

研究論文

風力発電施設が鳥類に及ぼす影響

中 津 弘

はじめに

太陽光やバイオマスなどとともに「脱温暖化社会を実現するため」に導入促進が求められている（環境省 2005）風力エネルギーの利用は、日本国内で近年急増しており、1994年から2004年にかけての10年間で導入量は180倍以上、風車の導入基数は39倍となり、導入量の約80%を北海道・東北・九州が占める（経済産業省 2006）。

風力発電施設が鳥類に悪影響を与えることがあるという事実は、最近北海道の風力発電所で発生したいくつかのオジロワシ *Haliaeetus albicilla* の衝突事故の報告（たとえば、永井 2005）までは国内で認識されておらず、現在でも広くは知られていないようである。日本よりはるかに早くから風力発電が大量に導入されてきたアメリカでは、1980年代にすでに猛禽類の衝突死が問題となっていた。最近、アメリカのアルタモントパス風力資源地域での猛禽類の衝突事故についての詳細な報告書が完成し（Smallwood and Thelander 2004）、この地域で年間100羽前後のイヌワシ *Aquila chrysaetos* が衝突死を遂げるとしている文章を簡単にダウンロードできるようになっているのだが、なかなか日本では引用されていない。また、BirdLife（2002）による優れた文献レビューも、読んでいる関係者は多くないようである。

日本の事業者や行政機関、環境コンサルタント会社、市民にとって、風力発電と鳥類の関係についての情報収集を難しくする要因として、簡単に入手できる、ある程度まとまった日本語の総説が存在しないことが挙げられるだろう。本稿はこうした観点から、さまざまな主体に風力発電と鳥類の関係について多くの情報を提供し、議論の材料として活用できるよう、国内外の情報を紹介する日本語の総説として構成した。まず、風力発電所が鳥類に及ぼす影響について、主に海外の事例を紹介する。続いて、今後の国内での風力発電所建設前から建設後モニタリングでの調査方法を検討する参考とすべく、やはり海外の事例を材料に調査方法のあり方について論じる。最後に、影響を緩和するための方策について、簡単にではあるが記す。なお、本稿では風力発電と鳥類の関係についての調査結果、手法、議論に話題を絞って筆を進める。

鳥類への影響のタイプ

BirdLife（2002）によると、風力発電施設が鳥類に及ぼす影響として大別して3タイプが存在する：

- ・ 移動への障壁を含め、鳥類の置き換えや排除につながる攪乱（ディスターブ）
- ・ 衝突死（バードストライク）
- ・ 風車と関連インフラの建設による、生息地の直接的消失

以下では、これら3タイプの影響について、既往の調査・実験事例を紹介する。

1) 攪乱

風力発電所による攪乱が発生した場合、敏感な種では風力発電所近辺で個体数が減少し、あるいは姿を消すという、種の置き換えが起こる可能性がある。言い換えると、攪乱に敏感な鳥類が風力発電所近辺の生息地を忌避するということである。各地での調査事例をレビューした BirdLife (2002) は、風車から 600m までの範囲で攪乱が発生するとしている。

Leddy et al. (1999) は、アメリカ・ミネソタ州のバッファローリッジ風力資源地域で草地の鳥類を対象にセンサス調査を行い、風車に近い場所ほど個体数密度が有意に低くなったと報告している。中津 (2004b) は、京都府丹後半島の太鼓山風力発電所近辺で、森林性の鳥類を対象に風車の稼働開始直後 2 繁殖期のセンサスを行ったが、特に 2 回目の繁殖期では出現種数・個体数とも風車から近い場所ほど有意に少なくなるという結果を得た。Kerlinger (1998) はアメリカ・バーモント州の風力発電所近辺で風車の稼働前後に森林の鳥類をセンサス調査したが、そこでは稼働後に林内種の減少と林縁種の増加という現象が起こっていた。

大型鳥類でも類似した結果がいくつか得られている。デンマークで調査を行った Larsen and Madsen (2000) は、コザクラバシガン *Anser brachyrhynchus* が風車付近の草地を忌避して採餌するという結果を報告している。Usgaard et al. (1997) は、バッファローリッジ風力資源地域の風力発電事業地の既設部分と、改変されていない将来的な予定地で猛禽類を調査した。予定地での営巣密度は 5.94 巣/100km² だったが、既設部分 32km² では利用されている巣が全く見つからなかったという。

渡り鳥や、餌場と巣やねぐらの間で長距離移動を行う水鳥などにとっては、風力発電所を忌避して移動する場合は、迂回飛行にともなうエネルギー消耗の増加、あるいは餌場などの放棄といった影響が考えられる。

攪乱の影響は、単に風力発電所近辺での鳥類の種数・個体数の減少を意味するわけではない。たとえば小鳥類が風力発電所近辺で減少した場合、小鳥類による捕食圧の低下から、昆虫類が大発生するかもしれない。小鳥類を餌とする猛禽類も、間接的に攪乱の影響を受けて密度低下をみるかもしれない。

ただし、全ての風力発電所が同じように鳥類に対して攪乱の影響を及ぼすとは限らない。影響は種、地域、時期に依存して変わってくるとされ (BirdLife 2002)、おそらく風力発電所自体の管理パターンによっても違うだろう。たとえば、Meek et al. (1993) は、イギリス・スコットランド地方の風力発電所の着工前から稼働後の計 9 年間で、風力発電所近辺の湿地の鳥類調査を行っているが、工事の影響を受けて減少したアビ *Gavia stellata* 以外の鳥類では大きな個体数変動はなかったという。Lucas et al. (2005) はスペイン北西部のマルピカで、風力発電所の建設前、建設工事期間中、稼働後の計 3 年間でデータを収集したが、センサスによって観察された鳥類の密度に年較差がなかったこと、また、風車付近の調査区と風力発電所から 6km 離れた参照区でもほとんど違いがなかったことを報告している。Johnson et al. (2003) は、アメリカ・オレゴン州の風力発電所の完成直後に風車から 4.8km 以内で確認されていた猛禽類の巣 5 つを風車稼働後の翌年に調査している。3 巣の利用は確認できなかったが、2 巣の利用 (風車から 4km で営巣するアカオノスリ *Buteo jamaicensis* と同 400m で営巣するアレチノスリ *Buteo swainsonii* を観察している。中津 (2004b)

の太鼓山風力発電所での調査でも、クマタカ *Spizaetus nipalensis* が風力発電所の攪乱の影響を受けていると考えられるデータは得られなかった。

今後さらなる調査が必要だが、多くの事例では、特に猛禽類の採餌行動が風力発電所から受ける攪乱の影響は無視できる程度とされる Madders and Whitefield (2006)。また、風力発電所が特定の生態を持った種にむしろ好んで利用されるケースも考えられる。たとえば、多くの衝突死が発生する場所は、トビ *Milvus migrans* のように動物死体をあさる鳥類（スカベンジャー）にとって餌場として魅力的である。

風力発電所が鳥類に及ぼす攪乱は、建設工事や保守点検の際の作業機械・車両、作業員の出入り、あるいは風車から発生する騒音・振動や視覚的な要素から起こりうるとは考えられるが、詳細はまだ分かっていない。攪乱のメカニズムが突き止められれば、影響を緩和する手法を具体的に模索できるだろう。

2) 衝突死

＜衝突死の調査事例＞

鳥類の衝突死は、風車のブレードや風況ポール、送電線、ワイヤー類などで発生する事故であり、数多くの事例が存在する。海外での衝突死の調査事例のいくつかを表1に示した。アメリカのカリフォルニア州にあるアルタモントパス風力資源地域は、最も多くの衝突死が報告されている場所のひとつである。Smallwood and Thelander (2004) は、アルタモントパス風力資源地域で多くの衝突死を遂げる猛禽類として、イヌワシをはじめとして、アカオノスリ、アメリカチョウゲンボウ *Falco sparverius*、アナホリフクロウ *Athene cunicularia*などを挙げている。スペイン南部のタリファでは、シロエリハゲワシ *Gyps fulvus* とチョウゲンボウ *Falco tinnunculus* で多くの衝突死が発生している。特に大型鳥類での問題は、たとえわずかであっても、風力発電所での死亡事故が地域個体群の存続にとって障害となる点である。大型猛禽類は性成熟に年月を要し、長期間をかけて少ない数の幼鳥を育てる (Newton 1979)。加えて、栄養段階が高いために限られた個体数しか生息し得ない捕食者である。

これまで調査のなされてきた風力発電所の大多数で、衝突死の発生数は小規模である (BirdLife 2002)。また、衝突事故が多く発生する風車とそうでない風車が存在することもたびたび指摘されてきた (たとえば、Smallwood and Thelander 2004 ; Barrios and Rodriguez 2004)。これらの事実から、風力発電所の建設地、風車のデザインや配置、地形、管理形態などが衝突死に影響を及ぼしていると解釈できるし、事故が起こりにくい風力利用のパターンを採用すれば衝突死を減らせるという可能性がある。

＜衝突に至るプロセス＞

風力発電所における鳥類の衝突死には、鳥類が風車のブレード回転面などに突入する局面だけでなく、事故発生へ至るプロセスで複合的な要因（遠因）が含まれている。猛禽類を切り口に、衝突事故に結びつくプロセスを議論する。

風力発電所における鳥類の衝突死は、鳥類が風車に接近しない限り発生しない。Madders and Whitefield (2006) は、風力発電所による攪乱と衝突は空間的に互いに排他的な要素であるとしている。彼らの議論はやや単純すぎるが、攪乱強度が高いときに風車への接近が少なくなり、攪乱の程度が弱いときには風車への接近が増加し、衝突リスクが高まる可能

性があるのは事実であろう。すでに紹介したように、彼らは、風力発電所が猛禽類の採餌行動に及ぼす攪乱の影響は多くの場合無視できるとしたが、それならば猛禽類が風車へ接近し衝突する可能性は排除できないであろう。

状況によっては風車が猛禽類を惹きつける。Smallwood and Thelander (2004) は、アルタモントパス風力資源地域での調査から、猛禽類が風車を危険なものであると認識しているようだが、風車から数十 m の範囲内で行動することが多いとしている。彼らは、風力発電所の造成や建設などの環境改変が、猛禽類の餌動物に生息場所を供給したこと、餌動物の多さと猛禽類の衝突死が関わっていることを指摘している。狩りの最中で餌動物に注意を奪われた猛禽類は回転するブレードに気づかずに接近してしまう危険性がある。生きた動物を狩る種だけでなく、事故死体を食べるために風力発電所に飛来するスカベンジャーも衝突死を遂げるかもしれない。

他に、風車に取り付けた点滅灯も、特に夜間に渡りをする鳥類を誘引する可能性がある。風車や付随施設が休息や採餌のための止まり場を提供する場合にも、鳥類は風力発電所に誘引されるかもしれない。

タリファでは、上昇気流が乏しい時期に弱い斜面気流を使って上昇しようとしたシロエリハゲワシの風車に接近する頻度が高くなり、山地に設置された特定の風車の列で事故が多く発生している (Barrios and Rodriguez 2004)。

このようにして風車に接近した鳥類は、ブレードを回避できないのだろうか。数十 m の距離に接近した鳥類の視覚には回転する風車のブレードが外側ほど「通過できる透明の空間」に見えられている。アメリカチョウゲンボウの視覚を利用して Hodos *et al.* (2001) が行った実験では、回転する風車に接近するにつれて、網膜上でのブレードの像の回転角速度が処理され得る許容範囲を上回ることが分かった。この現象は「モーション・スメア」

(motion smear) と呼ばれる。この段階に達すると、視力では回転するブレードの存在を知覚できなくなり、鳥類がブレードを回避する行動をとる可能性は低くなる。風車への接近にともなってモーション・スメアが発生する場合、ブレードを回避するには聴覚が役立つかもしれない。しかし、鳥類は一般に信じられているほど優れた聴力を持っておらず、通常の鳥類の聴力では、通常の聴力を持った人間がブレードの回転音を聞くことができる半分の距離まで接近しなければブレードの音を知覚できないという (Dooling 2002)。周囲の騒音の程度にもよるが、ブレードの回転音が耳に届かない場合、ブレードを回避するには手遅れの距離にまで接近する可能性が高くなる。

筆者の意見であるが、回転するブレードと突入する鳥類は衝突事故発生「至近要因」に過ぎず、「究極要因」は鳥類の衝突が発生しうる場所やタイミング、パターンでの風車の稼働ではないだろうか。

3) 生息地の消失

風力発電所の建設にともなって消失する生息地の規模はさまざまである。湿地などの水流が変わると、より広い範囲で影響が出るかもしれないし、比較的狭い範囲で多くの海鳥に餌を供給する浅瀬での洋上風力発電所は大きな問題となるかもしれない (Drewitt and Langston 2006)。移動力の乏しい鳥類や、十分な飛行・歩行能力を持たない幼鳥は、アクセス道路などによる分断に敏感かもしれない。衝突死に議論が集中する傾向があるが、生息地の消失は元来の生息環境を利用してきた生物を物理的に排除してしまうことになる。生

表1： 海外の風力発電所での鳥類の衝突死調査事例

地名・発電所名	風力発電所の概要	衝突調査の概要	出典
Altamont Pass (カリフォルニア)	内陸の草地・牧草地に5000基以上稼働。	イヌワシ75-116羽、アカオノスリ209-300羽、アメリカチョウゲンボウ73-333羽、アナホリフクロウ99-380羽/年を推定(補正あり)。猛禽類881-1300羽/年、鳥類全体で1766-4721羽/年を推定(同)。	Smallwood and Thelander (2004)
Buffalo Ridge (ミネソタ)	草地・農地・林の混在する内陸部に小・中型風車354基稼働。	3-11月に調査、鳥類全体で0.98-4.45羽/基を推定(補正あり)。	Johnson <i>et al.</i> (2002)
Foote Creek Rim (ワイオミング)	草地が主体の内陸部の台地に中型風車69基稼働(調査対象分)。	37種122羽の死体発見、92%がスズメ目。鳥類全体で103羽/年、1.5羽/基/年を推定(ともに補正あり)。	Young <i>et al.</i> (2003a)
Klondike Phase 1 Wind Project (オレゴン)	草地・林の混在する内陸部に大型風車16基稼働。	1年間でカナダガン2羽を含む7種8羽の死体。鳥類全体で1.42羽/基/年を推定(補正あり)。	Johnson <i>et al.</i> (2003)
National Wind Technology Center (コロラド)	林が点在する内陸部の草地(稼働風車数は不明)。	1年間で4種4死体発見、猛禽類死体発見なし。鳥類全体で24羽/年を推定(補正あり)。	Schmidt <i>et al.</i> (2003)
Nine Canyon (ワシントン)	内陸部の草地・ステップ、農地に大型風車37基稼働。	発見された死体の約半数はハマヒバリ。鳥類全体で133羽/年、3.59羽/基/年を推定(ともに補正あり)。	Erickson <i>et al.</i> (2003)
Searsburg (バーモント)	山地の森林地帯に中型風車11基稼働。	死体発見なし。	Kerlinger (1998)
Tehachapi Pass (カリフォルニア)	山地に約3300基稼働。	約1.5年で27種127羽の死体発見。うち44羽がアカオノスリ、アメリカチョウゲンボウなどの猛禽類。猛禽類で0.047羽/基/年を推定(補正なし)。	Anderson <i>et al.</i> (2004)
Top of Iowa (アイオワ)	湿地・草地・樹林地の混在する内陸部に中型風車89基稼働。	4-12月で鳥類全体で10.8羽を推定(補正あり)。	Koford (2004)
Kreekrak (オランダ)	海岸部に小型風車5基稼働。	1年間でマガモ、ミヤコドリ、セグロカモメなど17種26羽の死体発見(補正なし)。	Musters <i>et al.</i> (1996)
Burgar Hill (イギリス)	湿地に小型2基、大型1基稼働。	9年間でユリカモメ3羽、ハヤブサ1羽の死体発見(補正なし)。	Meek <i>et al.</i> (1993)
E3, Tarifa (スペイン)	沿岸部の山地に66基稼働。	シロエリハゲワシ2羽/年、鳥類全体で0.03羽/基/年を推定(補正あり)。	Barrios and Rodriguez (2004)
PESUR, Tarifa (スペイン)	沿岸部の山地に190基稼働。	シロエリハゲワシ28羽/年、チョウゲンボウ36羽/年など、鳥類全体で0.36羽/基/年を推定(補正あり)。	Barrios and Rodriguez (2004)

- ・「補正」の有無は、衝突死数推定にあたってバイアス要素についての補正を行ったか否かを示す。
- ・可能な限り文献から「衝突死数/年」「衝突死数/基/年」を引き出し、表示形式を標準化した。
- ・()内は、国名もしくは州名(アメリカの場合)。

物種に絶滅の危険をもたらす最大の脅威は、生息地の消滅や劣化、分断、細分化などである(Reid and Miller 1989)。付け加えると、少なくとも生息地の消失という点では、風力発電施設は他の生物種にとっても大きなインパクトを与えうる。

影響を評価し、予測する

日本の環境影響評価法(1997年に制定)では、風力発電事業は環境アセスメント実施が

義務づけられる事業ではない。一部の自治体で風力発電事業に環境アセスメント実施を義務づけているものの、個別の風力発電所建設にともなって改変される環境の事前・事後の調査、長期モニタリング調査が各地でなされるには今後の法整備や事業者の方針によるところが大きいのが現状である。しかし、風力発電施設が鳥類にどのような影響を与えるか、国内では系統だった調査がなされておらず、データが不足している（古南 2004；中津 2004a）。したがって正確な影響予測は困難である。すでに建設されている施設でデータ収集を行う必要がある。これらの調査は公的機関や事業者に限らず、ある程度は地域のナチュラリストや研究者によって行われることが可能であり、より多くの主体によって調査が実施されることが望ましいであろう。

本項では、風力発電所建設に際して、研究者や地域のナチュラリストの実施する小規模の調査や事業者が実施する小中規模の調査、あるいは将来的に事前・事後の比較的大規模な調査が可能なケースを想定して、調査の方法や方向性について議論する。

1) 調査のデザイン

調査は、主に以下のような点を考慮して実施すべきであろう。

- ・衝突事故や攪乱について、どの鳥類種が脆弱・敏感であるか、特に攪乱に関しては、どのような鳥類群集が敏感であるか
- ・どのような地形、気象、時期の条件下で衝突事故が発生するか
- ・どのような風車・管理形態で衝突事故・攪乱が発生するか
- ・衝突事故や攪乱には、どのような要因が関わっているか
- ・どのような手法で影響が予測され、緩和できるか

特に風力発電所が鳥類に大きな影響を及ぼすことが判明した場合、地域個体群の存続にとってどのようなインパクトを与えるのか、検証する必要性がある。

実施される風力発電事業の影響を正確に知るには、BACI (Before-After, Control-Impact) 方式による調査が最適であるとされる (Anderson et al. 1999)。風力発電所の工事や稼働の前段階と後段階でデータを比較し、また、風力発電所付近でのデータと「同等の」環境からなるが風力発電所の影響を受けていないと考えられる参照区(もしくはコントロール区)のデータを比較して、風力発電所が稼働している条件で上述してきた攪乱や事故が発生しているのか検証するという手法である。

また、調査期間についても考慮する必要がある。たとえば風力発電所のもたらす攪乱の効果に鳥類が徐々に馴れていった場合、稼働開始後年数を経るにつれて衝突死が増加する可能性がある。このようなケースでは、1 年間のみの調査では影響を正確に知ることはできない。また、衝突死は偶然の要素を多く含んでおり、調査期間が短いとデータ量自体が安定しない危険性がある。衝突死数が「偶然に少ない年」あるいは「偶然に多い年」のみの調査では不十分である。Smallwood and Thelander (2004) は、信頼できる衝突死のデータを得るためには少なくとも 3 年間の調査が必要であるとしている。

稼働中の風力発電所が鳥類に及ぼす影響を把握するために、(1)衝突死の調査、(2)特に衝突死の可能性と個体群の敏感さが考えられる鳥類を対象として、リスク行動を定量化するような行動観察、(3)攪乱の影響を受ける可能性がある鳥類の分布パターンを調べる個体数センサスの 3 項目の調査は必要であろう。

風力発電施設での衝突死数の表記は複数ある。施設全体で合計した衝突死数は、地域に

おける鳥類への影響の評価基準として重要である。風車1基あたりの衝突死数換算は、鳥類への負の影響を緩和していくうえで、衝突死の多い風車や地形などを抽出して考慮していく際に有用である。容量やローター回転面積あたりの換算では、環境負荷と発電効率を定量的に評価していく場合などに使えるだろう。たとえば、風車1基あたりでの衝突死数が少なくても稼働基数が大きい場合は地域の鳥類に大きな影響を与えている可能性がある。目的に合わせて明確に数値を表記していく必要がある。

今後調査で活用できる技術として、レーダー、赤外線ビデオカメラを利用した TADS (Thermal Animal Detection Systems) などが考えられる。レーダーは計画段階から風車稼働後まで、さまざまな条件で鳥類の移動を捕捉でき、特に渡り鳥の受ける影響の予測や攪乱の実態を把握することに利用できるかもしれない。TADS は衝突死の発生状況を監視する際に有効であろう。衝突死が発生する場合、他の影響緩和策の検討・実施とともに地域個体群の存続可能性について数理モデルを利用して定量化していく必要がある。

2) 評価・予測の難しさ

陸域の風力発電施設が、道路やダム建設といった他の環境改変行為と質的に異なる点が2つある。まず、(1)単なる生息環境の改変にとどまらず風車への衝突リスクの追加という明確な負の要素を持っていること、そして(2)潜在的な生息環境・採餌環境として鳥類を惹きつける空間が風力発電所内に局所的に創造される場合があること、である。

衝突リスクの追加について、どのように事前に影響予測ができるか議論がなされていない。たとえば猛禽類の場合、従来多くなされてきた環境改変行為に先立っての調査と、高利用域の抽出や行動圏の内部構造の解析(環境庁自然保護局野生生物課 1996) 結果をうけて、利用頻度の低い、行動圏の周辺部分に風力発電所を建設すれば影響がないと即断できるわけではない。

現状の土地利用が樹林地である計画地に風力発電所を建設した場合、個別の風車の建設地点、メンテナンスのためのアクセス道路は帯状もしくは面的に造成され、その付近には舗装がなされなければ裸地もしくは草地が形成されるであろう。裸地や草地は、たとえば猛禽類を誘引する新たな餌場となるかもしれない。開けた環境で狩りを行うことが多いノスリ *Buteo buteo* やイヌワシ、チョウゲンボウにとっては、ハタネズミ *Microtus montebelli* やヘビ類、バッタ類が生息する魅力的な餌場となる可能性がある。造成によって草地・裸地と樹林地の境界部分が発生すると、草本を求めて林内から出てきたノウサギ *Lepus brachyurus* などを狙って、オオタカ *Accipiter gentilis* やクマタカが飛来するかもしれない。また、傾斜地を造成して風車のタワーを建てるために切り取られた法面^{のりめん}には、やはり猛禽類の餌動物となるアカネズミ *Apodemus speciosus* やモグラ類などの巣穴・坑道ができる可能性がある。

3) 衝突死体探索におけるバイアスの補正

通常の調査では、探索できる死体が全ての衝突死を反映するわけではない。単純な風車付近の巡回と探索では、調査結果にバイアス(この場合は過小評価)を含むことになる。衝突死体の探索におけるバイアスの補正について述べる。

トビやハシブトガラス *Corvus macrorhynchos*、タヌキ *Nyctereutes procyonoides* のような死肉をあさるスカベンジャーによる持ち去り(あるいは摂食)は衝突死体を目につかなくさせてしまう。Koford (2004) は、2日間で実験死体の7-12%がスカベンジャーに持ち去られたとしている。実験的に野外に置いた死体がスカベンジャーに持ち去られるまで残存する平均

期間として、Anderson *et al.* (2004) は 2.62 日間、Johnson *et al.* (2002) は 7.01 日間、Young *et al.* (2003a) は 29 日間を報告している。また、捕捉率の問題も常に存在する。見落としが発生するため、調査範囲に落ちている死体の全てが発見できるわけではない。野外で調査員を使った実験で得られた捕捉率の数値として、Anderson *et al.* (2004) は 73%、Johnson *et al.* (2002) は 38.7%、Young *et al.* (2003a) は 80%を報告している。

これらのバイアスを補正して、風力発電所での推定衝突死数 m を算出するために、特にアメリカの調査では以下の方程式が利用される：

$$m = (N \times I \times C) \div (k \times t \times p)$$

ここで、 N は風車の合計基数、 I は探索の間隔（日数）、 C は調査期間中に発見された衝突死体の合計、 k は探索を行った風車の基数、 t は死体がスカベンジャーに持ち去られず残った平均日数、 p は捕捉率である。衝突死体の探索自体とは別に風力発電所で実験を行って、実験死体が持ち去られるまでにどれくらいの日数を要するか、調査員の捕捉率はどの程度か調べ、 t と p を算出する。季節や死体の体サイズによっても持ち去り率や捕捉率は変わってくるから、さまざまな条件で実験を行う。風力発電施設での衝突死をより正確に評価するためには、このような実験を利用した衝突死数の推定が必要である。

また、衝突死数をより正確に把握するためには、探索を行う範囲も重要である。衝突死を遂げた鳥類の死体が分布する範囲の一部でしか調査を行っていない場合、衝突死数は過小評価になる。ローター径が 50m 前後のサイズの風車からなる風力発電所を調査した事例を挙げると、Johnson *et al.* (2003) は衝突死体が発見される位置が風車から平均 31m、Young *et al.* (2003a) は平均 37.7m としている。旧型の小さな風車を多く含むアルタモントパス風力資源地域で調査を行った Smallwood and Thelander (2004) は風車を中心とした半径 100m の範囲に、調査で発見された死体の 94%が含まれるとしている。

ミティゲーション方策

環境改変による影響を緩和する方策（ミティゲーション方策）は、「環境への影響を回避し、低減し、必要に応じて代償措置を行い、環境保全の目標を達成しようとするものである」（森本・亀山編 2001）。風力発電所の計画、建設、管理についても、個々の種の地域個体群を維持し、生物多様性を保全していくうえで、ミティゲーション方策を検討する必要性がある。

1) 建設地選択

ミティゲーション概念には「回避」が含まれる。生態的・社会的に改変すべきでない生息地を計画から外すことであり、いわゆる「ゼロ案」である。BirdLife (2002) は、風力発電の影響を緩和するうえで建設地選択（site selection）が最も重要であるとしている。地域に生息する鳥類では行動圏内、渡り鳥では移動ルート上での風力発電所建設を回避すれば、これらの鳥類への影響が小さくなるであろう。すでに述べたように現段階では国内に計画された風力発電所が鳥類に及ぼす影響の予測が困難であり、限られた情報のなかで影響の少ない風力エネルギー利用を行うのであれば、可能な限り慎重に建設地選択を行うべきである。当然ながら、これまで述べてきた負の影響は、風力発電所の建設自体を行わない場合に最小となる。

希少種の保全に関しては、いわゆるアボイドマップを活用していく必要がある。たとえば環境省は「希少猛禽類調査（イヌワシ・クマタカ）の結果について」（2004年8月報道発表資料）の中で、イヌワシ・クマタカの生息が確認された地域を発表している。これらのデータは詳細なものではないが、こういった資料を検討し、保全に配慮した建設地選択が求められる。また、その他の希少種や渡りのルートについても、情報を収集し、ミティゲーションに反映していく必要がある。

2) 順応的な管理

風力発電が鳥類に及ぼす影響を緩和するために、いくつかの方策が提唱されている。ただし、多くの有効性は野外で実証されていないし、あるミティゲーション方策が全ての風力発電所で同じような効力を発揮するとは限らないだろう。また、ミティゲーションを図る上で全ての素材や理論が発見され発表された訳ではなく、今後研究の余地がある。上記した建設地選択に合わせて、内外の最新の事例と地域の特性を考慮して、「順応的な管理」（たとえば、鷲谷 2001）を進めていくのがよりよい方法であろう。

これまでに提案されているミティゲーション方策のいくつかを紹介する。

風車のデザインには多くの提案がなされている。Hodos *et al.* (2001) はモーション・スミアを最小化するためにブレードに不均一な縞模様を塗装したり、ブレードの1枚を黒く、残り2枚を白く塗装したりする提案を行っており、Dooling (2002) は大きな風切り音を発生するブレードの使用で鳥類が衝突を回避できる可能性を示唆しているが、いずれも野外での実験は行われていない。風車による大きな騒音は攪乱の増加を意味するかもしれない。Tucker (1996a, b) は数学モデルから、ローター径が大きな可変速型の風車が安全であり、またローター中心部付近を大きく設計したほうが安全であろうとしたが、鳥類が風車を回避する場合や、逆に風車に惹きつけられる場合を考慮していない点は不十分であるとされる。その後も別の研究者によって違ったモデルが提案されている。紫外線 (UV) 反射素材を塗装したブレードは鳥類にとって視認性が高いのではないかという観点から、通常の塗装の風車と UV 塗装の風車で衝突死数が変わるかを調査したのが Young *et al.* (2003b) であるが、両者間に有意差はなかったという。アルタモントパス風力資源地域でイヌワシを追跡した Hunt (2002) は、低空を飛行して地上の餌動物を狩るイヌワシの生態を考えて、ブレード回転面の下端の地上高が高い風車がより安全である可能性を示唆している。また彼は、イヌワシが止まりやすい格子型タワーよりもチューブ型タワーが安全であろうとしている。風車の高さに関しては、Smallwood and Thelander (2004) も、アルタモントパス風力資源地域での調査から、現状では猛禽類の飛行高度と同程度の風車のローター回転面をより高く設計することを勧めている。

風車の配置についてもミティゲーションの議論がある。Drewitt and Langston (2006) は、風力発電所が渡りコース付近に建設される場合は、飛行コースに対して直角に広がらないように、大きな風力発電所では、クラスター（風車の塊）間に飛行できる回廊（コリドー）を設けることも重要としている。Smallwood and Thelander (2004) は、大小の風車を壁のように列状に並べた配置（wind wall）では視認性が高く衝突死が減少するだろうとしている。Hunt (2002) は逆に、風車と風車の間の距離を大きくとって、ブレード回転面の間を広くした方がイヌワシにとって風車の間をくぐり抜けやすいから安全であろうとしている。Smallwood and Thelander (2004) はさらに、鳥類の飛行を風車からそらす「フライト・ダ

イバーター」を提案している。彼らは調査から、列状もしくは塊状に配置された風車のうち最も外側にあるものが危険であったから、その外側の風車の前に、ローター回転面までの高さをもった柱状のダミー風車を使って衝突死を減らせるのではないかとしている。

また、他の環境改変と同様に風力発電施設でも、影響の少ない工法、工期を採用していく必要もある。

Smallwood and Thelander (2004) は、アルタモントパス風力資源地域での猛禽類の衝突死と餌動物の関連性から、餌動物を風車付近に誘引しないための方策をいくつか提言している。これらがそのまま他の地域で有効活用できるわけではないが、さまざまな要素が結びついて発生する衝突死を理解し、地域の実情に合わせて影響緩和を図るうえでは参考になるであろう。彼らの議論の中には、放牧ウシの排除さえも含まれている。彼らは、風車の近くに風や日差しを避けて集まる放牧ウシの糞が猛禽類の餌動物を間接的に惹きつけている可能性を指摘しているのである。

引用文献

- Anderson R, Morrison M, Sinclair K, and Strickland D. (1999) Studying wind energy/bird interactions: a guidance document. National Wind Coordinating Committee .
- Anderson R, Neumann N, Tom J, Erickson WP, Strickland MD, Bourassa M, Bay KJ, and Sernka KJ. (2004) Avian monitoring and risk assessment at the Tehachapi Pass Wind Resource Area. National Renewable Energy Laboratory. NREL/SR-500-36416.
- Barrios L and Rodriguez A. (2004) Behavioural and environmental correlates of soaring-bird mortality at on-shore wind turbines. *Journal of Applied Ecology* 41: 72-81.
- BirdLife. (2002) Windfarms and Birds: an analysis of the effects of windfarms on birds, and guidance on environmental assessment criteria and site selection issues. T-PVS/Inf.
- Dooling R. (2002) Avian hearing and the avoidance of wind turbines. National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-500-30844.
- Drewitt AL and Langston RHW. (2006) Assessing the impacts of wind farms on birds. *Ibis* 148: 29-42.
- Erickson W, Kronner K, and Gritski B. (2003) Nine Canyon Wind Power Project avian and bat monitoring report. prepared for Nine Canyon Technical Advisory Committee and Energy Northwest.
- Hodos W, Potocki A, Storm T, and Gaffney M. (2001) Reduction of motion smear to reduce avian collisions with wind turbines. *Proceedings of the National Avian-Wind Power Planning Meeting IV*. National Wind Coordinating Committee.
- Hunt G. (2002) Golden eagles in a perilous landscape: predicting the effects of mitigation for wind turbine blade-strike mortality. California Energy Commission. P500-02-043F.
- Johnson GD, Erickson WP, Strickland MD, Shepherd MF, Shepherd DA, and Sarappo SA. (2002) Collision mortality of local and migrant birds at a large-scale wind-power development on Buffalo Ridge, Minnesota. *Wildlife Society Bulletin* 30(3): 879-887.
- Johnson G, Erickson W, White J, and McKinney R. (2003) Avian and Bat Mortality During the First Year of Operation at the Klondike Phase 1 Wind Project, Sherman County, Oregon. prepared for Northwestern Wind Power.

- ・ 環境省 (2005)『環境白書 平成 17 年版』ぎょうせい
- ・ 環境庁自然保護局野生生物課 (1996)『猛禽類保護の進め方 (特にイヌワシ、クマタカ、オオタカについて)』日本鳥類保護連盟
- ・ 経済産業省 (2006)『エネルギー白書 2006 年版』(web 版 <http://www.enecho.meti.go.jp/>)
- ・ Kerlinger P. (1998) An assessment of the impacts of Green Mountain Power Corporation's Searsburg, Vermont, wind power facility on breeding and migrating birds. *proceedings of the National Avian-Wind Power Meeting III*.
- ・ Koford R. (2004) Avian mortality associated with the Top of Iowa Wind Farm. Progress report. Iowa Cooperative Fish and Wildlife Research Unit, Iowa State University.
- ・ 古南幸弘 (2004)「風力発電の鳥類に与える影響」タカの渡り全国集会 in 岐阜 2004 資料
- ・ Larsen JK and Madsen J. (2000) Effects of wind turbines and other physical elements on field utilization by pink-footed geese (*Anser brachyrhynchus*): a landscape perspective. *Landscape Ecology* 15: 755-764.
- ・ Leddy KL, Higgins KF, and Naugle DE. (1999) Effects of wind turbines on upland nesting birds in conservation reserve program grasslands. *Wilson Bulletin* 111: 100-104.
- ・ Lucas DL, Janss GFE, and Ferrer M. (2005) A bird and small mammal BACI and IG design studies in a wind farm in Malpica (Spain). *Biodiversity and Conservation* 14: 3289-3303.
- ・ Madders M and Whitefield DP. (2006) Upland raptors and the assessment of wind farm impacts. *Ibis* 148: 43-56.
- ・ Meek ER, Ribbands JB, Christer WG, Davy PR, and Higginson I. (1993) The effects of aero-generators on moorland bird populations in the Orkney Islands, Scotland. *Bird Study* 40: 140-143.
- ・ Musters CJM, Noordervliet MAW, and Ter Keurs WJ. (1996) Bird casualties caused by a wind energy project in an estuary. *Bird Study* 43:124-126.
- ・ 森本幸裕・亀山章編 (2001)『ミティゲーション 自然環境の保全・復元技術』ソフトサイエンス社
- ・ 永井真人 (2005)「地球に優しいって?」『Birder』2005 年 3 月号: 68-69、文一総合出版
- ・ 中津弘 (2004a)「風力発電が鳥類に及ぼす影響」社団法人大阪自然環境保全協会機関誌『都市と自然』2004 年 3 月号
- ・ 中津弘 (2004b)「丹後半島太鼓山風力発電所が鳥類に与える影響」日本鳥学会 2004 年度大会口頭発表
- ・ Newton I. (1979) *Population ecology of raptors*. T&AD Poyser.
- ・ Reid WV and Miller KR. (1989) *Keeping Options Alive: the Scientific Basis for Conserving Biodiversity*. World Resource Institute. (邦訳、藤倉良編訳、リード・ミラー (1994)『生物の保護はなぜ必要か』ダイヤモンド社)
- ・ Schmidt E, Piaggio AJ, Bock CE, and Armstrong DM. (2003) National Wind Technology Center site environmental assessment: bird and bat use and fatalities final report. NREL/S500-32981.
- ・ Smallwood KS and Thelander CG. (2004) Developing methods to reduce bird mortality in the Altamont Pass Wind Resource Area. prepared for California Energy Commission. P500-04-052.
- ・ Tucker VA. (1996a) A mathematical model of bird collisions with wind turbine rotors. *Journal of Solar Energy Engineering* 118: 253-262.
- ・ Tucker VA. (1996b) Using a collision model to design safer wind turbine rotors for birds. *Journal of Solar Energy Engineering* 118: 263-269.
- ・ Usgaard R, Naugle D, Osborn R, and Higgins KF. (1997) Effects of wind turbines on nesting raptors at Buffalo Ridge in Southwestern Minnesota. *Proceedings of the South Dakota Academy of Science* 76: 113-117.
- ・ 鷺谷いづみ (2001)『生態系を蘇らせる』NHK ブックス
- ・ Young DP Jr., Erickson WP, Good RE, Strickland MD, and Johnson GD. (2003a) Avian and bat mortality

associated with the initial phase of the Foote Creek Rim Windpower Project, Carbon County, Wyoming. prepared for Pacificorp, Inc., SeaWest Windpower Inc., and Bureau of Land Management Rawlins District Office.

•Young DP Jr., Erickson WP, Strickland MD, Good RE, and Sernka KJ. (2003b) Comparison of avian responses to UV-light-reflective paint on wind turbines. National Renewable Energy Laboratory. NREL/SR-500-32840.

(なかつひろむ 大阪府立大大学院農学生命科学研究科 〒599-8531 堺市学園町 1-1)