



## 原著論文

# 小型風力発電施設がコウモリ類の活動量に与える影響： 北海道東部の事例

脇 翔吾・赤坂 卓美\*・安藤 駿汰

帯広畜産大学院保全生態学研究室

The influence of small wind turbines on bat activity in Eastern Hokkaido

Shogo Waki, Takumi Akasaka\* and Syunta Ando

Lab. Conservation Ecology, Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine

要旨：今日急速に普及している風力発電は、温室効果ガスの削減に大きく貢献する一方で、コウモリ類の事故問題が顕在化してきている。しかし、近年大型風車と同様に普及が進んでいる小型風車による影響は軽視されてきた。そこで本研究では、小型風車によるコウモリ類への影響を把握することを目的に、北海道根室振興局内に存在する小型風車を対象に、小型風車の存在がコウモリ類の活動量に与える影響を明らかにした。キタクビワコウモリとヤマコウモリ属/ヒナコウモリ属の活動量は風車直近の方が対照区（風車から 100 m 以上離れた場所）よりも高かった。また、ホオヒゲコウモリ属の活動量は区間で違いはなかった。本研究の結果は、小型風車では、これまで大型風車で死亡リスクが高いといわれてきた属（キタクビワコウモリとヤマコウモリ属/ヒナコウモリ属）だけでなく、死亡リスクが低いとされてきた属（ホオヒゲコウモリ属）も少なからず影響を受ける可能性を示唆する。このことから、今まで軽視されてきた小型風車におけるコウモリ類の保全対策は急務であると言える。

キーワード：再生可能エネルギー、持続可能性、ハイリスク種、風力発電機、飛翔動物

Abstract: Renewable energy sources, such as wind turbines, are a vital component of greenhouse gas emission reduction strategies worldwide. Although the small wind turbine sector is undergoing rapid growth, its influence on bats remains poorly understood. In this study, we clarified the influence of small wind turbines on bat activity in eastern Hokkaido, Japan. We found that *Eptesicus nilssonii* and *Nyctalus/Vespertilio* species were more active near wind turbines than in control sites at least 100 m from the turbines. In *Myotis* species, we detected no clear relationship between bat activity and wind turbine presence; because these bats did not avoid wind turbines, they may be at risk of turbine blade collisions. Our results suggest that small wind turbines may negatively influence a range of bat species.

Keywords: high-risk species, renewable energy, sustainability, wildlife, wind turbine

## はじめに

火力発電を含む化石燃料の大量消費や森林伐の過度な伐採等に伴う温室効果ガスは、気候変動を引き起こし、自然災害や人の健康被害だけでなく（Chan et al. 2018）、生態系にも悪影響をおよぼしている（Bellard et al.

2012）。生物に対しても、累積温度の上昇による繁殖成功率の低下、寄生関係の崩壊、生息地の縮小など多岐に渡る影響をもたらしており（Weiskopf et al. 2020）、年平均気温が 1℃～2℃上昇することで植物および哺乳類の種数が 19% 減少すると予想されている（Nunez et al. 2019）。このため、発電段階で温室効果ガスの排出量の

\* 〒 080-8555 北海道帯広市稲田町西 2 線 11 国立大学法人帯広畜産大学  
Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine, Nishi 2-sen 11, Inadacho, Obihiro 080-8555, Japan  
e-mail: mail2taq@gmail.com 2021 年 12 月 14 日受付、2022 年 7 月 25 日受理、2022 年 10 月 25 日早期公開（J-STAGE）  
著作権は著者に帰属する

少ない風力や太陽光、中小水力や地熱発電などの再生可能エネルギーへの転換が世界規模で進められている (Gielen et al. 2019; Bhattacharya et al. 2016)。例えば、EU では 2030 年までに 27% (European Council 2014)、ASEAN 加盟国では 2025 年までに 23% (Mamat et al. 2019)、日本では 2030 年までに 24% (Wakiyama and Kuriyama 2018) となっており、2050 年の世界の再生可能エネルギーの供給割合は 63% に達すると予想されている (Gielen et al. 2019)。これらの目標に向けて、再生可能エネルギーの導入速度は急速に進んでおり、2020 年現在で総エネルギー消費量に果たす再生可能エネルギーの割合は、EU で 20% (European Commission 2020)、日本では 21% に達している (経済産業省資源エネルギー庁「【速報】日本国内の電力需給 (2020 年度) における自然エネルギー割合」<https://www.isep.or.jp/archives/library/13247>、2022 年 4 月 8 日確認)。中でも風力発電は、運用コスト (送配電を含む発電コスト) に対する発電量の費用対効果が高いエネルギー資源であることから、世界中で注目されている (Kumar et al. 2016)。

しかし、風力発電の普及は、多くの地域住民にとって好意的に捉えられている一方で (Kaenzig et al. 2013; Bidwell 2013)、風車による鳥類やコウモリ類の死亡事故が問題視されている (Kunz et al. 2007; Arnett et al. 2008; Frick et al. 2017; Hammerson et al. 2017)。鳥類への影響としては、風車ブレードへの衝突死以外に、施設設置に伴う生息地改変、風車の存在に対する営巣を含む生息の放棄、そして、風車を回避することによる移動コストの増加 (障壁効果) などが主である (Drewitt and Langston 2006)。コウモリ類では障壁効果については未明であるものの、鳥類と同様に死亡事故や生息地の消失が個体群減少要因とされている (たとえば、Smallwood 2013; Barré et al. 2018)。しかし、鳥類と異なり風車ブレードに直接接触しなくとも、ブレードが回転することにより生じる気圧差によって引き起こされる圧負荷肺損傷によって、ブレードから 1 m 離れていても死亡する (Baerwald et al. 2008)。風車による死亡個体数は、飛翔動物の中でコウモリ類が最も多いと考えられており (Smallwood 2013)、例えば、アメリカ合衆国において風車による鳥類の年間死亡数は 140,000 ~ 328,000 個体と推定されているのに対し (Loss et al. 2013)、コウモリ類の死亡推定個体数は 600,000 ~ 888,000 個体に達している (Hayes 2013; Smallwood 2013, 2020)。加えて、北アメリカでは、1970 年以降に特定されている死亡要因の中で、風車による由来する死亡が、最も個体数が多い

(O'Shea et al. 2016)。日本における死亡個体数については、モニタリングおよび研究がなされていないため明らかになっていないが、例えば、ドイツのシュヴァルツヴァルトでは 1 MW あたり年間 163 個体のコウモリが死亡している (Rydell et al. 2010)。また、これらの死亡個体による評価では検出できない影響も存在し得る。例えば風車の回避は、生息地の損失を引き起こすため、コウモリ類の採餌機会に深刻な影響を与え (Barré et al. 2018)、結果的に生息場の放棄や個体群の縮小につながる可能性が高い。このため、風車がコウモリ類に与える影響の評価は、これまで主になされてきた死亡個体に基づくものだけでなく (Millon et al. 2015)、飛翔行動パターンについても着目していく必要がある。コウモリ類は、寿命が 30 年以上とされ、年あたりの産子数は 1 ~ 2 個体であり (Wilkinson and South 2002; Brunet-Rossinni and Austad 2004)、寿命が長く産子数が少なく、一度個体数が減少すると個体数を回復させることが極めて困難であるため (Barclay and Harder 2003)、風車による死亡個体数の増加はコウモリ類の個体群維持の上で深刻な脅威である (Arnett et al. 2016)。加えて、コウモリ類は、種数が多く、様々な環境に適応する種が存在するため、地域の哺乳類の多くを占めている (Buckley et al. 2010)。このため、風車によるコウモリ類の死亡事故問題の解決は、コウモリ類のみでなく、哺乳類全体の種多様性保全の観点においても欠かせない課題となっている。

風車によるコウモリ類への影響についての研究は、海外では 2000 年代以降、盛んに実施されており (たとえば、Cryan et al. 2014; Jansson et al. 2020; Richardson et al. 2021)、風車に対する誘引要因や回避要因について今もなお議論がなされている。また、風車への接近を緩和する対策も検討されている (Rydell et al. 2010; Arnett et al. 2011; Newson et al. 2017)。しかし、小型風車においては大型風車よりも頻繁に衝突する可能性が懸念されているもの (Hartmann et al. 2021)、これらの研究の多くは、大型風車を想定して実施されており、1000 kW 未満の小型ならびに中型風車を対象とした研究 (The Carbon Trust 2008; NEDO 2008) を対象にした研究は少ない (ただし、Brabant et al. 2019 を除く)。これは、再生可能エネルギーへの転換を目的に急速に導入が進んだ 2012 年以降の風車が 1000 KW 以上であったこと (Polinder 2011)、そして、発電量の大きさから大型風車が主要な発電手法と認識されていることにも起因する (Enevoldsen and Xydis 2019)。実際に、大型風車は現在も発電量を増加させており (計画時点での主流は 4000 KW 以上)、今後の再生

可能エネルギーを担う役割を有している。しかし、特に小型風車（50 kW 未満）は、大型風車に比べ、部品の運搬が容易かつ小さな面積でも設置でき、導入可能な場所が多いことから（Minderman et al. 2012；Singh and Ahamed 2013）、大型風車の導入が困難な環境において急速に導入が進んでいく可能性が高い。実際、世界における小型風車の1年間の導入量は、2015年時点でおおよそ100 MW（累積導入量は1 GW）であったのに対し、2020年には300 MW（累積導入量は2 GW）と増加傾向にある（World Wind Energy Association 2017）。日本においても小型風車の電力買取価格は現在低下傾向にあるものの、既に建設が予定されている小型風力発電施設のみでも5512施設存在する（経済産業省 再生エネルギー電子申請、事業計画認定情報 <https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfo>、2022年4月4日確認）。また、新たに電気買取における支援策としてFIP制度等も2022年から開始されており（経済産業省 資源エネルギー庁 <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/fip.html>、2022年4月4日確認）、今後さらに設置が増える可能性もある。

風車による飛翔動物の死亡リスクが高い空間は、主に風車ブレードの回転範囲とされているが（Horn et al. 2008）、小型風車のブレード回転範囲（地上5 m～40 m）は、大型風車（地上50 m～）とは異なる（Ahmadreza and Archer 2017；Minderman et al. 2017；NEDO 2008）。特に、コウモリ類は種により多様な空間を利用するものの（Roemer et al. 2017）、その多くが林冠（おおよそ地上35 m）以下の高さを利用する（Müller et al. 2013）。このため、大型風車よりも多くのコウモリ種が、小型風車のブレード回転範囲を飛翔する可能性がある。実際、小型風車のブレード回転範囲である地上5 m～40 mは、これまで大型風車でハイリスク種とされてきた分類群（例えば、ヤマコウモリ属 *Nyctalus*、クビワコウモリ属 *Eptesicus*、ヒナコウモリ属 *Vespertilio*、ならびに、アラコウモリ属など）に加え、低高度を飛翔するため大型風車のリスク評価では軽視されてきたホオヒゲコウモリ属 *Myotis* やウサギコウモリ属 *Plecotus* などが頻繁に飛翔する高度（Roemer et al. 2017）と一致する。このため、コウモリ類に配慮した小型風車の運用は、コウモリ類個体群の保全において重要な意味を持つだろう。そこで、本研究は、小型風車によるコウモリ類への影響の緩和に資する知見を提供することを目的に、小型風車の存在と各コウモリ種の飛翔行動パターンとの関係について明らかにする。

## 対象分類群

本研究の対象であるコウモリ類は、世界におおよそ1000種存在し、国内ではおおよそ37種である（Ohdachi et al. 2015）。このうち、後述する本調査地域（根室振興局）では、林内を主な活動の場とする（林内種）チチブコウモリ *Barbastella pacifica*、ニホンウサギコウモリ *Plecotus sacrimontis*、テングコウモリ *Murina hilgendorfi*、そして、コテングコウモリ *M. ussuriensis*、林縁を好む（エッジ種）カゲヤコウモリ *Myotis frater*、ウスリホオヒゲコウモリ *M. gracilis*、ヒメホオヒゲコウモリ *M. ikonnikovi*、モモジロコウモリ *M. macrodactylus*、ノレンコウモリ *M. nattereri*、ドーベントンコウモリ *M. petax*、そして、開放地を好んで活動する（開放地性種）キタクビワコウモリ *Eptesicus nilssonii*、ヤマコウモリ *Nyctalus aviator*、ヒナコウモリ *Vespertilio sinensis* が確認されている（近藤 2001, 2002, 2003；近藤ほか 2003, 2005）。また、根室振興局内では確認されていないものの、これまで分布が確認されていなかったコヤマコウモリ *N. furvus* やヒメヒナコウモリ *Vespertilio murinus* が北海道内で近年新たに確認されており（近藤ほか 2012；佐藤ほか 2019）、これらの種が生息している可能性も否定できない。これらの属の飛翔高度は多様であるが、林内種であるウサギコウモリ属は地上2 m未満の高さを主に飛翔するとされている（例えば、Krapivnitckaia et al. 2019）。また、エッジ種は地上50 m未満（主に20 m未満）の高さを、開放地性種は主に地上50 m～100 mの高さを飛翔する（Voigt et al. 2021）。繁殖期には、多くの種が主に樹洞を利用するが、モモジロコウモリは洞窟等を利用する。また、家屋や橋梁下など人工構造物も利用する。また、いずれの属においても、移動や採餌の場として河川等の水域環境を利用する。季節移動については国内では明らかになっていないが、海外ではヤマコウモリ属やヒナコウモリ属、そしてクビワコウモリ属について長距離を移動することが報告されており（Fleming 2019）、その際には地上150 m以上の高さを飛翔するとされている（Voigt et al. 2021）。

## 方法

### 調査地

本研究は北海道根室振興局を調査地域とした。同振興局は、総面積3497 km<sup>2</sup>を有する冷涼な地域（年平均気温5℃～7℃）である（根室振興局 2020）。根室振興局の地上30 mにおける年平均風速は、風力発電施設の導

表 1. 風車および対象区を中心とした半径 200m 内の環境。200 m は、コウモリ類の環境選択性に最も関係する空間スケールである (Millon et al. 2018)。高度偏差値 = (測定地点高度 - 50m 内高度平均値) / 50m 内高度標準偏差

地点	高度標準偏差 (m)	測定地点高度偏差値	林縁距離 (m)	草地・低木林被覆率 (%)	道路・裸地被覆率 (%)	樹林被覆率 (%)	淡水・海水面被覆率 (%)
風車 1	1.59	-0.08	196.86	96.94	3.04	0.00	0.00
風車 1 対照区	1.65	0.05	120.32	97.89	2.10	0.00	0.00
風車 2	1	-0.04	429.03	97.80	1.99	6.12	0.00
風車 2 対照区	1.16	0.08	442.40	92.51	1.36	0.79	0.00
風車 3	0.49	0.32	1593.50	94.49	5.50	0.00	0.00
風車 3 対照区	0.83	0.14	1582.13	93.01	6.98	0.00	0.00
風車 4	1.43	0.17	926.43	57.80	20.82	0.00	21.36
風車 4 対照区	1.7	0.56	1032.79	63.35	14.59	0.00	22.05

入が推奨される 7 m/s 以上である場所が多く、他の振興局よりも発電ポテンシャルが高い (NEDO 2013)。既に根室振興局内には、現在筆者らが確認しているだけでもおよそ 40 基以上の小型風車が建設されており、さらに 102 施設の小型風車が建設予定である (経済産業省 再生エネルギー電子申請、事業計画認定情報 <https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfo>、2022 年 4 月 4 日確認)。現在建設されている小型風力発電施設のほとんどが建設物や大径木が存在しないヨシ類またはササ類が優占する開放地に建設されている。これら草地は、開放地性種に多く利用されている (例えば、Roeleke et al. 2016)。また、ホオヒゲコウモリ属のいくつかの種 (例えばカグヤコウモリ) は、森林を主な生息場とするものの、開放地も利用することが報告されている (Akasaka et al. 2012)。

本研究は、既存の小型風車の中から、4 つの風車をランダムに選択し調査地とした。対象の小型風車は、すべて周辺に建造物や大径木はなく、ヨシ類またはササ類が優占する開放地に建設されていた (表 1)。

### コウモリ類の活動量調査

2020 年 8 月 13 日～26 日を調査期間とした。8 月は、コウモリ類にとって分散初期に該当し、風車によるコウモリ類の死亡件数が多いとされている (Arnett et al. 2008; Baerwald and Barclay 2011; Arnett et al. 2016)。

各調査地において、コウモリ類の音声を、自動録音機 (Song meter mini bat ultrasonic recorder、Wildlife Acoustics 社、以下: バットディテクター) を用いて集音した。バットディテクターは、小型風車から 5 m 以内の位置にそれぞれ 1 台設置した。コウモリ類が風車の影響を受けやすい範囲についての研究では、ユーラシアヤマコウモリ *Nyctalus noctula* やウサギコウモリ *Plecotus auritus* などのコウモリ類では風車から 0～25 m の範囲で (Minderman

et al. 2012)、アブラコウモリ属 *Pipistellus* では 0～100 m の範囲で顕著な影響を受けるとされる (Minderman et al. 2017)。このため、本研究では、小型風車による影響の過小評価を避けるため、それぞれの小型風力発電施設から少なくとも 100 m 以上離れた地点 (最低 101 m—最大 210 m) に対照区としてバットディテクターを 1 台ずつ設置した。この際、コウモリ類の活動は、植生や水辺環境の影響を強く受けることから (Threlfall et al. 2011; Dixon 2012)、すべての対照区は、風車付近と環境が類似する場所に設置した。すべてのバットディテクターの録音システムは統一し (サンプルレート 384 KHz、録音する周波数の最小値 16 KHz、最大で録音可能時間 15 秒間)、マイクを処理区では風車に向け、対照区では風車付近の音声を収集するのを避けるために風車と逆方向に向け、地上から 1 m の高さに木杭に固定して設置した。音声の録音時間は、コウモリの夜間の活動を確実に取得するために日没 2 時間前から日の出 2 時間後までとした。

### 音声データ解析

得られた音声データは音声解析ソフト (Kaileidoscope pro ver. 5.3.1、Wildlife Acoustics 社) を用いて、以下の手順を用いて観測できたコウモリ類について属レベルで活動量を定量化した。まず音声リファレンスを用いて各コウモリ属の音声を自動分類した。この際、用いた音声解析ソフトに日本産コウモリ類の音声情報が存在しないことから、自動分類の基準にはヨーロッパ産コウモリ類 (キクガシラコウモリ属 *Rhinolophus*、オヒキコウモリ属 *Tadarida*、ホオヒゲコウモリ属、クビワコウモリ属 *Eptesicus*、ヤマコウモリ属 *Nyctalus*、ヒナコウモリ属 *Vespertilio*、チチブコウモリ属 *Barbastella*、ウサギコウモリ属) の音声情報を用いた。また、自動分類後に各音声情報を Fukui et al. (2004) を参考に再度目視で確認し、

誤分類があった場合には修正した。録音された音声データは1つの音声ファイルを1回の活動と定義した。本来、風車への影響は、種によって異なる可能性があるため (Minderman et al. 2017)、種レベルでの評価が望ましい。ただし、日本産コウモリ類を正確に音声情報から特定する手法は現在のところ存在していないため、本研究では属レベルまでにとどめた。北海道に生息するクビワコウモリ属は1種のみ (キタクビワコウモリ) であることから、クビワコウモリ属に分類された音声が存在する場合にはキタクビワコウモリとした。また、国内で確認されているヤマコウモリ属とヒナコウモリ属は、目視では完全に分離することが困難であったことから、本研究においては、2属をまとめてヤマコウモリ属/ヒナコウモリ属とした。

コウモリ類は、採餌時に特異的な音声を発することから (Adriana et al. 2013)、音声データは、採餌と通過の2つの行動様式に類別することが出来る。しかし、本研究では、解析に十分に耐えられる量の採餌音データを取得できなかったため、個別の行動様式ごとの解析は困難であった。本研究の主目的は、小型風車周辺でのコウモリ類の活動量の評価であり、通過音数と採餌音数データの間には強い正の相関があったことから ( $|r| > 0.7$ )、本研究では活動量として通過音数と採餌音数をまとめて用いた。

### 統計解析

コウモリ類の活動量が処理区と対照区とで異なるかどうかを明らかにするために、コウモリ類の1日ごとの活動量を目的変数、風車の有無 (対照区か処理区か) を説明変数とした各属でモデルを構築した。本研究データではコウモリ類の活動量が確認されなかった日も存在していたことから、確率分布として0過剰ポアソン分布を仮定したベイズ帰帰モデルを用い、各調査地IDと調査日をネスト構造 (調査日/調査地ID) にしてランダム効果として適用した。

コウモリ類の活動量は、外気温、降水量および風速などの気象条件に応じて変化する。例えば、ニュージーランドおよびアメリカ合衆国で行われた研究では、およそ10.00℃以下の環境下で著しく活動量が減少した (O'Donnell 2000; Horn et al. 2008; Wolbert et al. 2014)。また、イギリスで行われた研究では、単位時間あたりの降水量が15 mmを超えるとコウモリ類の活動量が著しく減少した (Parsons et al. 2003)。しかし、本調査期間中、10.00℃以下になる日や降雨はほとんど認められなかつ

たことから、全てのデータを用いることとした。

全ての解析は、統計ソフト R version 3.6.1 (R Core Team 2021) と、R パッケージ “brms” (Bürkner 2017) を用いた。

### 結果

昆虫類等の音声や風等の環境音を多く録音してしまったことにより調査期間終了前に機器のバッテリーが切れてしまったケースも存在したが、合計で9027ファイルのコウモリ類の音声を収集した (付録1表1)。確認されたコウモリ類は、これまで大型風車に対してハイリスク種とされてきたキタクビワコウモリおよびヤマコウモリ属/ヒナコウモリ属と、リスクが低いとされてきたホオヒゲコウモリ属であった (Rydell et al. 2010)。最も多く確認されたのはキタクビワコウモリであり全体のおよそ65% (6119ファイル) を占めていた。また、ヤマコウモリ属/ヒナコウモリ属およびホオヒゲコウモリ属の音声ファイル数は、それぞれ2515 (全体の27%)、793 (全体の8%) であった。

キタクビワコウモリおよびヤマコウモリ属/ヒナコウモリ属の活動量は、風車付近の方が対照区よりも有意に多かった (図1)。両種 (属) の日平均活動量 ( $\pm$  SE) は、風車付近でそれぞれ  $349.00 \pm 87.61$  と  $134.33 \pm 44.27$  回/日、対照区 (風車から100 m以上離れた場所) でそれぞれ  $13.00 \pm 3.30$  と  $4.00 \pm 1.25$  回/日であり、風車付近の方が26倍以上多かった (図2)。一方で、ホオヒゲコウモリ属の活動量は、風車付近と対照区で有意な違いは認められなかった (図1)。ホオヒゲコウモリ属の日平均活動量 ( $\pm$  SE) は対照区  $8.67 \pm 2.3$  回/日、処理区  $22.3 \pm 6.03$  回/日であった (図1)。

### 考察

本研究は、小型風力発電施設周辺では多くのコウモリ類が活発に活動し、大型風車においてハイリスク種とされていた種が存在する属 (Rydell et al. 2010) だけでなく、ホオヒゲコウモリ属のようにこれまで大型風車では影響がないとされてきたコウモリ属に対しても少なからず影響が及ぶ可能性を示唆する。特にキタクビワコウモリおよびヤマコウモリ属/ヒナコウモリ属が積極的に風車に接近している可能性を示唆する本研究の結果は、小型風車により衝突機会が増加する危険性を示唆する。国内外で小型風車によるコウモリ類への影響はあまり注目され

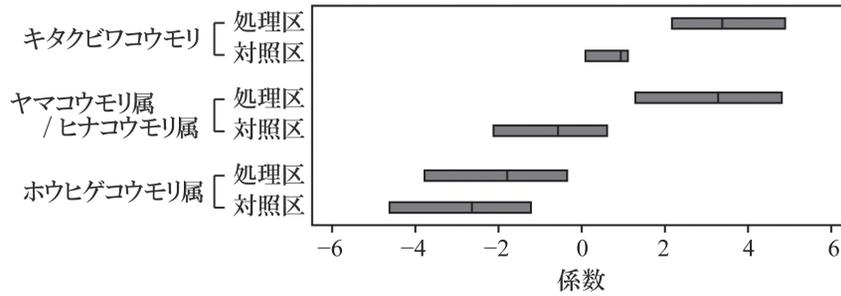


図1. 各属の活動量と処理区および対照区の関係。バーは、モデルで得られた各変数（処理区 / 対照区）の係数の95%信頼区間を示す。処理区とは、風車から5 m地点、対照区は風車から100 m以上離れた地点を示す。

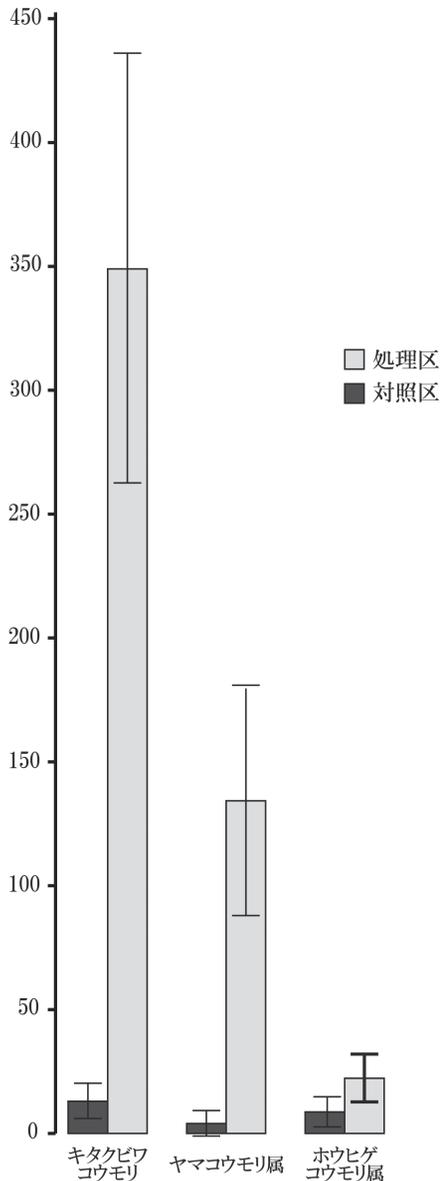


図2. 各種または属における処理区および対照区での日平均活動量±SE。処理区とは、風車から5 m地点、対照区は風車から100 m以上離れた地点を示す。

ていなかったが、小型風力発電施設においても、設置および運用計画によるコウモリ類への配慮の重要性を主張する本研究の結果は、コウモリ類そして哺乳類全体の種多様性保全に大きく貢献するだろう。

### コウモリ類の活動量に関係する要因

#### 1) キタクビワコウモリおよびヤマコウモリ属/ヒナコウモリ属

本研究で出現した3属のうち、キタクビワコウモリとヤマコウモリ属/ヒナコウモリ属が風車近くで活動量を増加させていた（図1）。大型風車を対象とした研究によれば、コウモリ類は、風車に誘引された昆虫の採餌（Cryan and Barclay 2009；Jansson et al. 2020）、繁殖相手の探索（Cryan 2008；Cryan and Barclay 2009；Cryan et al. 2012）、季節移動の際の目印（Jameson and Willis 2014）、そしてねぐら木の探索（Cryan and Barclay 2009）など、地域や種、時期によって様々な要因により風車に誘引される。中でも、季節移動で長距離を飛翔するコウモリ類は、飛翔の際に山脈または大径木のような周辺よりも背の高い物体を目印とするため（Genzel et al. 2018）、大径木と同等あるいは大径木よりも高い風車は、季節移動の目印として好適である可能性が指摘されている（Jameson and Willis 2014）。本研究で使用した小型風車付近において、潜在的に分布し得るヤマコウモリ属（ヤマコウモリおよびコヤマコウモリ）やヒナコウモリ属（ヒナコウモリおよびヒメヒナコウモリ）には、季節的な飛翔距離に関する知見がないが、ヤマコウモリ属やヒナコウモリ属の多くの種は、長距離移動をすることが知られている（Fleming 2019）。また、本研究の調査期間は季節移動が始まる分散初期であること（Arnett et al. 2008；Bearwald and Barclay 2011；Arnett et al. 2016）、さらに、本研究では頻繁な通過音が確認されている中で採餌音が多く取得できなかったことを考慮すると、本研究でみら

れた風車周辺におけるヤマコウモリ属/ヒナコウモリ属の活動量の多さは、渡りにおける目印として風車を利用した結果である可能性がある。

## 2) ホオヒゲコウモリ属

本研究においてホオヒゲコウモリ属は、小型風車の存在によって活動パターンを変化させなかった。本調査地に生息するホオヒゲコウモリ属（カグヤコウモリ、ウスリホオヒゲコウモリ、ヒメホオヒゲコウモリ、モモジロコウモリ、ノレンコウモリ、そして、ドーベントンコウモリ）については長距離での渡りをする例は報告されていないため、ヤマコウモリ属のように渡りするための目印は必要でなかったと考えられる。また、ホオヒゲコウモリ属の多くは、生息地として河畔林や川の近辺を好むのに対し（Ciechanowski 2002；Akasaka et al. 2012）、本研究で対象とした風車は開放地に建設されていた。このため、本調査地は、そもそもホオヒゲコウモリ属の主な活動場所ではなかった可能性がある。一方で、風車が発する騒音は、大型風車だと 90dB にも達することがあり（Oerlemans et al. 2007）、コウモリ類のエコロケーションによる定位を阻害するため、ホオヒゲコウモリ属を含むコウモリ類が大型風車を忌避した例が報告されている（Schaub et al. 2008）。しかし、小型風車のノイズは 60 dB と大型風車よりも約 30 dB 小さく（Lee and Lee 2014）、小型風車を回避した既存の報告例はアブラコウモリ属 *Pipistrellus* のみである（Minderman et al. 2017）。アブラコウモリ属が発する超音波の構造（45 KHz で FM 音と QCF 音のパルス、Kalko and Schitzler. 1993）は、ホオヒゲコウモリ属と異なり（50 - 60 KHz で FM 音のパルス、Fukui et al. 2004）、風車が発するノイズの音声構造と類似している。このため、アブラコウモリ属の知見を一般化するのには難しい（Schaub et al. 2008；Long et al. 2010）。少なくとも本調査地においては、小型風車のノイズは、ホオヒゲコウモリ属の活動量を変化させるほどではなかったのかもしれない。

## 小型風車の影響を受けやすい可能性のある種または属

本研究においてキタクビワコウモリとヤマコウモリ属/ヒナコウモリ属は、小型風車の直近で活動量が高かった。これらの属は、開放空間を飛翔するのに適した細長い翼型を有しているため、一般的に林冠より上空の空間を好んで飛翔するとされている（Müller et al. 2013）。このため、ハイリスク種の選定根拠は地域で異なるもの（Rydell et al. 2010；Arnett et al. 2016；Newson et al.

2017）、ドイツやアメリカをはじめ多くの地域では、大型風車においてクビワコウモリ属とヤマコウモリ属/ヒナコウモリ属がハイリスク種に区分されている（Kunz et al. 2007；Arnett et al. 2008；Rydell et al. 2010；Newson et al. 2017）。しかし、これらのコウモリは、低高度も同程度に飛翔することも報告されており（Kalcounis et al. 1999；Roeleke et al. 2018）、小型風車のブレードの回転範囲（5 m ~ 40 m）でも頻繁に飛翔する（Roemer et al. 2017）。これらの知見は、本研究結果を支持するだろう。

さらに、ホオヒゲコウモリ属は小型風車の直近でも活動量に顕著な差がなかった。このことは、少なくとも小型風車を回避していないと言える。風車に誘引されていなくとも回避していない種の死亡率は、活動量と相関することから（Cryan and Barclay 2009）、活動量の多い環境では死亡リスクは高くなるかもしれない。

## 保全への提言

前述のとおり風車によるコウモリ類への影響はコウモリ類の生活史ステージによっても異なってくる可能性がある。このため、本研究を実施した 8 月のみでなく、少なくとも繁殖期全体を含めたさらなる調査が、小型風車への影響を把握する上で、今後欠かせないだろう。しかし、分散期にあたる 8 月は、コウモリ類の死亡事故が様々な地域で共通して最も多い月であり（Arnett et al. 2008；Bearwald and Barclay 2011；Arnett et al. 2016）、この時期に得られた本研究結果は、今後コウモリ類に配慮した小型風力発電施設の運用計画において重要な知見となる。

風力発電は、世界規模で今後も増加傾向にある（Global Wind Energy Council 2020）。風力発電におけるもっとも効率的な野生動物への影響緩和策は、立地場所選定時に野生動物に影響が大きい場所を避けることである（Drewitt and Langston 2006）。小型風車は大型風車に比べ、導入可能な場所が多いことから（Minderman et al. 2012；Singh and Ahmed 2013）、土地所有者が細分化された開放地やアクセスが容易だが農地への影響が小さく森林伐採する必要も少ない林縁部で導入が進む可能性がある。本研究の結果は、開放地での設置がコウモリ類に深刻な影響を与える危険性があることを示す。一方で、林縁部を含む森林環境は、多くのホオヒゲコウモリ属に好まれる（例えば、Vasko et al. 2020）。死亡リスクは、活動量と相関することを踏まえると（Cryan and Barclay 2009）、活動が集中する林縁での小型風車設置はホオヒゲコウモリ属の個体群に影響を与えるかもしれない。クビワコウモリ属もまた開放空間のみでなく、林縁も利用する

(Verboom and Huitema 1997)。これらのことから、小型風力発電施設が潜在的に建設されやすい環境の多くは、コウモリ類の好適な生息場と重複するため、コウモリ類に配慮した立地選定は難しい可能性が高い。このため、小型風車の運用段階での保全対策もまた重要視されるだろう。これまで、大型風車では、運用段階でのコウモリ類への影響緩和策が実施されてきている。例えば、飛翔能力が低いコウモリ類は、発電効率が高い高風速下では高高度の飛翔が困難であることを利用し、コウモリ類が飛翔しなくなる風速までカットイン風速値（風車を稼働させるために必要な閾値）を増加させる試みがなされている（Arnett et al. 2011）。この取り組みにより、アメリカでは44～93%（Arnett et al. 2011）、ヨーロッパでは34～78%の死亡率削減に成功している（Martin et al. 2017）。また、コウモリ類が忌避する超音波装置を風車に取り付け、回避を促すといった対策が検討されている（Weaver et al. 2020）。少なくともコウモリ類に配慮した風車の運用計画においては、このような保全対策が必要になるだろう。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、調査地域について貴重な情報を提供いただいた根室市歴史と自然の資料館の外山雄大氏に厚く御礼申し上げます。また、東京大学の福井大氏にも貴重なご助言をいただきましたこと感謝申し上げます。この研究は、文部科学省科学研究費補助金（課題番号20H04373）の助成を受け行われたものである。

## 引用文献

- Adriana MD, Holger RG, Björn MS (2013) Interspecific acoustic recognition in two European bat communities. *Frontiers in Physiology*, 192:1-8. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00192>
- Ahmadreza V, Archer CL (2017) Wind farm hub height optimization. *Applied Energy*, 195:905-921. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.089>
- Akasaka T, Akasaka M, Nakamura F (2012) Scale-independent significance of river and riparian zones on three sympatric *Myotis* species in an agricultural landscape. *Biological Conservation*, 145:15-23. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.08.017>
- Arnett EB, Baerwald EF, Mathews F, Rodrigues L, Rodriguez-Duran A, Rydell J, Villegas-Patracca R, Voigt CC (2016) Impacts of wind energy development on bats. In: Voigt CC, Kingston T (eds), *Bats in the anthropocene conservation of bats in a changing world*: Springer, Berlin
- Arnett EB, Brown WK, Erickson WP, Fiedler JK, Hamilton BL, Henry TH, Jain A, Johnson GD, Kerns J, Koford RR, Nicholson CP, O'Connell TJ, Piorkowski MD, Tankersley JRRD (2008) Patterns of bat fatalities at wind energy facilities in north America. *Journal of Wildlife Management*, 72:61-78. <https://doi.org/10.2193/2007-221>
- Arnett EB, Huso MM, Schirmacher MR, Hayes JP (2011) Altering turbine speed reduces bat mortality at wind-energy facilities. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9:209-214. <https://doi.org/10.1890/100103>
- Baerwald EF, Barclay RR (2011) Patterns of activity and fatality of migratory bats at a wind energy facility in Alberta, Canada. *The Wildlife Society*, 75:1103-1114. <https://doi.org/10.1002/jwmg.147>
- Baerwald EF, D'Amours GH, Klug BJ, Barclay RMR (2008) Barotrauma is a significant cause of bat fatalities at wind turbines. *Current Biology*, 18:695-696. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.06.029>
- Barclay RMR, Harder LM (2003) Life histories of bats: life in the slow lane. In: Kunz TH, Fenton MB (eds) *Bat Ecology*. University of Chicago Press, Chicago
- Barré K, Viol IL, Bas Y, Julliard R, Kerbiriou C (2018) Estimating habitat loss due to wind turbine avoidance by bats: implications for European siting guidance. *Biological Conservation*, 226:205-214. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.07.011>
- Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F (2012) Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15:365-377. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x>
- Bhattacharya M, Paramati SR, Ozturk I, Bhattacharya S (2016) The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. *Applied Energy*, 162:733-741. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.104>
- Bidwell D (2013) The role of values in public beliefs and attitudes towards commercial wind energy. *Energy Policy*, 58:189-199. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.03.010>
- Brabant R, Laurent Y, Poerink BJ, Degraer S (2019) Activity and behaviour of Nathusius' pipistrelle *Pipistrellus nathusii* at low and high altitude in a North Sea offshore wind farm. *Acta Chiropterologica*, 21:341-348. <https://doi.org/10.3161/15081109ACC2019.21.2.009>
- Brunet-Rossinni AK, Austad SN (2004) Ageing studies on bats: A review. *Biogerontology*, 5:211-222. <https://doi.org/10.1023/B:BGEN.0000038022.65024.d8>
- Buckley LB, Davies TJ, Ackerly DD, Kraft NJB, Harrison SP, Anacker BL, Cornell HV, Damschen EI, Grytnes J, Hawkins BA, McCain CM, Stephens PR, Wiens JJ (2010) Phylogeny, niche conservation and the latitudinal diversity gradient in mammals. *Proceedings of the Royal*

- Society B: Biological Sciences, 277:2131-2138. <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.0179>
- Bürkner PC (2017) brms: An R package for Bayesian multilevel models using Stan. *Journal of Statistical Software*, 80:1-28. <https://doi.org/10.18637/jss.v080.i01>
- Chan AWM, Hon KL, Leung TF, Ho MHK, Duque JS Rosa, Lee TH (2018) The effects of global warming on allergic diseases. *Hong Kong Medical Journal*, 24:277-284. <https://doi.org/10.12809/hkmj177046>
- Ciechanowski M (2002) Community structure and activity of bats (Chiroptera) over different water bodies. *Mammalian Biology*, 67:276-285. <https://doi.org/10.1078/1616-5047-00042>
- Cryan PM (2008) Mating behavior as a possible cause of bat fatalities at wind turbines. *Journal of Wildlife Management*, 72:845-849. <https://doi.org/10.2193/2007-371>
- Cryan PM, Barclay RMR. (2009) Causes of bat fatalities at wind turbines: Hypotheses and predictions. *Journal of Mammalogy*, 90:1330-1340. <https://doi.org/10.1644/09-MAMM-S-076R1.1>
- Cryan PM, Gorresen PM, Hein CD, Schirmacher MR, Diehl RH, Huso MM, Hayman DTS, Fricker PD, Bonaccorso FJ, Johnson DH, Heist K, Dalton DC (2014) Behavior of bats at wind turbines. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111:15126-15131. <https://doi.org/10.1073/pnas.1406672111>
- Cryan PM, Jameson JW, Baerwald EF, Willis CK, Barclay RMR, Snider EA, Crichton EG (2012) Evidence of late-summer mating readiness and early sexual maturation in migratory tree-roosting bats found dead at wind turbines. *Plos One*, 7:0047586. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047586>
- Dixon MD (2012) Relationship between land cover and insectivorous bat activity in an urban landscape. *Urban Ecosystem*, 15:683-695. <https://doi.org/10.1007/s11252-011-0219-y>
- Drewitt AL, Langston RHW (2006) Assessing the impacts of wind farms on birds. *International Journal of Avian Science*, 148:29-42. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2006.00516.x>
- Enevoldsen P, Xydis G (2019) Examining the trends of 35-years growth of key wind turbine components. *Energy for Sustainable Development*, 50:18-26. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.02.003>
- European Commission (2020) Technical assistance in realisation of the 5th report on progress of renewable energy in the EU: Task 1-2 final report. <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2020/Report.pdf>, 2022年4月4日確認
- European Council (2014) European council conclusions - 23/24 October 2014. <http://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-169-2014-INIT/en/pdf>, 2021年12月14日確認
- Fleming TH (2019) Bat migration. *Encyclopedia of Animal Behavior*, 3:605-610. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.20764-4>
- Frick WF, Baerwald EF, Pollock JF, Barclay RMR, Szymanski JA, Weller TJ, Russellg AL, Loeb SC, Medellini RA, McGuirej LP (2017) Fatalities at wind turbines may threaten population viability of a migratory bat. *Biological Conservation*, 209:172-177. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.02.023>
- Fukui D, Agetsuma N, Hill AD (2004) Acoustic identification of eight species of bat (Mammalia: Chiroptera) inhabiting forest of southern Hokkaido, Japan: Potential for conservation monitoring. *Zoological Science*, 21:947-955. <https://doi.org/10.2108/zsj.21.947>
- Genzel D, Yovel Y, Yartsev MM (2018) Neuroethology of bat navigation. *Current Biology*, 28:R997-R1004. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.04.056>
- Gielen G, Boshell F, Saygin D, Bazilian MD, Wanger N, Gorini R (2019) The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24:38-50. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>
- Global Wind Energy Council (2020) Global Wind Report 2019, Belgium Brussels
- Hammerson GA, Kling M, Harkness M, Ormes M, Young BE (2017) Strong geographic and temporal patterns in conservation status of North American bats. *Biological Conservation*, 212:144-152. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.05.025>
- Hartmann SA, Hochradel K, Greule S, Günther F, Luedtke B, Schauer-Weissahn H, Brinkmann R (2021) Collision risk of bats with small wind turbines: Worst-case scenarios near roosts, commuting and hunting structures. *Plos One*, 16:e0253782. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253782>
- Hayes MA (2013) Bats killed in large numbers at United States wind energy facilities. *BioScience*, 63:975-979. <https://doi.org/10.1525/bio.2013.63.12.10>
- Horn JW, Arnett EB, Kunz TH (2008) Behavioral responses of bats to operating wind turbines. *The Journal of Wildlife Management*, 72:123-132. <https://doi.org/10.2193/2006-465>
- Jameson JW, Willis CKR (2014) Activity of tree bats at anthropogenic tall structures: implications for mortality of bats at wind turbines. *Animal Behavior*, 97:145-152. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2014.09.003>
- Jansson S, Malmqvist E, Brydegaard M, Åkesson S, Rydell J (2020) A scheidpflug lidar used to observe insect swarming at a wind turbine. *Biological Indicators*, 117:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106578>
- Kaenzig J, Heinzle SL, Wüstenhagen R (2013) Whatever the customer wants, the customer gets? Exploring the gap between consumer preferences and default electricity products in Germany. *Energy Policy*, 53:311-322. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.061>

- Kalcounis MC, Hobson KA, Brigham RM, Hecker KR (1999) Bat activity in the boreal forest: importance of stand type and vertical strata. *Journal of Mammalogy*, 8:673-682. <https://doi.org/10.2307/1383311>
- Kalko EKV, Schitzler HU (1993) Plasticity in echolocation signals of European pipistrelle bats in search flight: implications for habitat use and prey detection. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 33:415-428. <https://doi.org/10.1007/BF00170257>
- 近藤 憲久 (2001) 根室半島コウモリ類調査報告, 根室市教育委員会, 根室
- 近藤 憲久 (2002) コウモリ調査について. 根室市博物館開設準備室だより, 17:24-25
- 近藤 憲久 (2003) 根室市博物館開設準備室に届けられたコウモリについて. 根室市博物館開設準備室紀要, 17:83-86
- 近藤 憲久, 福井 大, 倉野 翔史, 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
- 近藤 憲久, 芹澤 裕二, 佐々木 尚子 (2005) 北海道浜中町のコウモリ相. *東洋蝙蝠研究所紀要*, 1:1-6
- 近藤 憲久, 宇野 裕之, 芹澤 裕二, アンドレイ クラスネンコ, 濱 裕人 (2003) 厚岸町のコウモリ相. *東洋蝙蝠研究所紀要*, 3:1-9
- Krapivnitckaia P, Kunz VD, Floeter C (2019) Currently known characteristics of bat species represented in Hamburg in respect of wind turbine casualties. In: Messana JO, Rubio JMM (eds) *Proceedings 5th CARPE conference: Horizon Europe and beyond*, 138-145, Editorial Universitat Politècnica de València, Valencia
- Kumar Y, Ringenberg J, Depuru SS, Devabhaktuni VK, Lee JW, Nikolaidis E, Andersen B, Afjeh A (2016) Wind energy: Trends and enabling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53:209-224. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.200>
- Kunz TH, Arnett EB, Erickson WP, Hoar AR, Johnson GD, Larkin RP, Strickland MD, Thresher RW, Tuttle MD (2007) Ecological impacts of wind energy development on bats: questions, research needs, and hypotheses. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5:315-324. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[315:EIOWED\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[315:EIOWED]2.0.CO;2)
- Lee S, Lee S (2014) Numerical and experimental study of aerodynamic noise by a small wind turbine. *Renewable Energy*, 65:108-112. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.036>
- Long CV, Flint JA, Lepper PA (2010) Wind turbines and bat mortality: Doppler shift profiles and ultrasonic bat-like pulse reflection from moving turbine blades. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128:2238-2245. <https://doi.org/10.1121/1.3479540>
- Loss SR, Will T, Marra PP (2013) Estimates of bird collision mortality at wind facilities in the contiguous United States. *Biological Conservation*, 168:201-209. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.10.007>
- Mamat R, Sani MSM, Sudhakar KJSOTTE (2019) Renewable energy in Southeast Asia: Policies and recommendations. *Science of the Total Environment*, 670:1095-1102. <https://doi.org/10.1016/j.scotot.2016.12.003>
- Martin CM, Arnett EB, Stevens RD, Wallace MC (2017) Reducing bat fatalities at wind facilities while improving the economic efficiency of operational mitigation. *Journal of Mammalogy*, 98:378-385. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyx005>
- Millon L, Colin C, Brescia F, Kerbirou C (2018) Wind turbines impact bat activity, leading to high losses of habitat use in a biodiversity hotspot. *Ecological Engineering*, 112:51-54. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.024>
- Millon L, Julien JF, Julliard R, Kerbirou C (2015) Bat activity in intensively farmed landscapes with wind turbines and offset measures. *Ecological Engineering*, 75:250-257. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.050>
- Minderman J, Gills MH, Daly HF, Park KJ (2017) Landscape-scale effects of single and multiple small wind turbines on bat activity. *Animal Conservation*, 20:455-462. <https://doi.org/10.1111/acv.12331>
- Minderman J, Pendlebury CJ, Pearce-Higgins JW, Park KJ (2012) Experimental evidence for the effect of small wind turbine proximity and operation on bird and bat activity. *Plos One*, 7:e41177. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041177>
- Müller J, Blandl R, Buchner J, Pretzsch H, Seifert S, Strätz C, Veith M, Fenton B (2013) From ground to above canopy - bat activity in mature forests is driven by vegetation density and height. *Forest Ecology and Management*, 306:179-184. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.043>
- NEDO (2008) 風力発電導入ガイドブック. 東京, <https://www.nedo.go.jp/content/100079735.pdf>, 2022年3月25日確認
- NEDO (2013) 再生可能エネルギー技術白書 第2版再生可能エネルギー普及拡大にむけて克服すべき課題と処方箋, 森北出版株式会社. 東京
- 根室振興局 (2020) 根室振興局の概要, [https://www.nemuro.pref.hokkaido.lg.jp/fs/2/2/3/9/6/3/4/\\_/2020gaiyou.pdf](https://www.nemuro.pref.hokkaido.lg.jp/fs/2/2/3/9/6/3/4/_/2020gaiyou.pdf), 2021年11月28日確認
- Newson SE, Evans HE, Gillings S, Jarrett D, Raynor R, Wilson MW (2017) Large-scale citizen science improves assessment of risk posed by wind farms to bats in southern Scotland. *Biological Conservation*, 215:61-71. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.09.004>
- Nunez S, Arets E, Alkemade R, Verwer C, Leemans R (2019) Assessing the impacts of climate change on biodiversity: is below 2°C enough? *Climatic Change*, 154:351-365. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02420-x>
- O'Donnell CFJ (2000) Influence of season, habitat, temperature, and invertebrate availability on nocturnal

- activity of the New Zealand long-tailed bat (*Chalinolobus tuberculatus*). *New Zealand Journal of Zoology*, 27:207-221. <https://doi.org/10.1080/03014223.2000.9518228>
- Oerlemans S, Sijtsma P, López M (2007) Location and quantification of noise sources on a wind turbine. *Journal of Sound and Vibration*, 229:869-883. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.07.032>
- Ohdachi, DS, Ishibashi Y, Iwasa MA, Saitoh T (2015) *The Wild Mammals of Japan*, second edition. Shokadoh Book Sellers, Kyoto
- O'Shea TJ, Cryan PM, Hayman DTS, Plowright RK, Streicker DG (2016) Multiple mortality events in bats: a global review. *Mammal Review*, 46:175-190. <https://doi.org/10.1111/mam.12064>
- Parsons KN, Jones G, Greenaway F (2003) Swarming activity of temperate zone microchiropteran bats: Effects of season, time of night and weather conditions. *Journal of Zoology*, 261:257-264. <https://doi.org/10.1017/S0952836903004199>
- Polinder H (2011) Overview of and trends in wind turbine generator systems. 2011 IEEE power and energy society general meeting, 1-8. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039342>
- R Core Team (2021) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.R-project.org/>
- Richardson SM, Lintott PR, Hosken DJ, Economou T, Mathews F (2021) Peaks in bat activity at turbines and the implications for mitigating the impact of wind energy developments on bats. *Scientific Reports*, 11:1-6. <https://doi.org/10.25377/sussex.13606802>
- Roeleke M, Blohm T, Kramer-Schadt S, Yovel Y, Voigt CC (2016) Habitat use of bats in relation to wind turbines revealed by GPS tracking. *Scientific Reports*, 6:1-9. <https://doi.org/10.1038/srep28961>
- Roeleke M, Teige T, Hoffmeister U, Klingler F, Voigt CC (2018) Aerial-hawking bats adjust their use of space to the lunar cycle. *Movement Ecology*, 6:1-10. <https://doi.org/10.1186/s40462-018-0131-7>
- Roemer C, Disca T, Coulon A, Bas Y (2017) Bat flight height monitored from wind masts predicts mortality risk at wind farms. *Biological Conservation*, 215:116-122. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.09.002>
- Rydell J, Bach L, Dubourg-Savage M, Green M, Rodrigues L, Hedenstrom A (2010) Bat mortality at wind turbines in northwestern Europe. *Acta Chiropterologica*, 12:261-274. <https://doi.org/10.3161/150811010X537846>
- 佐藤 雅彦, 村山 良子, 佐藤 里恵, 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
- Schaub A, Ostwald J, Siemers BM (2008) Foraging bats avoid noise. *The Journal of Experimental Biology*, 211:3174-3180. <https://doi.org/10.1242/jeb.022863>
- Singh RK, Ahmed MR (2013) Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications. *Renewable Energy*, 50:812-819. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.021>
- Smallwood KS (2013) Comparing Bird and bat fatality-rate estimates among North American wind-energy projects. *Wildlife Society Bulletin*, 37:19-33. <https://doi.org/10.1002/wsb.260>
- Smallwood KS (2020) USA wind energy-caused bat fatalities increase with shorter fatality search intervals. *Diversity*, 12:98. <https://doi.org/10.3390/d12030098>
- The Carbon Trust (2008) Small-scale wind energy Policy insights and practical guidance. <https://prod-drupal-files.storage.googleapis.com/documents/resource/public/Small-Scale%20Wind%20Energy%20-%20Policy%20Insights%20and%20Practical%20Guidance%20-%20REPORT.pdf>, 2022年4月4日確認
- Threlfall C, Law B, Penman T, Banks PB (2011) Ecological processes in urban landscapes: mechanisms influencing the distribution and activity of insectivorous bats. *Ecography*, 34:814-826. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2010.06939.x>
- Vasko V, Blomberg AS, Vesterinen EJ, Suominen KM, Ruokolainen L, Brommer JE, Norrdahl K, Niemela P, Laine VN, Selonen V, Santangeli A, Lilley TM (2020) Within-season changes in habitat use of forest-dwelling boreal bats. *Ecology and Evolution*, 10:4164-4174. <https://doi.org/10.1002/ece3.6253>
- Verboom B, Huitema H (1997) The importance of linear landscape elements for the Pipistrelle *Pipistrellus pipistrellus* and the Serotine bat *Eptesicus serotinus*. *Landscape Ecology*, 12:117-125. <https://doi.org/10.1007/BF02698211>
- Voigt CC, Russo D, Runkel V, Goerlitz HR (2021) Limitations of acoustic monitoring at wind turbines to evaluate fatality risk of bats. *Mammal Review*, 51:559-570. <https://doi.org/10.1111/mam.12248>
- Wakiyama T, Kuriyama A (2018) Assessment of renewable energy expansion potential and its implications on reforming Japan's electricity system. *Energy Policy*, 115:302-316. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.024>
- Weaver SP, Hein CD, Simpson TR, Evans JW, Castro-Arellano I (2020) Ultrasonic acoustic deterrents significantly reduce bat fatalities at wind turbines. *Global Ecology and Conservation*, 24:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01099>
- Weiskopf SR, Rubenstein MA, Crozier LG, Gaichas S, Griffis R, Halofsky JE, Hyde KJW, Morelli TL, Morissette JT, Muñoz RC, Pershing AJ, Peterson DL, Poudel R, Staudinger MD, Sutton-Grier AE, Thompson L, Vose J, Weltzin JF, Whyte KP (2020) Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of the Total Environment*, 733:137782. <https://doi.org/10.1016/j>

scitotenv.2020.137782

Wilkinson GS, South JM (2002) Life history, ecology and longevity in bats. *Aging Cell*, 1:124-131. <https://doi.org/10.1046/j.1474-9728.2002.00020.x>

Wolbert SJ, Znellner AS, Whidden HP (2014) Bat activity, insect biomass, and temperature along an elevational gradient. *Northeastern Naturalist*, 21:72-85. <https://doi.org/10.1656/045.021.0106>

World Wind Energy Association (2017) 2017 Small wind world report summary. [http://small-wind.org/wp-content/uploads/2014/03/2014\\_SWWR\\_summary\\_web.pdf](http://small-wind.org/wp-content/uploads/2014/03/2014_SWWR_summary_web.pdf), 2021年12月14日確認

## 付 録

付録1 表1. 調査期間中にそれぞれの調査地で収集した各コウモリ属の活動量と調査終了日。処理区は小型風車から5 m以内、対照区は小型風車から100 m以上離れた地点を示す。調査期間は2020年8月13日～2020年8月26日までとしたが、環境音を多く収集してしまった等によりいくつかの調査地点で調査終了日より前にバッテリーが終了してしまった地点が存在した。処理区とは、風車から5 m地点、対照区は風車から100 m以上の地点を示す。

<https://doi.org/10.57345/data.hozen.21304923>