラウンド等の中にモザイク状に分

布する．

b. 天竜川水系

天竜川水系では10サイトで音声録音を行った（標高374～882 m）．上流部にあたる上伊那郡南箕輪村は，河岸段丘に住宅地，果樹園，畑，水田が広がる．年平均気温は12.8℃，年平均降水量は1,398 mm である．高水敷の植生はニセアカシア，サワグルミ，コナラを主とする落葉広葉樹林とオギ，ススキ等の高茎草地にオオアレチウリ等のマント群落が果樹園やグラウンド等の中にモザイク状に分布する．

c. 高瀬・姫川水系

高瀬・姫川水系では6サイトで音声録音を行った（標高401～835 m）．姫川水系の上流部にあたる北

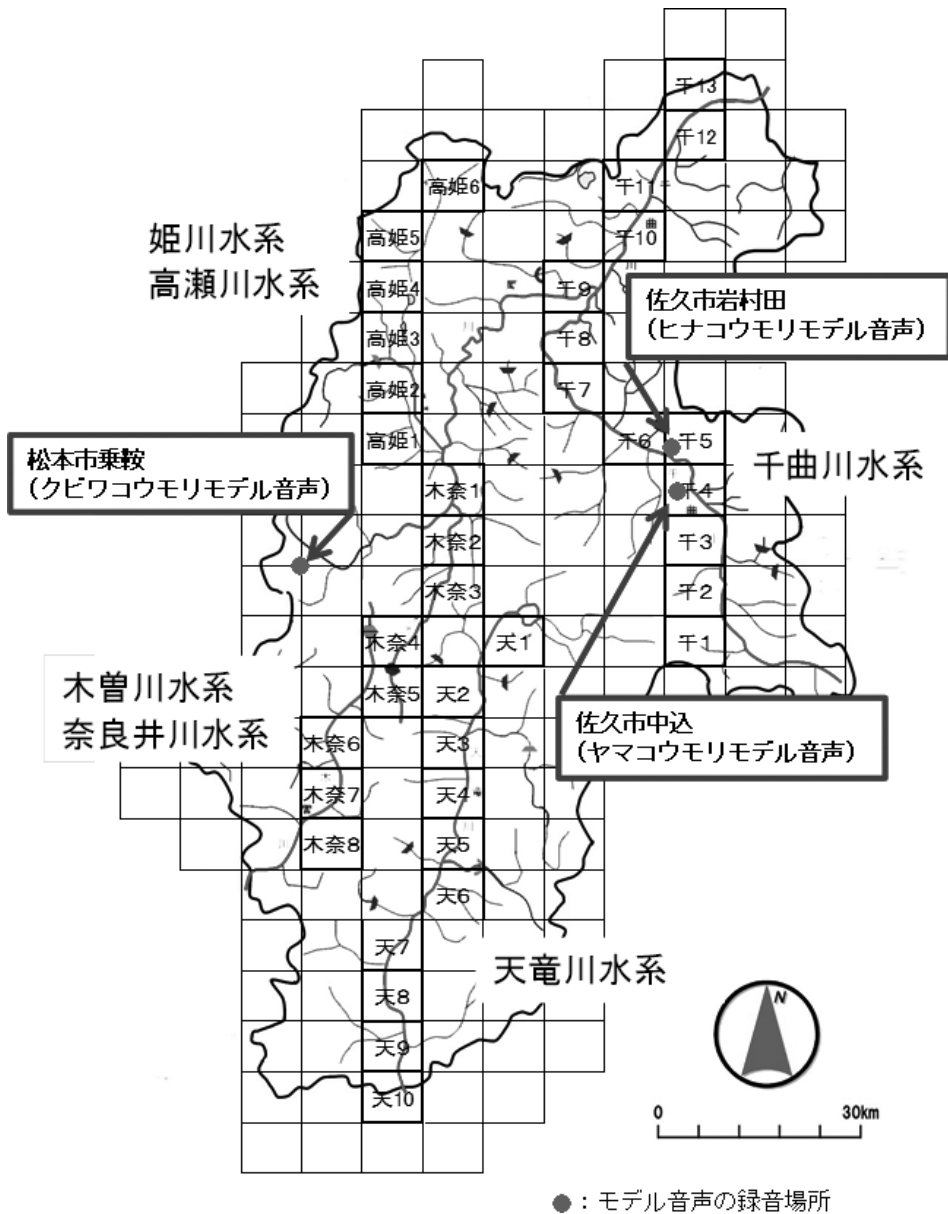


図1. コウモリ類の音声の録音場所（環境省2次メッシュ，方形区内は分析コード名）

附表1. 比較音声録音場所の地籍, GPS 位置データ.

水系	分析コード	地籍	日時	環境省2次メッシュコード	緯度	経度
千曲川	千	1 南牧村野辺山原板橋川	2020/7/2-3	5338-73	36°00'28.72"	138°29'39.07"
	千	2 南牧村海口杣添川	2020/7/2-3	5438-03	35°58'28.43"	138°27'43.06"
	千	3 小海町宮下	2020/6/21-22	5438-18	36°06'40.48"	138°28'40.13"
	千	4 佐久市桜井	2020/6/23-24	5438-23	36°14'38.01"	138°27'12.24"
	千	5 佐久市中佐都	2020/6/16-17	5438-33	36°16'21.53"	138°26'58.07"
	千	6 東御市布下	2020/6/17-18	5438-42	36°20'07.63"	138°23'00.60"
	千	7 坂城町小網鼠橋	2020/7/4-5	5338-51	36°25'38.77"	138°11'04.38"
	千	8 更埴市辻平和橋	2020/7/4-5	5438-60	36°28'32.10"	138°08'53.44"
	千	9 長野市真鳥町	2020/7/9-10	5438-71	36°35'52.65"	138°11'55.43"
	千	10 長野市大町	2020/7/9-10	5538-02	36°40'29.86"	138°16'31.30"
	千	11 飯山市縣	2020/7/10-11	5538-12	36°49'59.83"	138°21'26.39"
	千	12 飯山市常盤	2020/7/10-11	5538-23	36°53'47.29"	138°23'58.77"
	千	13 野沢温泉村虫生	2020/7/10-11	5538-33	36°57'48.42"	138°26'38.62"
天竜川	天	1 辰野町上平出ほたるの里	2020/7/22-29	5438-00	35°59'35.73"	138°00'08.79"
	天	2 箕輪町北小河内	2020/7/17-22	5337-77	35°27'20.55"	137°49'06.64"
	天	3 南箕輪村信州大学農学部演習林	2020/7/22-29	5337-67	35°51'56.90"	137°55'57.81"
	天	4 宮田村新田	2020/8/25-26	5337_57	35°44'44.93"	137°53'34.97"
	天	5 駒ヶ根市大田切川こまくさ橋	2020/8/25-26	5337_47	35°44'39.13"	137°53'30.79"
	天	6 松川町片桐松川	2020/8/28-29	5337_37	35°65'57.97"	137°52'56.98"
	天	7 高森町竜の口	2020/8/30-31	5337-27	35°35'46.22"	137°55'45.65"
	天	8 飯田市天竜峡	2020/7/22-29	5337-16	35°27'20.82"	137°49'06.85"
	天	9 阿南町栗野	2020/7/14-15	5337-06	35°20'39.61"	137°47'38.81"
	天	10 阿南町新野	2020/7/14-15	5237-76	35°16'21.57"	137°45'31.92"
高瀬・姫川	高・姫	1 松川村細野高瀬川	2020/8/12-13	5437-46	36°24'01.76"	137°52'07.53"
	高・姫	2 松川村川西乳川	2020/8/12-13	5437-56	36°25'42.65"	137°50'19.98"
	高・姫	3 大町市高瀬入大町ダムサイト	2020/8/12-13	5437-66	36°30'55.51"	137°47'00.03"
	高・姫	4 白馬村五竜大川	2020/8/16-17	5437-36	36°39'40.75"	137°50'08.88"
	高・姫	5 白馬村みそら野平川	2020/8/16-17	5537-06	36°41'11.35"	137°49'28.23"
	高・姫	6 小谷村北小谷姫川	2020/8/16-17	5537-17	36°50'45.96"	137°53'59.28"
木曽川・奈良井川	木・奈	1 松本市島内平瀬川西	2020/6/27-28	5437-37	36°16'04.75"	137°56'17.36"
	木・奈	2 松本市上新梓川倭橋	2020/8/10-11	5437-27	36°13'36.89"	137°54'11.46"
	木・奈	3 松本市北耕地	2020/8/10-11	5437-17	36°10'08.57"	137°54'31.34"
	木・奈	4 塩尻市牧野	2020/6/29-30	5437-07	36°04'54.61"	137°54'57.88"
	木・奈	5 木祖町藪原	2020/7/29-30	5337-76	35°55'40.65"	137°46'54.09"
	木・奈	6 木祖町宮ノ越	2020/7/29-30	5337-66	35°54'12.17"	137°46'25.03"
	木・奈	7 木祖町川相木曾ダム	2020/7/30-31	5337-55	35°49'18.81"	137°40'18.80"
	木・奈	8 上松町宮戸 B&G センター	2020/7/30-31	5337-45	35°44'59.22"	137°42'43.66"

安曇郡白馬村は、スキー場とその周辺集落に畑、水田がパッチ状に点在する。年平均気温は9.6℃、年平均降水量は1,889 mm である。高水敷の植生はニセアカシア、ハンノキ属、サワグルミを主とする落葉広葉樹林にススキ草地在る。高水敷の表土は薄く礫河川であるため、採石に利用されている。

d. 木曽川水系・奈良井川水系

木曽川水系・奈良井川水系では8サイトで音声録音を行った(標高577~935 m)。木曽川水系の上流部にあたる木曾郡木祖村藪原は、山岳狭窄地の中になる盆地である。国道19号沿いに集落や畑が点在する。年平均気温は9.9℃、年平均降水量は653 mm である。自然護岸でカラマツ二次林とミズナラ、ハンノキ属を主とする落葉広葉樹林が生育する。

2. 音声録音

コウモリ類の音声録音には Time Expansion 型 バットディテクター (Song Meter SM4BAT FS, Wild Life Acoustic 社, 米国) と超音波録音用マイク (SMM. A2 Acoustic Microphone, Wild Life Acoustic 社, 米国) を使用した。マイクの指向性は素子後方165°~195°方位角を除く前方側330°の範囲である³⁰⁾。三脚にポールを結び付け、マイク素子を地上高約7.2 m の天頂方向に設置した。強風でポールが倒れる危険のある場合は、ポールは用いず約1.2 m の高さで録音した。

調査対象の3種の音声構造タイプは、FM/QCF 型 (周波数変調型)³¹⁾ である³¹⁾。この音声構造タイプのコウモリ類は、飛翔空間の広さや障害物の多さ

などの飛翔環境の変化に応じてパルス波形を変える^{32, 33)}。そのため、モデル音声と比較音声の録音条件を可能な限り一致させる必要がある。そこで、比較音声の録音場所はモデル音声録音場所と同一条件である、ねぐらから直線距離で約100 m以上の視界が遮られない開放空間に設定した。各サイトにおいて日没から日の出までの1～4晩録音を行った。2晩以上音声録音した場合は、最も録音数の多かった日のデータを解析に用いた。録音設定は、サンプリングレート256 kHz、最小トリガー周波数10 kHz、トリガーレベル6 dBとした。

3. 音声解析

モデル音声および比較音声は、音声解析ソフト Kaleidoscope Version 5.0.2 (Wild Life Acoustic 社, 米国) を用いた。直翅類等の鳴声や人工音等のノイズファイルを除去し、さらに Barataud (2015)²³⁾ を参考にパルスの最大振幅周波数の平均値が30kHz以上のファイルを解析対象から除いた。コウモリ類のパルスに酷似した人工音や調査対象種以外の複数種のパルスが混在している可能性があるため、各ファイルに記録されたパルスを視覚化し、波形から最大振幅周波数30kHz未満の探索音のシーケンス(1つの連続したパルス群)を目視で確認した。比較音声は、モデル音声3種の各種のねぐら前で録音されたパルスの最大振幅周波数の最小値から最大値までの範囲が録音されたファイルのみに選別し、それらのファイルが多数ある場合は、ランダムサンプリング法で30ファイルに選別した。各ファイルにおいて明瞭なパルスを1つ選別し、最大振幅周波数 (Peak Frequency)、終部周波数 (End Frequency)、パルス長 (Call Duration) を計測した。さらに、種ごとに各計測項目の平均値および標準偏差 (SD) を算出した。

4. 種判別

3種のモデル音声と比較音声の最大振幅周波数、終部周波数およびパルス長を用いて、クラスター分析、正準判別分析 (Canonical Discriminant Analysis)、機械学習の3手法により種判別を行い、判別方法の妥当性について検討した。種判別はクラスター分析による集団音声を平均化した各特徴量の違いを基本としたが、補足的にモデル音声と個別の比較音声の特徴量の違いについて判別する後者の2手法も用いた。

クラスター分析は凝集型階層的クラスタリング手法のウォード法を採用し、距離計算には間隔尺度であるユークリッドの距離を用いた。分析結果から樹

形図を作成し、モデル音声と比較音声との集団間の距離を測定した。そして、閾値より近似と判別されたサイトの集団をモデル音声種と同種とみなした。正準判別分析では、判別率および標準化判別係数を算出した。機械学習は統計ソフト EZR (version4.0.2) を用い、種判別機の構築には R (Version2.7.0) にパッケージされているアルゴリズムの Random Forest Classifier を用いた。学習データ数の不足や訓練データの不典型性が生じると、学習データは訓練データの特定のランダムな特徴にまで適合してしまう過学習の状態となる。これを避けるため、学習データの対象を長野県全体とし、交差検証法には Cross-Validation 法を用いた。本研究では全データの30%を訓練データ、70%を学習データとして検証した。

結 果

1. 音声録音

(1) モデル音声

種別のモデル音声の録音ファイル数および出洞個体数を表1に示した。

ヤマコウモリは佐久市中込のケヤキ社寺林樹洞において2019年5月3日18時40～44分に14頭が出洞した。目視により、出洞後ヤマコウモリが旋回しながら地上から約50 m以上の高さまで飛翔したことを確認し、この際の探索音声を27ファイル録音した。ヒナコウモリは佐久市中佐都の北陸新幹線の橋脚隙間において2回音声を録音した。録音した音声数ファイル数は、2019年6月27日19時10～22分にかけて120頭以上が出洞した際に44ファイル、同年8月

表1. 高高度飛翔型コウモリ3種のモデル音声の音声録音ファイル数と出洞数。

種	録音数	出洞数	ねぐらの場所	調査日
<i>Nyctalus aviator</i>	27	14	佐久市中込	2019/5/3
<i>Vespertilio sinensis</i>	44	120<	佐久市岩村田	2019/6/27
	89	400<	佐久市岩村田	2019/8/10
<i>Eptesicus japonensis</i>	50	120	松本市乗鞍	2019/7/6

表2. 高高度飛翔型コウモリ3種のねぐら前のモデル音声の最大振幅周波数、終部周波数、パルス長の平均値と標準偏差。

種	最大振幅周波数 (kHz)	終部周波数 (kHz)	パルス長 (ms)
<i>Nyctalus aviator</i>	17.2±0.75 (15.9-18.7)	16.9±0.74 (15.6-18.4)	10.5±1.88 (8.4-14.2)
<i>Vespertilio sinensis</i>	22.6±1.57 (19.1-24.7)	22.2±1.45 (18.7-24.0)	5.8±1.63 (3.6-8.9)
<i>Eptesicus japonensis</i>	28.0±0.65 (26.2-29.5)	27.6±0.56 (26.0-29.1)	7.5±1.33 (4.4-10.7)

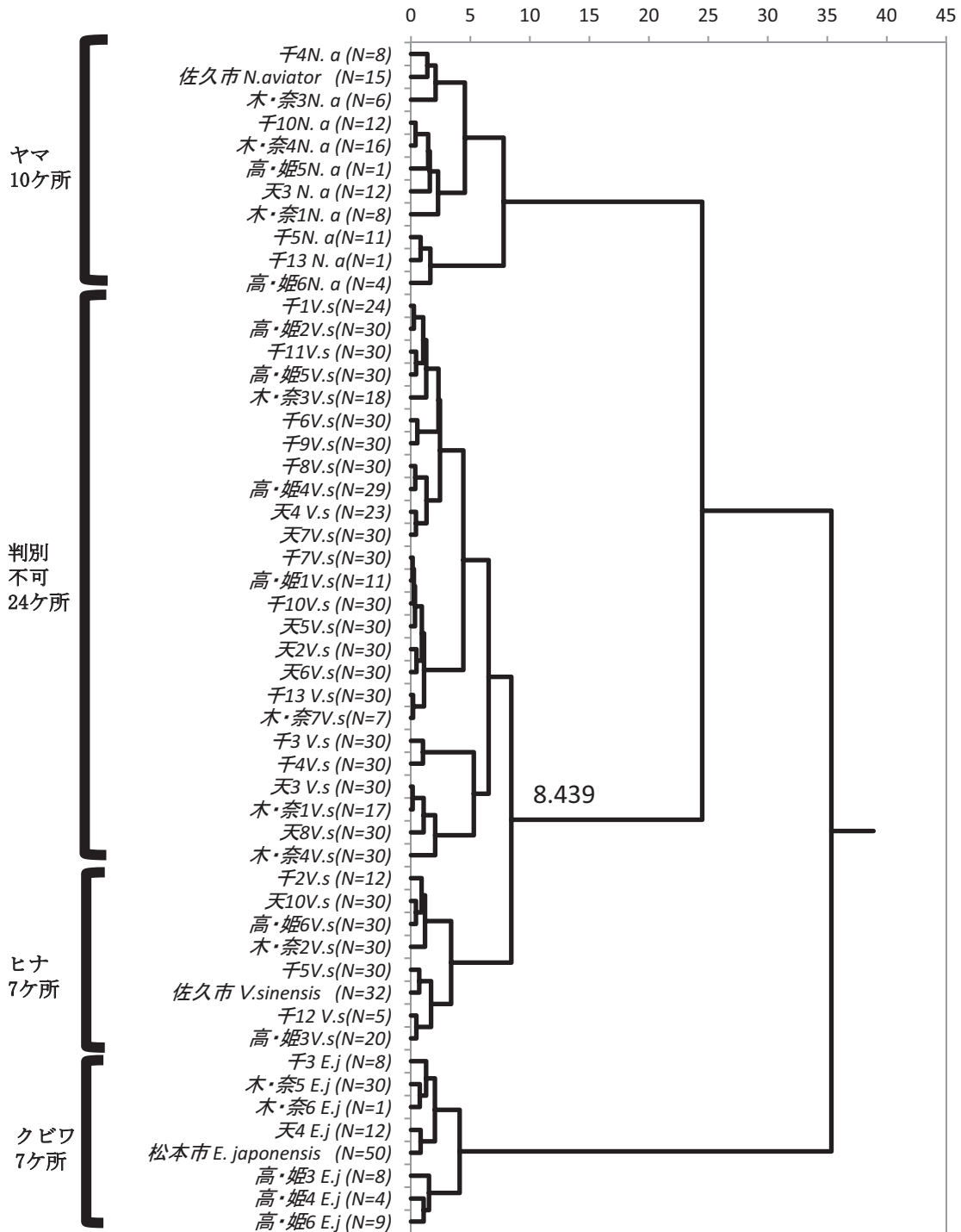


図2. クラスタ分析を用いた長野県におけるヤマコウモリ, ヒナコウモリおよびクビワコウモリの集団間距離. (市町村名, 学名入りがモデル音声を示す.)

10日18時59分～19時28分にかけて約400頭が出洞した際に89ファイルだった。クビワコウモリは、2019年7月6日19時1～18分にかけて松本市乗鞍のペンション数ヶ所の屋根裏上部の隙間から約120頭が出洞した際に50ファイルの音声を録音した。

これらの音声ファイルから分析可能なエコロケー

ションコールを選別した。選別したエコロケーションコール数はヤマコウモリ15コール, ヒナコウモリ32コール, クビワコウモリ50コールだった。

(2) 比較音声

調査対象の全37サイトで6,448ファイルを録音した。水系別では、千曲川の13サイトで計4,803 (平

均377) ファイル, 天竜川10サイトで計1,168 (平均117) ファイル, 木曾川・奈良井川のサイトで計261 (平均27) ファイル, 高瀬川・姫川の6サイトで216 (平均44) ファイルであった。ヤマコウモリやヒナコウモリの既知のねぐらの確認メッシュに近い千曲川水系の2サイト(千5 [佐久市], 千11 [飯山市]) では録音数が多かった。一方, 千3 [小海町] や天2 [辰野町] のように既存のねぐらから約20 km 離れていても500ファイル以上が録音されている例があった。これらの音声ファイルから, 録音場所ごとに分析可能なエコロケーションコールを計1,078コール選別した。

表3. 正準判別分析による相関行列。

種		PF	EF	D
<i>Nyctalus aviator</i>	PF	1	0.994	-0.188
	EF	0.994	1	-0.183
	D	-0.188	-0.183	1
<i>Vespertilio sinensis</i>	PF	1	0.982	-0.146
	EF	0.982	1	-0.151
	D	-0.146	-0.151	1
<i>Eptesicus japonensis</i>	PF	1	0.934	-0.177
	EF	0.934	1	-0.15
	D	-0.177	-0.15	1

表4. 正準判別分析による標準化判別係数。

変数	CD1	CD2
最大振幅周波数	-0.1484	-0.7883
終部周波数	1.1563	0.8166
パルス長	0.1093	0.9942

表5. 正準判別分析から得られた固有値と寄与率および相関比。

判別関数	固有値	寄与率	累積寄与率	相関比 η^2
CD1	3.1125	99.56%	99.56%	0.7568
CD2	0.0139	0.44%	100%	0.0137

表6. 正準判別分析から得られた種別の判別率。

対象種	<i>Nyctalus aviator</i>	<i>Vespertilio sinensis</i>	<i>Eptesicus japonensis</i>	正答数 (N)	判別率 (%)
<i>Nyctalus aviator</i>	97	6	0	97	94.2
<i>Vespertilio sinensis</i>	71	773	6	773	90.9
<i>Eptesicus japonensis</i>	0	0	125	125	100
	168	779	131	995	92.3

表7. Random Forest Classifier を用いた機械学習による判別率 (%)。

種	千曲川水系	天竜川水系	木曾川水系・奈良井川水系	高瀬川・姫川水系	全体
<i>Nyctalus aviator</i>	100	100	88.7	100	93.2
<i>Vespertilio sinensis</i>	100	100	100	100	100
<i>Eptesicus japonensis</i>	100	100	100	100	100

2. モデル音声の種間比較

既知のねぐら前で録音された調査対象の3種の最大振幅周波数, 終部周波数およびパルス長を表2に示した。最大振幅周波数と終部周波数は, ヤマコウモリが最も低く, クビワコウモリが最も高く, ヒナコウモリはこれら2種の中間の値を示した。ヒナコウモリの最大振幅周波数と終部周波数はいずれもSDは1.0以上となり, 他の2種よりもばらつきが大きかった。平均パルス長は, ヤマコウモリ10.0 ms, クビワコウモリ7.5 ms, ヒナコウモリ5.8 msの順に長く, 種ごとのSDはいずれも1.0以上でばらつきが大きく, 異種間のパルス長は重複していた。

3. 解析方法による種判別の違い

クラスター分析により, 48ヶ所中24ヶ所で種判別ができた(判別率50%)。モデル音声と同種とみなされた地点数は, ヤマコウモリ10ヶ所, ヒナコウモリ7ヶ所およびクビワコウモリ7ヶ所だった(図2, 距離閾値8.278)。一方, 種判別できなかった24ヶ所はいずれもFM/QCF型音声構造で最大振幅周波数30 kHz未満であったが, 3種の距離閾値よりわずかに遠かったため(距離閾値8.439), いずれの種にも該当しなかった。

正準判別分析による結果を表3~6に示した。標準化判別係数をみると, 終部周波数およびパルス長で関数1, 2ともに正方向に影響していた(表4)。判別率はヤマコウモリ94.2% (correct $N = 97$), ヒナコウモリ90.9% (correct $N = 773$), クビワコウモリ100% (correct $N = 125$), 3種全体で92.3% (correct $N = 995$)であった(表6)。正準判別分析の個別得点図を図3に示した。標準化判別係数の結果が反映され, X軸において終部周波数および最大振幅周波数に判別の重みをおいた得点図となり, その結果, 視覚的にクビワコウモリと他2

種との違いが明確となった。

機械学習による判別率を表7に示した。千曲川、天竜川、高瀬川・姫川の3水系で3種共に判別率は100%であった。木曽川水系・奈良井川水系の判別

率はヤマコウモリ88.7%，ヒナコウモリとクビワコウモリがいずれも100%だった。長野県全体を対象とした判別率はヤマコウモリ93.2%，ヒナコウモリとクビワコウモリがいずれも100%だった。3種全体の判別率は99.4%だった。

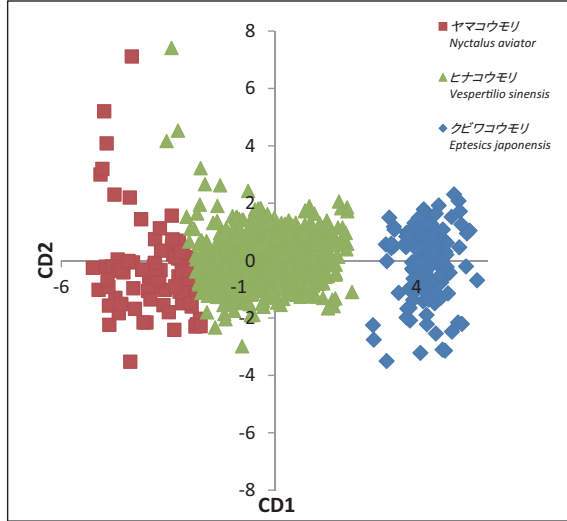


図3. 正準判別分析を用いたヤマコウモリ，ヒナコウモリおよびクビワコウモリの個別得点分布図。

考 察

1. 音声解析による高高度飛翔型希少コウモリの種判別

本研究では、最大振幅周波数と終部周波数を用いた音声解析によりクビワコウモリと他の2種が明確に区別され、ヤマコウモリとヒナコウモリも高確率で種判別が可能であることが示された。

一部の例外を除き、同一音声構造タイプの小型コウモリ類において最大振幅周波数と個体の体サイズ（体重）には負の相関があり、体サイズが大きいほど最大振幅周波数は低い³⁴⁾。本研究において指標とした3種の体重はヤマコウモリ26～61g，ヒナコウモリ14～30g，クビワコウモリ8～13gであった³¹⁾。最大振幅周波数は3種のうち体サイズの最も

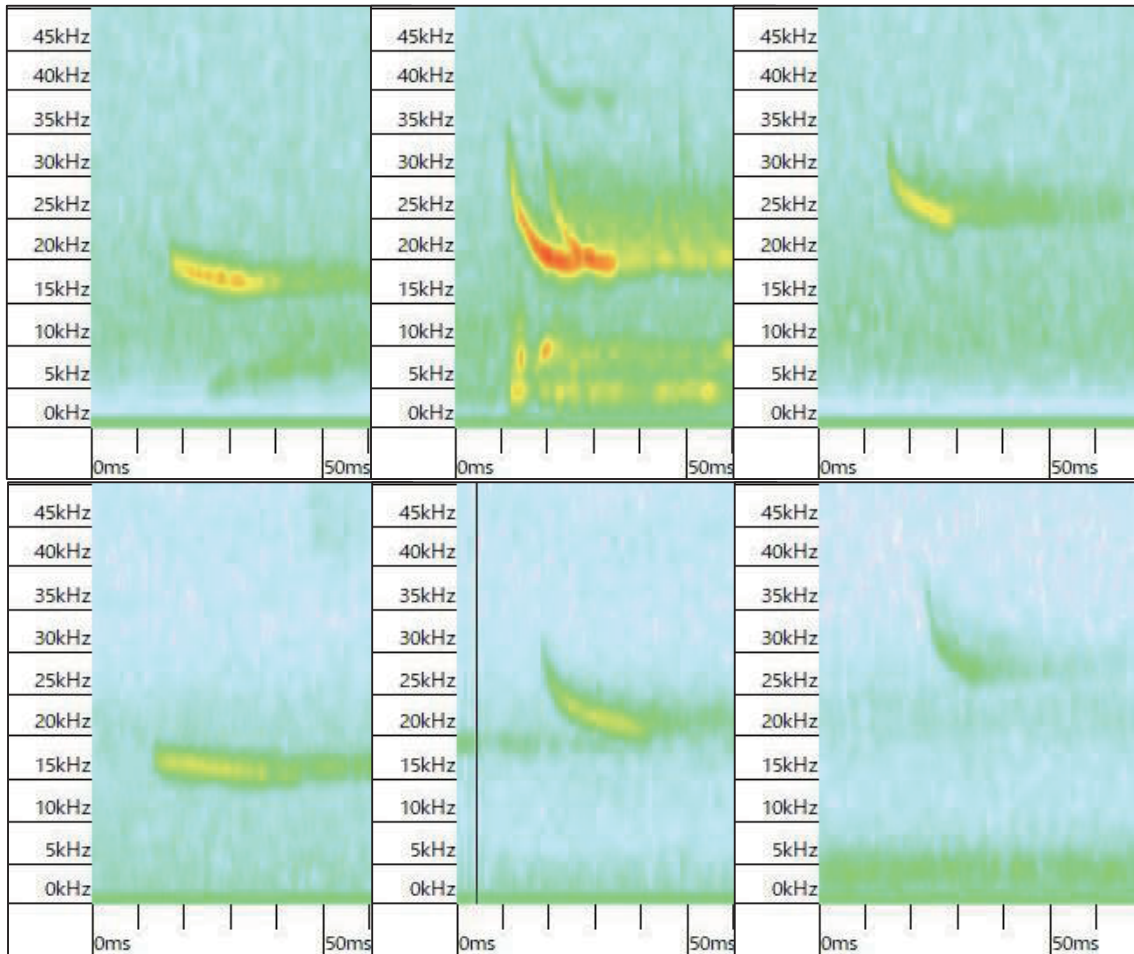


図4. 高高度飛翔型希少コウモリ類3種のエコロケーションパルス。
(上段がモデル音声，下段が比較音声，左からヤマコウモリ，ヒナコウモリ，クビワコウモリ)

表 8. 音声解析を用いたコウモリの種判別に関する先行研究と結果概要.

著者	モデル	判別率 (%)	対象種数と音声構造	地域
Jones et al. (2000)	DFA	89	6種	イギリス
Parsons and Jones (2000)	ANN	87	CF 型 2 種を除く 12 種	イギリス
	DFA	79		
Russo and Jones (2002)	DFA	82	22 種 (ヒナコウモリ科 18 種、キクガシラコウモリ科 3 種、オヒキ 1 種)	イタリア
		94		
Biscardi et al. (2004)	MLR	96.7	8 種	ベリーズ、ブラジル、メキシコ
	DFA	93.3		
Fukui et al. (2004)	DFA	92	FM 型、FM/QCF 型の 7 種	北海道
Obrist et al. (2004)	DFA	75	26 種	スイス
Brizke et al. (2004)	DFA	96.5	Myotis 4 種	東アメリカ
Preatoni et al. (2005)	DFA	77	20 種 (ヒナコウモリ科 17 種、キクガシラコウモリ科 3 種)	イタリア
	CA	45		
	CART	41		
	ANN	64		
Skowronski and Harris (2006)	GMM	99.4	5 種	アメリカ
	HMM	99.4		
Corcoran (2007)	DFA	68.3	9 種	東アメリカ
Papadatou (2008)	DFA	82.4	23 種	ギリシア
Kofoky et al. (2009)	DFA	82.2	CF 型、FM 型、FM/QCF 型の 15 種	マダガスカル
Redgwell et al. (2009)	ANN	98	CF 型、FM 型、FM/QCF 型の 14 種	イギリス
	DFA	73		
	SVM	87		
Armitage and Ober (2010)	RF	96	18 種	南西アメリカとフロリダ
	SVM	92		
	ANM	91		
	PCA-ANN	88		
	DFA	77		
船越ほか (2010)	CDA	94.3	FM 型、FM/QCF 型の 11 種の精査音	九州
		100	FM 型、FM/QCF 型の 6 種の探索音	
Brizke et al. (2011)	ANN	94	12 種の探索音	東アメリカ 14 州
	MDA	93		
Hughes et al. (2011)	DFA	85.9	Broadband FM call type 精査音	タイ
		70.4	Narrowband FM call type 精査音	
		85.9	Multiharmonic calls 精査音	
Walters et al. (2012)	eANN	83.7	34 種	ヨーロッパ
Agranat (2013)	HMM	88.8	17 種 (Myotis 10 種含)	北アメリカ
Rodriguez-San Pedro and Simonetti (2013)	DFA	87.4	4 種	チリ中央
Henriquez et al. (2014)	GMM	97.3	6 種	コスタリカ
Wordley et al. (2014)	DFA	100	CF 型	インド
		90	FM 型	
Zamora-Gutierrez et al. (2016)	RF	66	59 種	メキシコ
		72	科別階層	
		71.2	属別階層	
		69.1	ギルド別階層	
増田ほか (2017)	RF+SVM	96.3	11 種 (属レベルで RF、種レベルで SVM)	群馬
		94		
山本 (2019)	RF	82.9	18 種	岐阜・長野・石川・北海道
	SVM	80.5		

DFA: Discriminant Function Analysis
ANN: Artificial Neural Networks
eANN: ensembles of Artificial Neural Networks
MLR: Multinomial Logistic Regression
GMM: Gaussian Mixture Model
HMM: Hidden Markov Model

CA: Cluster Analysis
CART: Classification And Regression Trees
SVM: Support Vector Machines
RF: Random Forest
PCA: Principal Component Analysis
MDA: Mixture Discriminant Analysis incorporating an adaptive model
CDA: Canonical Discriminant Analysis

大きいヤマコウモリが最も低く、体サイズの最も小さいクビワコウモリが最も高く、本研究の結果は一般的な小型コウモリ類の知見に一致していた。

終部周波数については、クビワコウモリが他2種と異なり、約25 kHz 未満の終部周波数は確認されなかった。これは、クビワコウモリが他2種より体サイズが小さいためと考えられ、他2種と明確に異なっていた(表2, 図3, 4)。

一方、ヤマコウモリとヒナコウモリの2種については、クビワコウモリのように明確な周波数帯の違いは確認されなかった。ヤマコウモリの最大振幅周波数の最小値(18.7 kHz)とヒナコウモリの終部周波数の最大値(18.7 kHz)は重複していた。また、ヒナコウモリの最大振幅周波数と終部周波数はレンジ幅が広く、ばらつきが大きかった(最大振幅周波数: $SD = 1.57$, 終部周波数: $SD = 1.45$)。これは、ヤマコウモリのモデル音声は15例と少なかったことにもよると考えられる。

クラスター分析ではFM/QCF型パルス最大振幅周波数30 kHz 未満の音声で、いずれの種にも該当しない録音サイトが24ヶ所あった。ヤマコウモリの方がヒナコウモリよりも体サイズが大きく、パルス形状の傾きが小さい。同一録音条件下ではヒナコウモリはクビワコウモリより時間軸の長いQCF成分が多い傾向があり、最大振幅周波数と終部周波数の一部がヒナコウモリと重複する可能性が示唆された。このようなヤマコウモリとヒナコウモリの最大振幅周波数と終部周波数の部分的な相似性により、2種の種判別ができなかったと考えられる。

正準判別分析を用いた判別率はヤマコウモリ94.2%, ヒナコウモリ90.9%, クビワコウモリ100%だった。クビワコウモリは終部周波数25 kHz 未満が録音されなかったため、CD1 (X軸) 2.0~3.0にブランクが生じ、他2種と明確に異なったために判別率が高かったと考えられる。一方、ヒナコウモリは最大振幅周波数と終部周波数のレンジが広く、パルス長が他2種より短い傾向だったため、得点分布が不均衡となり、ヤマコウモリとの間でわずかな誤判別が生じたと考えられる。

機械学習による判別率は、ヤマコウモリが93.2%, ヒナコウモリとクビワコウモリがいずれも100%だった。3種全体の判別率は99.4%であった。ヤマコウモリの判別率が他2種と比べやや低かったのは、木曾川水系・奈良井川水系での判別率の低さ(88.7%)が影響していたと考えられる。また、正準判別分析に比べて機械学習によるヤマコウモリの

判別率が低かった理由としては、15例とサンプル数が少ないために汎化能力の低下や学習不足が生じていたためと考えられる。

2. 音声解析を用いた生息分布調査の課題

音声解析を用いたコウモリの種判別に関する先行研究と結果概要を表8にまとめた。解析対象種数、地域、音声構造タイプおよび判別機のアルゴリズムが異なるため一概に比較できないものの、クラスター分析を用いた先行研究では判別率は本研究と同様に45%と低かった³⁵⁾。クラスター分析は、データを要約して集団化するために種別の特徴が歪められてしまう可能性がある。一方、正準判別分析やDiscriminant Function Analysisを用いた先行研究では、判別率が73~100%と高かった³⁶⁻³⁹⁾。正準判別分析は、すべてのパラメータにおける特徴量から個別に相対的な重みづけを係数化して判別要因とするため、種特有の音声特徴が明らかな場合は判別要因としての重みづけが大きくなる傾向にあり、判別感度は高い。ただし、解析に使用するパラメータの選択が生態的な知見(例えば、本研究ではコウモリ類の体サイズと最大振幅周波数および終部振幅数が負の相関関係)に基づいて適切であるかを留意しないと、高い判別率は得られないと推測される。

機械学習を用いた先行研究の判別率は、66~96%であり、信頼性は正準判別分析と同等といえる⁴⁰⁻⁴³⁾。Zamora-Gutierrez et al. (2016)⁴³⁾は、日本やヨーロッパなどの温帯地域と比べ、コウモリの種多様性の高いメキシコにおいて59種のコウモリを対象として種判別を行った。この研究では、ギルド構造を持つ種群や他種との音声干渉を避け、多重音声構造を成し、音声変異の大きい種も対象としたため、判別率が低かったが、科、属、ギルド別に分けて機械学習させた結果、それぞれの判別率が72.0%, 71.2%, 69.1%に向上した。このように、機械学習の対象を階層別に分類することで判別率が向上し、信頼性を高めることが可能になると考えられる。

3. 長野県内での実用性

本研究の調査対象種は、音声変異の大きいFM型種ではなく最大振幅周波数30 kHz 未満のFM/QCF型種のみだった。日本に生息する小型コウモリ類でこの音声構造と周波数帯に該当する種は、ヒメヒナコウモリ(*Vespertilio murinus*)、キタクビワコウモリ(*Eptesicus nilssonii*)、ヤマコウモリ、コヤマコウモリ(*Nyctalus furvus*)、ヒナコウモリ、クビワコウモリおよびオヒキコウモリ(*Tadarida*

insignis) の7種である^{26, 44-47}。このうち、ヒメヒナコウモリとキタクビワコウモリは北海道にのみねぐらが存在する。ヒメヒナコウモリやコヤマコウモリは、本州の日本海側や東北、北関東で僅かな記録があるが^{45, 46}、詳細な音声情報は不明である。オヒキコウモリは本研究の3種と比べて最大振幅周波数が14.2~15.4 kHzと相対的に低く、パルス長が13.6~17.1 msと特徴的に長い²⁶。さらに、開放空間ではFM成分よりもQCF成分を主に占めるため、他種と判別が可能である²⁶。

本研究の3種は、いずれも6月中旬から8月下旬が出産・哺育期である。一般に、コウモリ類の出産・哺育期間は、母獣による哺育投資に時間と労力を費やすため、行動圏も狭く帰巢性が高い⁴⁸。北海道帯広市では、出産・哺育期にヤマコウモリ成獣メス8頭に発信器を装着して追跡した結果、行動範囲の距離はねぐらから最大4.58 km (2.48±1.09 km) だった⁴⁹。本研究では、ヤマコウモリとヒナコウモリの両種が哺育に利用していた佐久市のねぐらにおいて、7月上旬にメスが出洞後30分未満で帰洞する行動を観察した(小柳 未発表)。したがって、クビワコウモリを含むいずれの種も、出産・哺育期に地域個体群間をまたぐような長距離移動をするとは考えにくく、この時期はコウモリ類の分布を把握するのに適した季節と考えられる。本研究においても、調査サイトの近くに大規模なねぐらの存在が示唆されており、本研究から明らかとなった新たな分布場所近隣に、新たなねぐらが存在する可能性が高いだろう。

以上から、現状では、長野県において音声解析により高い信頼性で種判別が可能なのは、最大振幅周波数値30kHz未満のFM/QCF型種の本研究対象とした3種といえた。

全国的に希少で周波数帯情報の不明種も考慮し、分析対象とする音声構造型を限定してその特徴や分布の相違、移動性を検討することで種判別が可能となる。今後は、ヤマコウモリとヒナコウモリのモデル音声の蓄積とともに、他のパラメータやアルゴリズムを使った種判別機の開発を進めることで、種判別精度が向上する可能性がある。さらに、近似する周波数帯において、音声情報の不明種(例えば、ヒメヒナコウモリ)の飛翔空間別の音声特徴を音声ライブラリーに加えることができれば、種判別可能な対象種も増えるだろう。

今後、地域ごとに一定の録音条件下での音声ライブラリーとともにモデル音声数を増やすことで、分

布情報の不足している地域でも生息の可能性を探索することが可能となることも考えられる。本研究では、初めて音声解析により中央アルプスにおけるクビワコウモリの分布を確認した。このように、音声解析による種判別は希少種保護のために不可欠な分布情報の把握にあたり、極めて有効な手法であるといえる。北米では捕獲に拠らず、音声解析のみにより、新たな生息分布が記録されている⁵⁰。一方、環境省や県レベルのレッドデータブックにおける種選定は、いまだにIUCNの基準である個体数を基準にしている。コウモリ類の希少性評価にあたっては、今後音声データを定量的把握し、個体数推定等に応用するための議論と新たな提案が求められる。

謝 辞

本研究を行うにあたり信州大学農学部の大窪久美子教授、渡邊修准教授、岸元良輔研究員、鹿児島国際大学の船越公威名誉教授および奈良教育大学の前田喜四雄名誉教授には、有益なご助言を頂いた。京都大学生態圏情報学研究室のJason Hideki Preble博士には英文要約の御指導を頂いた。信州大学山岳科学研究拠点森智基研究員(現：名城大学研究員)には施設使用について御協力頂いた。コウモリの会の大沢夕志氏、東洋蝙蝠研究所の奥村一枝氏、橋本肇氏には県内の生息情報と文献収集について御協力頂いた。岐阜県立土岐紅陵高校の山本輝正氏、クビワコウモリを守る会の中村桃子氏にはクビワコウモリの音声録音に御協力頂いた。国土交通省長野河川国道管理事務所には現地調査の許可を得た。以上の皆様に感謝申し上げます。

^{注)} コウモリ類が発するエコロケーションパルスの構成成分は大きく分けて、短時間に周波数を変化させるFM型(Frequency Modulation)と一定の周波数で持続した周波数を保つCF型(Constant Frequency)がある。FM/QCF型はパルスの前半部にFM型を成し、後半部に周波数帯域幅が狭く時間幅が長いCF型に似ているQCF型(Quasi Constant Frequency)成分をもつ音声構造型を指す。

引用文献

- 1) Wilson, D. E. and Mittermeier, R. A. 2019. Handbook of the Mammals of the World. Vol.9. Bats. Lynx Editions. 1008 pp.
- 2) Jones, G., Jacobs, D. S., Kunz, T. H., Willig, M. R. and Racey, P. A. 2009. Carpe noctem: The

- importance of bats as bioindicators. *Endangered Species Research*. 8: 93-115.
- 3) Altringham, J. D. 1996. *Bats: Biology and Behavior*. Oxford University Press, 262 pp.
 - 4) 船越公威. 2020. *コウモリ学 - 適応と進化*. 東京大学出版会, 299pp.
 - 5) Kunz, T. H., T. Orrez, E. B., Bauer, D., Lobova, T. and Fleming, T. H. 2011. Ecosystem services provided by bats. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1223: 1-38.
 - 6) Seltzer, C. E., Ndangalasi, H. J. and Cordeiro, N. J. 2013. Seed dispersal in the dark: shedding light on the role of fruit bats in Africa. *Bio Tropica*. 45: 450-456.
 - 7) Thavry, H., Cappelle, J., Bumrungsri, S., Thona, L. and Furey, N. M. 2017. The diet of the cave nectar bat (*Eonycteris spelae* Dobson) suggests it pollinates ecologically significant plants in southern Cambodia. *Zoological Studies*. 56: 1-17.
 - 8) Boyles, J., Cryan, P. M., Mcracken, G. F. and Kunz, T. H. 2011. Economic importance of bats in agriculture. *Science*. 332: 41-42.
 - 9) IUCN. 2020. The IUCN Red list of threatened species. <<https://www.iucnredlist.org/ja/>> (2020年10月1日確認)
 - 10) Mickleburgh, S. P., Hutson, A. M. and Racey, P. A. 2002. A review of the global conservation status of bats. *Oryx*. 36: 18-24.
 - 11) Racy, P. A. and Entwistle, A. C. 2003. Conservation ecology of bats. In (Kunz, T. H. and Fenton, M. B. eds.) *Bat Ecology*. The University of Chicago Press, pp. 680-743.
 - 12) 長野県. 2004. *長野県版レッドデータブック～長野県の絶滅のおそれのある野生生物～動物編*. 長野県環境部自然保護課, 321 pp.
 - 13) 長野県. 2015. *長野県版レッドリスト～長野県の絶滅のおそれのある野生動植物～動物編*. 長野県環境部自然保護課, 234 pp.
 - 14) 山本輝正・佐藤顕義・勝田節子. 2008. 長野県におけるコヤマコウモリ *Nyctalus furvus* とクビワコウモリ *Eptesicus Japonensis* の採集記録. *哺乳類科学* 48: 277-280.
 - 15) 庫本 正. 1972. 秋吉台産コウモリ類の生態および系統動物学的研究. *秋吉台科学博物館報告*. 8: 7-119.
 - 16) 環境省. 2020. *環境省レッドリスト2020*. <<http://www.env.go.jp/press/107905.html>> (2020年9月21日確認)
 - 17) Pettersson Elektronik AB. 2020. How does an ultrasound detector work? <<https://batsound.com/about-ultrasound-detectors>> (2020年11月2日確認)
 - 18) Jones, G. 1999. Scaling of echolocation call parameters in bats. *The Journal of Experimental Biology*. 202: 3359-3367.
 - 19) Papadatou, E., Butlin, R. K. and Altringham, J. D. 2008. Identification of bat species in Greece from their echolocation calls. *Acta Chiropterologica*. 10: 127-143
 - 20) Parsons, S. and Jones, G. 2000. Acoustic identification of twelve species of echolocating bat by discriminant function analysis and artificial neural networks. *Journal of Experimental Biology*. 203: 2641-2565.
 - 21) Rodríguez, S. P. and Simonetti, J. A. 2013. Acoustic identification of four species of bats (Order Chiroptera) in central Chile. *The International Journal of Animal Sound and its Recording*. 22: 165-172.
 - 22) Skowronski, M. D. and Fenton, M. B. 2009. Detecting Bat calls : an Analysis of Automated Methods. *Actachiroptologic*. 11: 191-203.
 - 23) Barataud, M. 2015. *Acoustic Ecology of European Bats. Species Identification, Study of their Habitats and Foraging Behavior*. Biotope, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris (Inventaires et biodiversité series). 352 pp.
 - 24) Fukui, D., Agetsuma, N. and Hill, A. 2004. Acoustic identification of bat (Mammalia : Chiroptera) inhabiting forests of southern Hokkaido, Japan: Potential for conservation monitoring. *Zoological Science*. 21: 947-955.
 - 25) 増田圭祐・松井孝典・福井 大・福井健一・町村尚. 2017. 機械学習法を用いたエコロケーションによるコウモリの種判別. *哺乳類科学*. 57: 19-33
 - 26) 船越公威. 2010. 九州産食虫性コウモリ類の超音波音声による種判別の試み. *哺乳類科学*. 50: 165-175.
 - 27) クビワコウモリを守る会. 2019. *クビワコウモリカウント調査報告*. NEWS LETTER. 49: 3.
 - 28) 辻 明子・小柳恭二. 2003. 長野県佐久市周辺におけるヤマコウモリ生活史 (予報). *日本哺乳類学会2003年度大会要旨集*: 237.
 - 29) 気象庁. 2020. 過去の気象データ検索. <<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>> (2020年10月24日確認)
 - 30) Wildlife Acoustics. 2018. *Song Meter SM4 - Bioacoustics Recorder: User Guide*. Wildlife Acoustics, Inc., Massachusetts, USA. <<http://media.nhbs.com>> (2020年8月3日確認)

- 31) Ohdachi, D. S., Ishibashi, Y., Iwasa, M. A., Fukui, D. and Saitoh, T. 2015. The Wild Mammals of Japan. Second Edition. SHOUKADOH Book Sellers and the Mammal Society of Japan. 506 pp.
- 32) 佐藤雅彦・村山良子・佐藤理恵・前田喜四雄・浅川満彦. 2019. 北海道からコヤマコウモリの初記録. 利尻研究. 38 : 85-90.
- 33) Jones, G., Vaughan, N. and Parsons, S. 2000. Acoustic identification of bats from directly sampled and time-expanded recordings of vocalizations. *Acta Chiropterologica*. 2: 155-170.
- 34) Jones, G. 1995. Flight performance, echolocation and foraging behavior in noctule bats *Nyctalus noctule*. *Journal of Zoology*. 237: 303-312.
- 35) Preatoni, D. G., Nodari, M., Chirichella, R., Tosi, G., Wavters, L. and Martinoli, A. 2005. Identifying bats from time-expanded recording of search calls: Comparing classification methods. *The Journal of Wildlife Management*. 69: 1601-1614.
- 36) Biscardi, S., Orprecio, J., Fenton, M. B., Tsoar, A. and Ratcliffe, J. M. 2004. Data, sample sizes and statistics affect the recognition of species of bats by their echolocation calls. *Acta Chiropterologica*. 6: 347-363.
- 37) Brizke, E. R., Dudhamp, J. E., Murray, K. L., Swalhart, R. K. and Robbins, L. W. 2011. Acoustic identification of bats on the eastern United States : Comparison of parametric and nonparametric methods. *The Journal of Wildlife Management*. 75: 660-667.
- 38) Robert, D.R., Szwczak, J. M., Jones, G. and Parsons, S. 2009. Classification of echolocation calls from 14 species of bat by support vector machines and ensembles of neural networks. *Algorithms*. 2: 907-924.
- 39) Kofoky, A. F., Randrianandrianina, F., Russ, J., Raharinanteaina, I., Cardiff, S. G., Jenkins, R. K. B. and Racey, P. A. 2009. Forest bats of Madagascar: Results of acoustic surveys. *Acta Chiropterologica*. 11: 375-392.
- 40) Armitage, D. W. and Ober, H. K. 2010. A comparison of supervised learning techniques in the classification of bat echolocation calls. *Ecological Informatics*. 5: 465-473.
- 41) 山本輝正. 2019. Pythonによる機械学習を用いたコウモリ類の音声による種判別の試み. *コウモリ通信*. 24 : 25-31.
- 42) Zamora-Gutierrez, V., Lopez-Gonzalez, C., Cristina, M., Fenton, M. B., Jones, G., Kalko, E. K. V., Puechmaille, S. J., Stathopoulos, V. and Jones, K. E. 2016. Acoustic identification of Mexican bats based on taxonomic and ecological constraints on call design. *Methods in Ecology and Evolution*. 7: 1082-1091.
- 43) 小松茉莉奈・家根橋圭祐・安井さち子・上條隆志. 2016. 東信地域におけるクビワコウモリ *Eptesicus japonensis* 及びノレンコウモリ *Myotis bobinus* の捕獲記録. 筑波大学農林技術研究報告. 4 : 9-13.
- 44) 近藤憲久・福井 大・倉野飛史・黒澤春樹. 2012. 北海道網走郡大空町で確認されたヒメヒナコウモリの出産哺育コロニー. *哺乳類科学*. 52 : 63-70.
- 45) 吉倉智子・渡邊真澄・安井さち子. 2011. 栃木県におけるコヤマコウモリ *Nyctalus fuscus* の初記録と音声構造. 栃木県立博物館研究紀要. 28 : 45-49.
- 46) 安藤誠也・前田喜四雄. 2021. 島根県におけるヒメヒナコウモリ *Vespertilio murinus linnaeus*, 1758 の初確認. 島根県立三瓶自然館研究報告. 19 : 39-42.
- 47) 重昆達也・大沢夕志・大沢啓子・峰下 耕・清水孝頼・向山 満. 2013. 群馬県の新幹線高架橋で見つかったヒナコウモリ *Vespertilio sinensis* の出産哺育コロニーおよび冬季集団. 群馬県立自然史博物館研究報告. 17 : 131-146.
- 48) Sano, A. 2000. Postnatal growth and development of thermoregulatory ability in the Japanese greater horseshoe bat, *Rhinolophus ferrumequinum nippon*, related to maternal care. *Mammal Study*. 25: 1-15.
- 49) 立神雅宣・柳川 久. 2007. 北海道帯広市近郊におけるヤマコウモリの採餌活動. 日本哺乳類学会2007年度大会プログラム講演要旨集 : 153.
- 50) Brown, P. E. and Rainey, W. E. 2018. Bats of the California Channel Islands: New Records with New Methods. *Western North American Naturalist*. 78: 474-495.

Rare high-altitude flying bat distribution survey and their reliability based on acoustic analysis

Kyoji KOYANAGI^{*,***} · Akiko TAKII^{**} · Shigeyuki IZUMIYAMA^{**}

^{*}Shinshu University Graduate School of Science and Technology

^{**}Shinshu University Institute of Mountain Science

^{***}Asian Bat Research Institute

Summary

There are nineteen bat species distributed in Nagano prefecture, and thirteen species were recorded in Nagano RED LIST. But, up until now we have few research to assess rare distribution. To assess the distribution of three endangered high-altitude flying bat species (*Nyctalus aviator*, *Vespertilio sinensis*, and *Eptesicus japonensis*), we conducted acoustic analysis using time expansion bat detector in Nagano Prefecture, Japan. We attempted to discriminate species by comparing search-phase calls (model calls) of bats emerging from their roosts in Saku City and Matsumoto City, and examined the reliability of these species identifications. We recorded 1,078 echolocation calls across thirty-seven sites. We used cluster analysis to assess significant differences between species. We detected *N. aviator* at ten locations, *V. sinensis* at seven locations, and *E. japonensis* at seven locations. The classification accuracy using canonical discriminant analysis and machine learning were >90%. These results suggest that it is possible to assess the distribution of rare three bat species using acoustic analysis with high accuracy.

Key words: acoustic analysis, Chiroptera, distribution research, species identification, Nagano prefecture