

風力発電事業における鳥類衝突リスク管理モデル

島田 泰夫¹・松田 裕之²¹財団法人日本気象協会首都圏支社・²横浜国立大学大学院環境情報学府

Risk Management Model of Birds and a Wind Farm

Yasuo Shimada¹ and Hiroyuki Matsuda²¹Japan Weather Association Tokyo office,²Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

要旨：風力発電事業を進める上で、鳥衝突（バードストライク）問題の解決が求められる。本稿では、順応的管理を取り入れた鳥衝突リスク管理モデル（AMUSE: Adaptive Management model for Uncertain Strike Estimate of birds）を提案する。このモデルは、個体群サイズと衝突数をモニタリングし、結果に応じて風力発電の稼働率を調整して衝突率を低減し、保護増殖施策を導入して個体群の成長率を増加させ、個体群の管理を目指すものである。オジロワシは、2004年2月～2007年1月の間に7個体の衝突死が報告されており、本種を対象とし個体群パラメータを定めた。あらかじめ自然条件下での個体群計算を行い、エンドポイントを定めておく。その後、2通りの成長率シナリオと管理シナリオを用いて、管理モデルの計算機実験を行った。死骸は5日間で消失、死骸発見のための踏査間隔を30日間隔と仮定し、発見数を補正して推定衝突数とした。計算期間は、計画段階5ヶ年、稼働期間17ヶ年の合計22年間とし、3年毎に稼働管理計画を見直して、稼働率と保護増殖措置の有無、管理下における個体群サイズを得た。設備利用率は、北海道における2003～2005年の実績値から推定し、計算機実験で得られた稼働率を乗じて管理対策による設備利用率とした。あらかじめ損益分岐点となる設備利用率の限界点を求めておき、これを割り込む程度を管理の事業破綻率とした。その結果、エンドポイント（個体群サイズ自然変動幅99.9%区間下限値）達成率を99%以上、なおかつ事業破綻率を10%以下とする条件は以下の通りであった。楽観的シナリオにおいては、2種類の管理シナリオと保護増殖措置の導入条件に左右されなかった。これに対して、悲観的シナリオにおいては、必要に応じて稼働率をゼロにし、なおかつ保護増殖措置の開始を稼働率90%もしくは99%の時点で導入する管理シナリオでのみ達成された。管理を実行していく上で残された課題は、死骸消失実験による消失日数の把握、発見率向上のための衝突自動監視装置等の開発、定期的な死骸踏査、個体群モニタリングによる成長率と個体群サイズ推定、道内営巣つがいによる繁殖成績の把握、事業破綻に備えたリスクヘッジである。

キーワード：順応的管理、風力発電、バードストライク、オジロワシ

Abstract: We propose the Adaptive Management model for Uncertain Strike Estimates for birds (AMUSE). Between February 2004 and January 2007, seven dead white-tailed sea eagles were found near wind turbines in Hokkaido prefecture, Japan. We used this population as the target species in the management model. In the management model, we assumed that the bodies of any birds killed in collisions would disappear within 5 days, while the searches for carcasses were conducted every 30 days. The calculation period of the management model was 22 years, consisting of a 5-year planning period and a 17-year operation period. The operation management schedule was reviewed every three years. The utilized capacity was estimated from the data for 2003 to 2005 for Hokkaido. The operation rate multiplied by the utilized capacity gives the corrected utilized capacity. After the break-even point of the utilized capacity was determined, the time that fell below this was defined as the failure rate

¹ 〒170-6055 東京都豊島区東池袋 3-1-1 財団法人日本気象協会首都圏支社

Japan Weather Association Tokyo office, 3-1-1 Higashiikebukuro, Toyoshima, Tokyo 170-6055, Japan

e-mail: shimada@jwa.or.jp 2007年5月28日受付、2007年9月20日受理

of the business. The results showed that the end point was achieved 99% of the time, while the failure rate was below 10%. An optimistic scenario was not affected by the two management scenarios or conditions used as protection measures. Conversely, a pessimistic scenario was achieved only under specific conditions in the management scenario. The main goals were to 1) estimate the number of days required for a carcass to disappear, 2) develop a search technique to improve the discovery rate of carcasses, 3) conduct regular surveys of carcasses, 4) determine the growth rate and population size by monitoring, 5) determine the results of breeding by breeding pairs in Hokkaido, and 6) examine risk hedging to deal with failure of the business.

Key Words: Adaptive risk management, Wind farm, Bird collisions, White-tailed Eagle

はじめに

地球環境問題が顕在化しつつある中、地球温暖化を抑制する施策のひとつとして、風力発電事業の普及・促進があげられる。「日本における都道府県別風力発電導入量」(http://www.nedo.go.jp/enetai/other/fuuryoku/todoufuken_ichiran.pdf, 2007/3/1 確認)によれば、2006年3月末における国内の総設備容量は約1,078 MW、総設置基数は1,050本に達しており、また環境省(2002a)によれば「2010年までに国内で300万KW(3,000 MW)」という目標も示されている。

鳥類やコウモリ類が航空機に衝突することをバードストライク(birdstrike)と呼ぶ。広義にはビルディング、送電線、自動車・航空機等の人工物に衝突することも含まれる(Erickson et al. 2001)。風力発電でもバードストライクは発生する。2004年2月に北海道苫前町の風力発電施設でオジロワシ *Haliaeetus albicilla albicilla* Linnaeus の死骸が確認された(浅川ほか 2004)。風力発電施設での本種の死骸は、翌月にも同町、同年12月に根室市昆布盛、2005年12月に石狩市、2006年4月には再び苫前町、そして同年6月に幌延町、2007年1月に苫前町でそれぞれ1個体が確認された。

風力発電の事業計画は、岬や沿岸部および山稜尾根のような渡りルートと近接することもあり、風力発電によるバードストライクの影響が懸念されている(日本野鳥の会 2004)。他方、風力発電をはじめとする新エネルギー事業の促進で、温暖化を抑制することができるのであれば、温暖化による鳥類の絶滅リスクは低下するかも知れない。そこで風力発電事業がこれら鳥類に及ぼす影響を検討し共存可能な方策を立案することが急務である。

しかしながら、現時点(2007年5月)において、風力発電が鳥類に及ぼす影響の大きさは、利害関係者、研究者および市民の間で一致しているとは言い難い。その理由として情報不足があげられる。今のところ、国内で風力発電への鳥類衝突事故の発生時期・頻度、地形的特徴

などは、ほとんど明らかになっていない。風力発電事業の環境影響評価は、一部の都道府県を除いて条例対象となっていない。また、事後調査(死骸調査)も義務づけられていない(新エネルギー・産業技術総合開発機構 2005a)。一部の発電事業者は自主的に死骸調査を実施しているものの、衝突数を推定するためには、複数のパラメタ(踏査域における発見率、分解・消失率、踏査域外での死亡率、踏査域内調査不能率、調査面積等)による補正を必要とする意見もある(Morrison 2002; 島田 2006)。

野生生物の個体群管理を行う際につきまとう情報量の少なさとその複雑な動態に対処するためには、不確実性を組み込んだ管理手法が求められる。そのひとつとして順応的管理(adaptive management)があげられる(たとえば日本生態学会生態系管理専門委員会 2005)。順応的管理手法は、鯨類等の水産資源管理手法として提案された(たとえば田中 2001)。陸域での応用事例は少ない。北海道は「エゾシカ保護管理計画」(<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ks/skn/sika/keikaku/keitop.htm>, 2007/5/23 確認)を策定し個体群サイズ管理を開始した。これには順応的管理が反映されている(松田 2000, 2006)。常に資源量を推定しながら、漁獲係数(漁獲圧)を調整し、許容漁獲量を毎年見直すような順応的管理手法(松田 2004)を応用すれば、風力発電事業と鳥類の共存策を検討することが可能であろう。たとえば、資源量を対象とする鳥類個体群サイズ、漁獲係数を衝突事故に対する低減措置とみなし、絶滅リスク評価から損失余命の短縮に基づいた許容衝突数を定めれば、定期的に個体群サイズと衝突数を継続調査しつつ稼働管理を計画して個体群を維持することができるだろう(島田 2006)。

本稿では、風力発電事業と鳥類の共存を計るために、順応的管理に基づいた鳥類の衝突リスク管理モデルを提唱する。このモデルは簡単なリッカー型ロジスティック式で記述される。個体群サイズと衝突数をモニタして、その結果に応じて、稼働計画の調整を通して衝突率を低

減し、保全対策（保護増殖策）を導入することを柱としている。稼働の停止は確実に衝突数を減らすことができる方策のひとつである。カリフォルニア州エネルギー委員会にも稼働率の調整（施設の停止、撤去）という対策の選択肢がある（Smallwood and Thelander 2004）。

本稿では、まず管理モデルの概要について説明し、オジロワシ個体群の情報に基づいて管理モデルの各パラメータ値を定める。その管理モデルを用いてオジロワシ個体群の計算機実験を行い、風力発電事業において計算結果で得られた施設の稼働率、保護増殖導入率などから、個体群維持のエンドポイントを守りつつ事業採算性も成り立たせる管理条件について検討するとともに、残された課題を整理した。

管理モデルの概要

管理モデルを説明するにあたり、シンボルを多用するため用語解説（glossary）を整理し表1に示す。

自然個体群の動態モデル

風力発電施設が建設される以前の個体群サイズ $B(t)$ の動態（自然個体群と呼ぶ）を、内的自然増加率 r^* 、環境収容力 K をもつ、リッカー型ロジスティック差分方程式で記述する。

$$B(t+1) = B(t) \cdot \exp[r(t) - a \cdot B(t)]$$

$$a = r/K, \quad r(t) = \rho \cdot r(t-1) + (1 - \rho) \cdot \varepsilon_1 \quad (1)$$

増加率 $r(t)$ は、年 t 毎に変動するとし、平均 r^* 、標準偏差 σ_1 の正規分布 $N(r^*, \sigma_1)$ に従う確率変数 ε_1 として与え、その自己相関を ρ とする。 ρ は時系列の成長率 $r(t)$ から推定する。また、 K も平均 K^* 、標準偏差 σ_2 の正規分布 $N(K^*, \sigma_2)$ に従うものとした。

衝突個体群の動態モデル

風力発電が稼働して衝突事故を伴う個体群を次のとおり記述する。 t 年における衝突数 $X(t)$ がポアソン分布に従うとする。衝突数の平均期待値 $\lambda(t)$ は衝突率 s 、衝突係数 $F(p(t))$ と個体群サイズ $B(t)$ の積であらわされる。

$$Pr[X(t)] = e^{-\lambda(t)} \cdot \lambda(t)^{X(t)} / X(t)! \quad (2)$$

ただし、 $\lambda(t) = s \cdot F(p(t)) \cdot B(t)$

$$B(t+1) = B(t) \cdot \exp[r(t) - a \cdot B(t)] - X(t) \quad (3)$$

表1. 用語解説。

記号	内容
$B(t)$	時刻 t における個体群サイズ
B_1	個体群サイズの管理基準値（自然変動幅の下限）
b_1	B_1 を得るための比率
B_{end}	個体群サイズの管理基準値（エンドポイント）
b_{end}	B_{end} を得るための比率
$B_{est}(t)$	時刻 t における推定個体群サイズ
br	オジロワシ繁殖率
b_{88-95}	前期の平均繁殖率
b_{96-02}	後期の平均繁殖率
$c(t)$	時刻 t における保護増殖措置により見込まれる成長率の増分
c_1	56つがいに保護増殖を実施した場合の成長率の増分（上限値）
d_1	死骸の消失日数
d_2	死骸調査の踏査間隔（日数）
$F(t)$	時刻 t における衝突係数
F^*	衝突係数の最小値
f	死骸の発見率
f_1	踏査域内発見率
f_2	踏査域内死骸遭遇率
n_{breed}	繁殖個体数
$p(t)$	時刻 t における（相対）稼働率
p^*	（相対）最低稼働率
PBR	潜在的生物学的捕獲数
q_{adult}	オジロワシ生存率（5歳以降）
$q_{juvenile}$	オジロワシ生存率（0～5歳）
$r(t)$	時刻 t における成長率
$S(t)$	時刻 t における発見（死骸）数
$s_{est}(t)$	時刻 t における推定衝突率
$X(t)$	時刻 t における推定衝突数
$X_{max}(t)$	時刻 t における許容衝突数
ε_1	$N(r^*, \sigma_1)$ に従う確率変数
ε_2	$N(K^*, \sigma_2)$ に従う確率変数
ε_3	$N(0, \sigma_3)$ に従う確率変数
ρ	$N(r^*, \sigma_1)$ に従う確率変数に基づいた乱数を生成時の自己相関値
$U_m(y, m)$	17ヶ年の月別利用率
$U_y(t)$	年あたり設備利用率
U_{cv}	管理対策用設備利用率

ここで $p(t)$ は風車の相対稼働率、 $F(p(t))$ は衝突係数を表し、相対稼働率 $p(t)$ の関数である。ここでいう相対稼働率 p は0～1をとる。

本稿の保全対象種であるオジロワシは越冬個体が多数を占める。衝突の可能性が高いとされた7死骸についても1例を除けば、12月から4月の越冬時期で発見されている。このため半年間の越冬時期の昼間を除いて稼働しても衝突リスクは無視できるとした（3/4稼働）。これより、相対稼働率 p と衝突係数 F について下記の関係を考える。

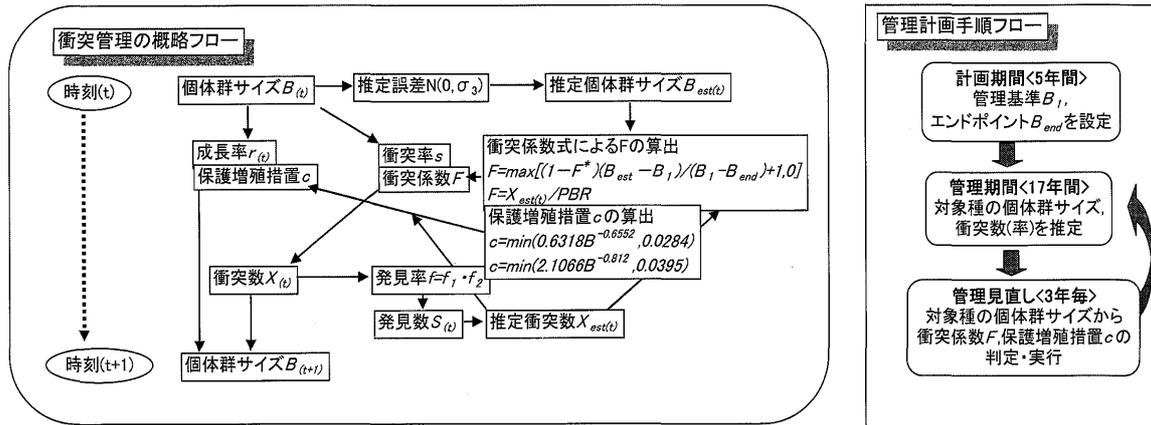


図1. 衝突管理の概略と管理計画手順のフローチャート。

$$F(p) = \max[0, 4p - 3] \quad (4)$$

衝突個体群モデルを管理するために、式(3)を次のように修正する。

$$B(t+1) = B(t) \cdot \exp[r(t) + c(t) - a \cdot B(t)] - X(t) \quad (5)$$

ただし、 $c(t)$ は保護増殖施策による成長率の増分である。風力発電の稼働による衝突のみを低減すると仮定したため、風力発電がなくても絶滅する個体群の場合には、それを防ぐことは想定していない。成長率 r^* が負の場合、衝突率 s を放置すれば、個体群の減少率が増えることで絶滅時間は短縮する。管理モデルは事業による衝突のみを低減するので、施策導入後の成長率は r^* に等しくなるだけである。

管理の流れ

管理の流れを説明するにあたって、衝突管理の概略と管理計画手順をフローチャートとして図1に示す。

管理の流れは、まず、モニタリングによって個体群サイズ B_{est} を推定する。

管理基準となる個体群サイズ B_1 と B_{end} は、事業を実施する以前の推定個体群サイズ B_{est} に、比 b_1 、 b_{end} を乗じたものである。個体群は、自然増加率の不確実性から、自然状態でも減少する可能性がある。自然変動幅の下限を B_1 とする。 B_1 を得るための b_1 は、計算機実験から、ある世代後の個体群サイズの60%信頼区間の下限とした。また、風力発電が稼働し衝突が発生すれば、減少するリスクは増加することになるが、それを避けることとし、これ以上減少させない個体数基準をエンドポイント B_{end}

とする。エンドポイント B_{end} を得るための b_{end} も計算機実験により個体群サイズの99.9%区間下限値とした。

$$B_1 = B_{est} \cdot b_1 \quad (6)$$

$$B_{end} = B_{est} \cdot b_{end} \quad (7)$$

次に、死骸調査によって発見された死骸数 $S(t)$ から衝突数 $X(t)$ および衝突率 s を推定する。 $s \cdot F(p(t))$ において $p(t)$ は既知であることから、 s は推定可能である。 B_{est} が事前に定めておいた自然変動の下限基準 B_1 を下回ったら、衝突係数 $F(t)$ を調整し、保護増殖値 $c(t)$ を導入しながら、エンドポイント B_{est} を守る(図2)。ただし、自然変動内であったとしても、いくらでも衝突してよいということにはならない。このときは許容衝突数 X_{max} を設定し、衝突数 $X(t)$ が許容衝突数 X_{max} を上回っても、衝突係数 $F(t)$ を調整するようにした。

衝突係数 F と保護増殖値 c の導入は、以下に述べる3つの判断基準に基づく。

第1に、推定個体群サイズ B_{est} が管理基準 B_1 を上回っている場合、推定衝突数 X_{est} が許容衝突数 X_{max} を越えなければ、個体群への影響はないものとし(基準a1)、推定衝突数 X_{est} が許容衝突数 X_{max} を越えた場合は、衝突係数 F で衝突率 s を低減するものとした(基準a2)。衝突係数 F は施設の稼働停止、すなわち稼働率 p の調整による(式4)。

第2に、推定個体群サイズ B_{est} が、 $B_{end} < B_{est} < B_1$ となるような場合、次式(8)を用いて個体群サイズに応じて衝突率 s を衝突係数 F だけ低減する(基準b1)。

$$F = \max[1 - F^*(B_{est} - B_1)/(B_1 - B_{end}) + 1, 0] \quad (8)$$

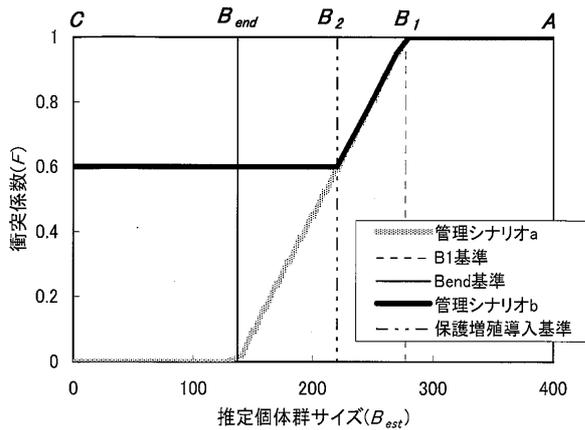


図2. 推定個体群サイズ B_{est} と衝突係数 F 。ここでは保護増殖措置導入基準 $P_c = 0.90$ 、 $F = 0.60$ とおいた。A ~ B₁: 許容衝突数 X_{max} による衝突係数 F の適用範囲、B₂ ~ C: 保護増殖措置 c の適用範囲 (管理シナリオ a, b 共通)

ただし、 $0 \leq F \leq 1$

これは松田 (2004) による漁獲資源量管理案と同一である。常に資源量を監視 (推定) しながら、漁獲係数 (漁獲圧) を調整し、許容漁獲量を見直す順応的管理手法のひとつである。

ここで二つの管理シナリオを想定した。衝突係数の最小値 F^* を 0 にする場合 (管理シナリオ a) と、何らかの理由で最低稼働率 p^* が存在する場合である (管理シナリオ b: $F^* = F(p^*)$)。個体群サイズの減少に伴い、前者は対象種の飛翔時期に施設をすべて停止し ($F^* = 0$)、衝突がゼロになるのに対して、後者は最低稼働率を維持し続けるので、衝突事象はゼロにならない。

保護増殖措置の導入は、稼働率 p が、あらかじめ定めた保護増殖の開始稼働率 p_c 以下となった時に開始する (基準 b2)。管理シナリオ a の場合、保護増殖措置 c を導入しつつ、衝突係数 F を 0 まで下げる。これに対して、管理シナリオ b の場合、 c を導入するが衝突係数は $F^*(p^*)$ より下げない (図2)。

個体群サイズの推定

モニタリングにより、推定個体群サイズ $B_{est}(t)$ を得る。推定誤差 d を伴うので、以下の式に従うと仮定する。

$$B_{est}(t) = B(t) \cdot d = B(t) \cdot \varepsilon_3 \quad (9)$$

ε_3 は、正規分布 $N(0, \sigma_3)$ に従う確率変数であり、 σ_3 は個体群サイズの推定誤差の標準偏差である。

発見数から衝突数 (率) の推定

死骸調査による発見数 $S(t)$ は、以下のように記述される。年間衝突数 $X(t)$ のとき $S(t)$ 個体発見できる確率 $\Pr(S(t)|X(t))$ は、二項分布確率に従うものとして以下の式で得る。

$$\Pr(S(t)|X(t)) = X(t) C_{S(t)} f^{S(t)} (1-f)^{X-S} \quad (10)$$

ただし、 $f = f_1 \cdot f_2$ とし、 f_1 と f_2 はそれぞれ踏査域内発見率と踏査域内死骸遭遇率を表す (f_1, f_2 について $0 \leq f_i \leq 1$)。また、 $f_2 = d_1/d_2$ であり、 d_1 と d_2 はそれぞれ死骸の消失日数と死骸調査間隔日数である。

発見数 $S(t)$ から、推定衝突数 $X_{est}(t)$ と推定衝突率 $s_{est}(t)$ を得るため、2通りの推定法を考える。

第1に、発見数 $S(t)$ を遭遇率 f_2 の逆数 d_2/d_1 で補正して推定衝突数 $X_{est}(t)$ を算出し、年平均衝突率 $s_{est}(t)$ を推定する。ただし、発見率 f_1 を 1、消失日数 d_1 を既知と仮定している。

$$X_{est}(t) = S(t) \cdot (d_2/d_1) \quad (11)$$

$$s_{est}(t) = X_{est}(t)/B_{est}(t) \quad (12)$$

t 年において過去 n 年間の観測結果から求める場合、以下の推定式を得る。

$$s_{est}(t) = (1/n) \sum_{t-n+1}^t X_{est}(t) / (1/n) \sum_{t-n+1}^t B_{est}(t) \quad (13)$$

第二に、最尤推定を用いて、より安全側に配慮した推定衝突率を得ることとした。真の衝突数を $X(t)$ とするとき、発見数が $S(t)$ 以下となる累積確率を求め、それが 0.05 となる $X(t)$ を推定衝突数とする。すなわち

$$\Pr[X(t) \leq S(t)] = \sum_{y=0}^{S(t)} C_{y} f^y (1-f)^{B_{est}(t)-y} \quad (14)$$

ただし、ここでは $f = s_{est}(t) \cdot f_1 \cdot f_2$ である。この累積確率 $\Pr[X(t) \leq S(t)] = 0.05$ となる推定衝突率 $s_{est}(t)$ を求める。推定衝突数 $X_{est}(t) = s_{est}(t) F(p(t)) B_{est}(t)$ である。

t 年において過去 n 年間の観測結果から求める場合、

$$\Pr[X(t) \leq S(t)] = \sum_{y=0}^{S^*(t)} C_{y} f^y (1-f)^{B_{est}(t)-y} \quad (15)$$

ただし $S^*(t) = \sum_{t-n+1}^t S(t)$

$$\begin{aligned}
 X_{est}(t) &= s_{est}(t) \cdot p^*(t) \cdot B^*_{est}(t) \\
 p^*(t) &= (1/n) \sum_{t-n+1}^t p(t) \\
 B^*_{est}(t) &= (1/n) \sum_{t-n+1}^t B_{est}(t)
 \end{aligned}$$

さて、個体群サイズ B を一定とおけば、衝突率 s のとき、 t 年間に延べ X 個体衝突する確率 $Pr(X)$ 、 S 個体発見できる確率および推定衝突率 s_{est} は解析的に得られる。

t 年間に延べ X 個体衝突する確率 $Pr(X)$ は、式(2)から

$$Pr(X) = e^{-\lambda} \lambda^x / x! \quad (16)$$

ただし $\lambda = s \cdot p \cdot B \cdot t$

となる。これに S 個体見つける確率 $Pr(S | X)$ (式10)を乗じれば、 t 年間で延べ X 個体衝突し、 S 個体発見する確率が得られる。すなわち

$$Pr(X) \cdot Pr(S | X) \quad (17)$$

t が有限なので衝突数 X も $0 \sim X_{max}$ (上限)と仮定する。 t 年間で S 個体発見する確率 $Pr(S)$ は、衝突数 $0 \sim X_{max}$ において、 S 個体発見する確率の総和である。

$$\begin{aligned}
 Pr(S) &= Pr(S | S) + Pr(S | S+1) + \dots + Pr(S | X_{max}) \\
 &= \sum_{x=S}^{x_{max}} Pr(S | X) \cdot Pr(X)
 \end{aligned} \quad (18)$$

一方、 t 年間で S 個体発見した場合、衝突率 s の推定は、前述の2手法で得られる(式11~15)。これから年毎の推定衝突率 s_{est} とその生起確率 $Pr(S)$ の散布図を作れば、推定法別の推定傾向が俯瞰できる。

許容衝突数

許容衝突数 X_{max} として、潜在的生物学的捕獲数(PBR; Potential Biological Removal)を用いる。PBRは、米国国家海洋漁業局(NMFS)と米国海洋大気庁(NOAA)が、海洋ほ乳類保護法(MMPA)の第117項(Section 117)に準拠する目的で、どの程度の捕獲が許容されるかを推定するために開発したものであり、最適かつ持続可能な海洋ほ乳類資源の維持のために、個体群から捕獲(除去)できる数の上限と定義される(Barlow et al. 1995)。すなわち、以下のように表される。

$$X_{max} = N_{min} \cdot 0.5 \cdot R_{max} \cdot Fr \quad (19)$$

ただし、 N_{min} はある資源(stock)において対象動物の推

定個体数の60%信頼区間の下限である。

$$N_{min} = N / \exp(0.842(\ln(1+CV^2))^{1/2}) \quad (20)$$

R_{max} は純生産速度であり、通常は、 $R_{max} = 0.12$ (鰭脚類)、 0.04 (歯クジラやマナティ)などと設定される。また、 CV は個体数変動の変動係数を表す。

Fr (Recovery Factor)は、適正に維持される個体群水準(Optimum Sustainable Population levels)を達成するために用いられるもので、endangered species(絶滅危惧種)については 0.1 、枯渇した(depleted)もしくは絶滅のおそれのある(threatened species)種、不明種については 0.5 を与える。

IUCNによるオジロワシの評価はLC(軽度懸念)であること(<http://www.redlist.org/>、2007/05/26確認)、また世代時間が比較的短く、鰭脚類に近いことから、本稿では $R_{max} = 0.12$ 、 $Fr = 0.15$ を用いた。この後に述べるように、欧州のデータから得た生存率と知床で得た繁殖率から求めた増加率は年 $0.0357 \sim 0.1191$ であり、密度効果を考慮すれば、 R_{max} はこの程度と考えられる。

管理の実際

管理の対象種と個体群パラメタ設定

管理モデルの対象種を、越冬期に日本国内に渡来するオジロワシと定義し、管理モデルの構築に必要な個体群パラメタを推定し、管理基準を定めることとした。また、管理モデル上で、衝突係数(稼働率)調整を行う施設数を259基とした。これは2005年度末における北海道内施設の総数である。越冬期のオジロワシは北海道以南の本州にも渡来し、風力発電施設も日本全国に分布しているが、これまで発見報告された衝突事故は北海道内に限られていることから、北海道内の施設を対象とした。

オジロワシの環境収容力 K については、BirdLife(2002)と環境省(2002b)を参考にした。前者にはロシア(アジア域)の推定個体群サイズ(2,000個体)の記載があるものの、個体群動態の傾向は示されていない。一方、国内における推定越冬数は、1991年に560~700(環境省1991)、1999年に550~850、営巣数は「1990年代に入ってやや増加傾向」(環境省2002b)とあることを踏まえ、550~850の範疇にあるものとした。なお管理モデルは雌個体数のみを扱うことから、 K を半分(1/2)の275~425の範疇で、350を平均とし標準偏差を75/4とする正規分布 $N(350, 75/4)$ に従うものとした。なお、初期

個体群サイズ $B(0)$ も $N(350, 75/4)$ に従うものとしたが、 $B(0) > K$ の場合は、 $B(0) = K$ とした。

オジロワシの成長率とその年変動は、ブーツストラップ法を用いて、平均 r^* と標準偏差 σ_1 のデータセットを作成した。その手順は以下のとおりである。

BirdLife(2002)によれば、オジロワシの繁殖開始は通常満5歳(暦年6年)である。そこで、0~5歳までの生存率を($q_{juvenile}$)、5歳以降を(q_{adult})、その繁殖率(br)とし、レスリー行列(L)を以下の通り記述した。

$$L = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & br \\ q_{juvenile} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{juvenile} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{juvenile} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{juvenile} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{juvenile} & q_{adult} \end{pmatrix} \quad (21)$$

オジロワシの生存率についても、BirdLife(2002)に4地域(ノルウェー、スコットランド、フィンランドおよびスウェーデン)の記載があり、それぞれノルウェーで90~95%(Nygrad et al. 2000)、スコットランドで定着前73~75%と定着後94~97%(Green et al. 1996:ただし放鳥による再導入)、フィンランドで86~98%(Saurola et al. in press)、スウェーデンで91~98%(Helander in press)であった。国内におけるオジロワシの生存率に関する知見は見あたらなかった。

繁殖率については、白木・中川(2005)を参考にした。1988年~2003年にかけて知床半島の11つがいのオジロワシ調査から生産力を求めている。生産力は巣立ち数(繁殖成功つがい数+失敗つがい数)と定義されており、上記の繁殖率 br と同義と考えられる。16カ年の生産力を図から読み取ると、1988年から2003年にかけて、順に2.0、0.5、1.0、1.0、1.0、2.0、1.7、1.5、1.0、0.4、1.5、0.65、0.5、1.0、1.0および1.0であった。さらに彼等は11つがいのうち1988~2002年まで連続観察できた4つがいの繁殖率を前期(1988~1995年)と後期(1996~2002年)で比較したところ、前期92.9%、後期61.7%と低下傾向がみられたとしている(ただし統計的検定は行っていない)。その要因として、営巣地周辺の斜面崩落工事等、人間活動によるかく乱を想定している。

これら生存率と繁殖率および式(21)のレスリー行列モデルを用いて、100年間の数値計算を行った。安定年齢分布(合計350個体)計算を開始し、初期年齢分布の影響を避けるため50年目から100年目までの個体数変動から、試行 n 、時刻 t における増加率 $r(n, t)$ を求めた。生存率と繁殖率の数値は毎年乱数を用いて引き直し、生存率

は区間推定値の一樣乱数、繁殖率は低下したとされる1996~2003年のものを用いた。いずれも繰り返し抽出を許している。次式(22)により試行 n における平均成長率 r_n と標準偏差 σ_n を求めた。

$$\begin{aligned} r_n &= \log[(B_{(n,100)}/B_{(n,50)})]/50 \\ r(n, t) &= \log[B(n, t)/B(n, t-1)] \\ \sigma_n &= \{(1/50) \sum_{t=50}^{100} [r(n, t) - \bar{r}_n]^2\}^{1/2} \end{aligned} \quad (22)$$

ただし \bar{r}_n は $r_{(50)} \dots r_{(100)}$ の平均値。

試行数 n によって得られた平均成長率 r_n と標準偏差 σ_n のデータセット群から、正規分布 $N(r^*, \sigma^*)$ に従う乱数を G 個(G 世代分)発生させ、 G 個のデータから自己相関係数 ρ_1 を得た。

$$\begin{aligned} r^* &= (1/n) \sum_{n=1}^n [r_n] \\ \sigma^* &= (1/n) \sum_{n=1}^n [\sigma_n] \end{aligned} \quad (23)$$

計算機実験では、試行毎に平均成長率 r_n と標準偏差 σ_n に従う乱数を G 個発生させ、 ρ_1 を反映させた(式1)。

得られた成長率は、それぞれノルウェー(平均0.0998、標準偏差0.0053)、スコットランド(0.0357, 0.00406)、フィンランド(0.09475, 0.00595)およびスウェーデン(0.11913, 0.00540)であった。これから計算機実験で用いる成長率は、①最低のスコットランド(成長率シナリオa)、②その次に低いフィンランドのものを用いることとした(成長率シナリオb)。

モニタリングによる個体群サイズの推定誤差 d は、以下の手続きで求めた。オジロワシ越冬個体数の推定値 B は、観測結果 B_{est} に基づくものと考えられる。両者の関係は式(9)を用いた。

B については(環境省2002b)の推定越冬数の550~850の中央値700を採用し、 B_{est} についてはオジロワシ地域別個体数(オジロワシ・オオワシ合同調査グループ1996)をブーツストラップした。これは1985年~96年にかけてのオジロワシ・オオワシ一斉調査結果によるものである。調査は、原則として1980~96年の2月中下旬に実施され、調査区域は当初道東区域だけだったが、1985~96年は北日本52~109調査区に設定された。調査は双眼鏡と望遠鏡を併用し、目視によりワシ類の数を種別、年齢(成鳥、幼・亜成鳥の2区分)別に調査したとされる。越冬数のピークと想定される2月の調査結果は、562(85年)、701(86)、391(87)、191(88)、338(89)、451(90)、368(93)、439(94)、546(95)、657(96)

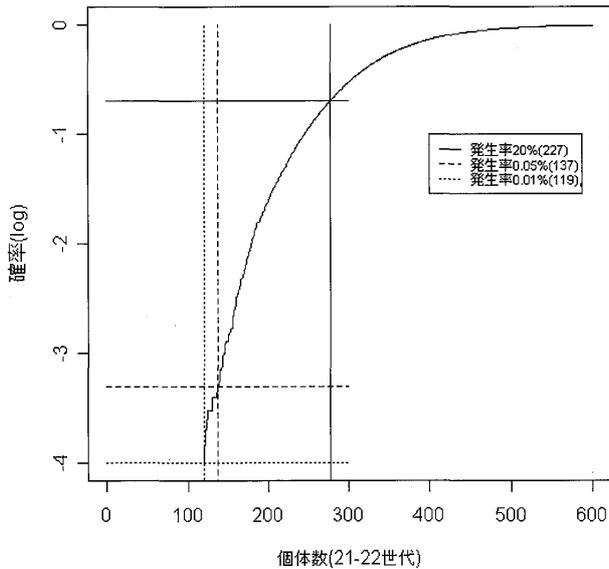


図3. エンドポイント設定のためのオジロワシ個体数の出現確率。(個体群計算による21,22世代の平均個体数の出現率を、ある個体数以下の出現確率で示した。)

である。91年は悪天により調査精度が落ちたとされ、92年は調査を実施しなかったことから除外した。その結果、確率変数 ε_3 は正規分布 $N(0.665, 0.210)$ とみなしたが、観測結果 B_{est} は過小推定になることを示唆している。そのため平均値0.665で割り戻し、これをモニタリングによる観測値 B_{est} とした。

$$B_{est} = B \cdot \varepsilon_3 / 0.665 \quad (24)$$

計算機実験で用いる入力衝突率 s は以下の手続きで得た。オジロワシが風車へ衝突したと推定される事例は2004年2月～2007年1月の丸3年間で7個体である。式(15)より消失日数 $d_1 = 5$ 日間、死骸踏査間隔日数 $d_2 = 30$ 日、 $p(t) = 1$ 、 $f_1 = 1$ 、 $B(t)$ は自然変動の中央値700とし、 $f = s_{est} \cdot f_1 \cdot f_2 = s_{est} \cdot 1 \cdot (5/30)$ とおき、累積確率 $Pr[X(t)=S(t)] = 0.05$ となる推定衝突率 $s_{est}(t) = 0.0376$ を得た。すなわち

$$\begin{aligned} Pr[X(t)=S(t)] &= \sum_{y=0}^7 \binom{7}{y} \cdot 3C_y f^y (1-f)^{700 \cdot 3-y} \\ &= 700 \cdot 3C_0 f^0 (1-f)^{700 \cdot 3-0} + \dots + 700 \cdot 3C_7 f^7 (1-f)^{700 \cdot 3-7} \quad (25) \end{aligned}$$

計算機実験における死骸調査について、衝突した個体は踏査範囲に落下し、残存している場合は発見できるものとした。踏査期間は通年(365日)とした。死骸の消失日数 d_1 は5日間とし、死骸調査の間隔日数 d_2 は、30日

間隔とした。

許容衝突数 X_{max} は、過去6年間の推定個体群サイズ $B_{est6} = (1/6) \sum_{t=1}^6 B_{est}(t)$ から前述の式(19)、(20)を用いて求めた。

$$X_{max} = B_{est6} / \exp(0.842 (\ln(1+CV^2))^{1/2}) \cdot 0.5 \cdot 0.12 \cdot 0.5 \quad (26)$$

オジロワシ個体群の管理基準

個体群は、自然増加率の不確実性から、自然状態でも減少する可能性がある。自然変動幅の下限を B_1 とする。風力発電が稼働し衝突が発生すれば、減少するリスクは増加することになるが、それを避けることとし、これ以上減少させない個体数基準をエンドポイント(B_{end})とする。

B_1 、 B_{end} を求めるため計算機実験を行った。初期個体群 $B(0)$ と環境収容力 K は、前述のとおり $N(350, 75/4)$ とした。 B_1 を得るための b_1 は、60%信頼区間の下限とした(10,000回試行中、出現頻度2,000回の個体数)。前述の許容衝突数 PBR においても、推定個体群サイズを60%信頼区間に置いていることから、これを自然変動幅下限とみなすことは妥当と考えた。エンドポイント B_{end} を得るための b_{end} を99.9%区間下限値(出現頻度5回)とした。

計算の結果、 $b_1 = 277/350 = 0.79$ 、 $b_{end} = 137/350 = 0.39$ とした(図3)。すなわち B_1 、エンドポイント B_{end} は以下の式であらわす。

$$B_1 = (1/5) [\sum_1^5 B_{est}(t)] \cdot b_1 \quad (27)$$

$$B_{end} = (1/5) [\sum_1^5 B_{est}(t)] \cdot b_{end} \quad (28)$$

計算機実験では二つの成長率シナリオa、bを用いているが、いずれのシナリオにおいても、シナリオaの B_1 、 B_{end} を用いたことに留意されたい。

保護増殖政策で導入する値 c は、稼働開始時から計画見直時までの推定衝突率 s (個体/年)とする。ただし、 c 値は56つがいを上限としているため、上限値 c_1 が存在し、かつ個体群サイズに依存することが予想される。

$$c = s \quad \text{ただし、} c > c_1 \text{ の場合、} c = c_1 \quad (29)$$

前述の白木・中川(2005)で、比較的良好とされた前期(1988～1995年)の繁殖率に着目し、保護施策を実施することで前期の繁殖率に回復させることを想定し、次の手順で c_1 を求めた。

総個体数350の安定年齢分布を構成しているオジロワシ

個体群（繁殖個体数 n_{breed} 、平均繁殖率 b_{96-02} ）を想定する。繁殖個体数 n_{breed} のうち56個体に保護策を実施したところ、繁殖率が前期繁殖率（ br_{88-95} ）に増加し、残り（ $n_{breed} - 56$ ）個体は従来の繁殖率（ br_{96-02} ）を持つと仮定し、繁殖個体 n_{breed} の平均繁殖率 br を再計算した。前述の成長率の手続きと同様、ブーツストラップ法により繰り返し抽出を許している。平均繁殖率 br は次式を用いた。

$$br = [(n_{breed} - 56) / n_{breed}] \cdot b_{96-02} + (56 / n_{breed}) \cdot b_{88-95} \quad (30)$$

式(21)のレスリー行列を用意し、生存率シナリオa、bを用いた。そのうち固有値を求めて成長率を求め、これを1,000回繰り返して平均成長率 R_2 を得た。安定年齢分布を想定しているためシナリオaの総個体数は $B = (350/164) \cdot n_{breed}$ 、シナリオbの総個体数 $B = (350/147) \cdot n_{breed}$ で得られる。164と147は、それぞれ総個体数350の安定年齢分布における繁殖個体数である。最終的に個体数 B から成長率の差分（ $c = R_2 - R_1$ ）として累乗回帰式を作成した。ここで R_1 は前述のシナリオaおよびbの平均成長率 r^* である。

$$c = \min(0.6318B(t)^{-0.6552}, 0.0284) \cdots \text{シナリオaの回帰式} \quad (31)$$

$$c = \min(2.1066B(t)^{-0.812}, 0.0395) \cdots \text{シナリオbの回帰式} \quad (32)$$

計算機実験

管理の計算機実験を行うに先立ち、前述した2つの衝突率の推定法を比較し、計算機実験で用いる推定法を定めた。個体群サイズ $B(t) = 350$ 個体、衝突率 $s = 0.0376$ 個体/年、消失日数 d_1 は5日間、踏査間隔 d_2 は30日間とし、毎年、推定衝突率 s_{est} とその生起確率を推定法別に求めた（図4）。図中には参考として発見数 $S(t)$ を用いた推定衝突率 $s_{est}(t) = S(t) / B_{est}(t)$ も併せて示す。その結果、発見数による推定の生起確率のピークは、入力衝突率と比べ過小推定であった。補正発見数による推定は始めの数年は過小推定であったものの、時間経過とともに真の衝突率に漸近した。尤度推定によるものは、時間経過とともに真の衝突率に漸近したものの、過大推定の傾向があった。以上の結果から、計算機実験での衝突数の推定法は補正発見数を用いることとした。なお尤度推定の特徴として、未発見であっても有限衝突率が得られる点を指摘しておく。

管理計画は3年毎に見直され、その後3年間の衝突係

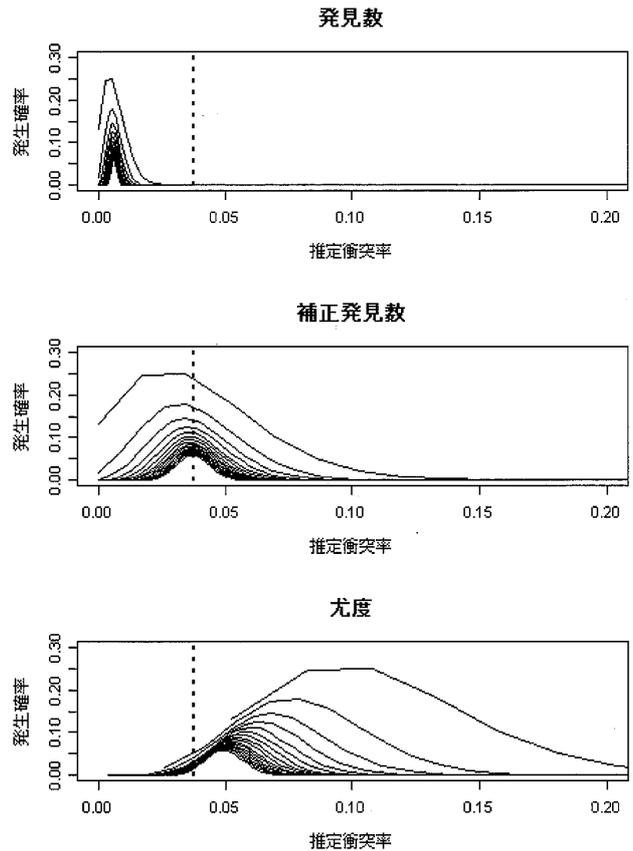


図4. 発見数から推定衝突率の比較。発見数のみの推定（上）、発見数を補正（中）、尤度推定（下）。衝突率、踏査間隔日数、死骸消失日数などは本文を参照。図中、破線は真（入力）の衝突率。

数 F と保護増殖措置 c の導入を定めるものとした。これらの手順は前述したとおりであるが、保護増殖措置の導入条件に「既に導入されていた場合、更に3年間実施すること」を追加、すなわち最低6年間は継続することとした。

管理計画見直し時に、次に述べる①～④の情報を求めた。①過去6年間の平均個体数 B_{est6} 、②許容衝突数 X_{max} 、③推定衝突数 X_{est} （稼働開始時からの発見数に基づく推定値）、④推定衝突率 s_{est} （③から求めた衝突率）。

オジロワシの推定個体数は、1999年当時の越冬数が推定550～850とされ（環境省2002b）、その5年後の2004年に苫前町で2個体のオジロワシ死骸が発見された。これを勘案し、1～5年は事業計画期間とし、個体群サイズ $B_{est}(t)$ を推定し、個体群変動の下限值 B_1 と B_2 を定めた。6年次から事業を開始し8年の終了時において、推定個体群サイズ B_{est} 、衝突数 $X_{est}(t)$ と衝突率 $s_{est}(t)$ を推定し、許容衝突数 X_{max} から、基準a～bを判断し、翌3年間（9年目～11年目）の管理計画（衝突係数 F の調整、保護

増殖措置*c*の導入)を決定した。以後、3年毎に計画を見直し、稼働期間が17年に達するまで(計画期間を併せて22年間)繰り返した。なお、減価償却資産の耐用年数が17年とされることから(「風力・太陽光発電システムの耐用年数について」(<http://www.nta.go.jp/category/tutatu/shitsugi/houjin/05/12.htm>, 2007/5/23 確認)、稼働期間は17年間を採用した。

成長率シナリオは前述のa(スコットランド)とb(フィンランド)の2通り、保護導入を開始する稼働率基準*p_c*は、0.75、0.80、0.90、0.99の4通り、これに管理シナリオa、bを考慮し、延べ14通りの計算を行った(本来は16通りだが、 $F = \max[4p-3, 0] = 4 \cdot 0.75 - 3 = 0$ より、 $p_c = 0.75$ は管理シナリオa、bとも同一条件となる)

管理計画のもとで制御される個体群を管理個体群と呼ぶ。比較のために、事業の影響を受けない個体群(自然個体群)、事業によりバードストライクが発生しても、管理しない個体群(放置個体群)についても計算を行った。計算の試行回数は10,000回とした。

事業採算性の検討

管理モデルは稼働率、すなわち設備利用率を調整するため、事業採算性の悪化が懸念される。管理によるおおまかな事業採算性を検討するための基礎資料を表2に示す。「日本における都道府県別風力発電導入量」(http://www.nedo.go.jp/enetai/other/fuuryoku/todoufukun_ichiran.pdf, 2007/03/1 確認)によれば、北海道で稼働する風力発電は2006年3月末で259基、設備容量は241,455 kWである。施設は設備容量は大型化しているが、ここではモデルケースとして1,000 kWの施設を想定した。北海道経済産業局(2005)と北海道産業保安監督部(2006, 2007)によれば、平成15~17年における道内の風力発電の稼働状況が整理されており、月別設備利用率は図5に示すとおりである。ブーツストラップ法により各月の最低~最高利用率から一様乱数を用いて17ヶ年の月別利用率 $u_m(y, m)$ (ただし $y = 1 \sim 17$ 年、 $m = 1 \sim 12$ 暦月)を得た。そこから、 t 年における設備利用率 $u_y(t)$ (/年) = $(1/12) \cdot \sum_{m=1}^{12} u_m(t, m)$ 、さらに稼働期間における設備利用率 u (稼働期間) = $(1/17) \sum_{t=1}^{17} u_y(t)$ とした。その結果、設備利用率(%/年)は平均21.9%と推定された。

オジロワシは越冬期間(11月~4月)において、日出から日没(昼間12時間を想定)飛翔し、このときに衝突が発生すると仮定する。そこでオジロワシ管理対策による設備利用率(/年) u_{cy} を月別設備利用率 $u_m(t_1, t_2)$ と衝突係数 $F(t_1)$ の積であらわす。越冬期間の昼間に限り、従来

の月別設備利用率 u_m に衝突係数 F を反映させ、夜間は従来の設備利用率 u_m で稼働する。 t_1 年における管理対策用設備利用率 u_{cy} (/年)は

$$u_{cy}(t) = (1/12) \{ \sum_{m=5}^{10} u_m(t, m) + \sum_{m=11}^{12} u_m(t, m) ((1-F(t)) \cdot g + F(t)) \} \quad (33)$$

ただし、 t_2 は暦月、 d は飛翔時間による補正であり、12時間飛翔のため、 $g = (1/2)$ とした。

稼働期間における管理下の設備利用率(/事業期間) u_c は、第1回の稼働管理計画の見直しを3年目終了時としたから $u_c = (1/17) [\sum_{t=1}^3 u_y(t) + \sum_{t=4}^{17} u_{cy}(t)]$

売電価格は、公募条件によって異なるため、kWhあたり9円、10円、11円の3通りとした。売電価格と発電コストの差を損益とみなして、両者が等しい場合を損益分岐点とした。新エネルギー・産業総合開発機構(2005c)は、発電コストを得るための計算式を示している。

発電コスト(円/kWh) =

$$(\text{建設コスト} \times \text{年経費率} + \text{運転保守費}) / \text{正味年間発電量} \quad (34)$$

年経費率 = $mr / (1 - (1 - (1 + r)^{-n}))$ 、

mr : 金利、 n : 耐用年数

また建設単価は、「2000年3月末までのNEDO補助対象事業における風力発電システムの建設コストは、500 kW以下では30~65万円/kW、ウインドファーム等の750~3,000 kWの範囲では25~30万円/kW、20,000 kWでは約20万円/kW」としている。北海道における風力発電施設はその大半がウインドファームに属することから(北海道産業保安監督部 2007)、建設単価は25万円/kWとした。維持管理費用も、新エネルギー・産業総合開発機構(2005c)によれば100万~300万円/基/年としていることから200万円/基/年とした。事業への補助制度(率)は多岐にわたるが、関係者の聞き取り等から建設費用の(1/3) × 0.8補助とした。諸税、系統連結費用ならびに送電線敷設費用は考慮しなかった。耐用年数(=返済期間)は17年間、金利4%とした。これらから、売電単価9円、10円および11円で損益分岐となる設備利用率はそれぞれ、 $u_9 = 19.4\%$ 、 $u_{10} = 17.4\%$ および $u_{11} = 15.9\%$ である(表2)。

管理下の設備利用率 u_c と損益分岐となる設備利用率(u_{9-11})を比較することによって、事業の採算性を評価した。評価にあたって、①個体群の衝突リスク管理の点

表 2. 事業採算性評価のための基礎資料。

	モデルケース	損益分岐				備考
a. 定格出力	kW/基	1,000	1,000	1,000	1,000	a
b. 建設コスト	千円/kW	250	250	250	250	b
c. 総建設コスト	千円/基	250,000	250,000	250,000	250,000	c=a・b
d. 建設補助率	(1/3)×0.8	0.267				d
e. 総建設コスト (残額)	千円/基	183,333	183,333	183,333	183,333	e=c・(1-d)
g. 年経費率		0.082	0.082	0.082	0.082	$g=h/(1-(1+g)^{-i})$
h. 年経費率r	借入れ金利%	0.04	0.04	0.04	0.04	h
i. 年経費率n	耐用年数 (年)	17	17	17	17	i
j. 運転保守費	千円/基	200	200	200	200	NEDO試算値
k. 正味年間発電量	kw/年	1,926,026	1,696,637	1,526,973	1,388,157	$k=l \cdot 8760 \cdot p$
l. 定格出力	kW	1,000	1,000	1,000	1,000	l
m. 想定設備利用率	%	0.257	0.227	0.204	0.185	m
n. 利用可能率		0.95	0.95	0.95	0.95	n
o. 出力係数		0.9	0.9	0.9	0.9	o
p. 設備利用率(損益分岐点)	%	0.220	0.1937	0.1743	0.1585	$p=m \cdot n \cdot o$
r. 発電コスト	千円/kW	0.008	0.009	0.010	0.011	r
s. 発電コスト	円/kW	7.928	9.000	10.000	11.000	$s=r \cdot 1000$
売電単価			9	10	11	

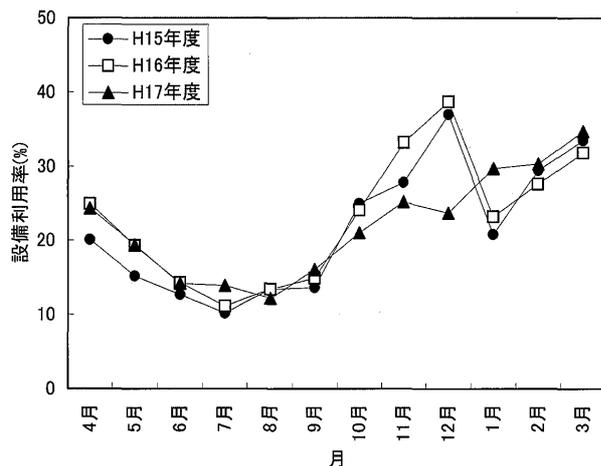


図 5. 設備利用率の月別変化 (北海道、平成 15～17 年)。北海道経済産業局 (2005)、北海道産業保安監督部 (2006, 2007) より作成。

からエンドポイントの達成率と、② $u_c < u_9 \sim u_{11}$ となる確率、すなわち事業の破綻率を比較した。そのうち、これら二つの条件を満足した管理条件について検討を行った。

感度分析

管理モデルの感度分析を行った。変化させるパラメータは、実際の衝突管理に役立てることを想定し、以下の4項目とした。①環境収容力 K を10%増加させる、②個体群サイズの推定誤差を10%小さくする、③死骸調査日数を10%短縮する (30日→27日間隔)、④保護増殖措置による成長率の増加分の上限値を10%上げる。成長率

シナリオは前述のa(スコットランド)、保護導入を開始する稼働率基準 p_c は0.75、管理シナリオaとし、このほかの管理条件は前述の計算機実験と同一とした。

結果

図6に、管理終了時 (21～22年時)における個体数分布 (箱ひげ図)を示す。それぞれ最大値 (1.5×四分位範囲)、第1四分位、中央値、第3四分位および最小値である。

成長率シナリオa(スコットランド成長率)についてみると、中央値の最大は、自然個体群 (図中番号1)によるもので344個体となり初期個体数 (平均325個体)をやや上回った。次いで管理シナリオaによるものが続き、保全措置の導入基準 $p_c = 99\%$ (同6)が251個体、90% (同5)が241個体、80% (同4)が234個体であった。管理シナリオa、b共通となる75% (同3)が233個体であった。それ以下はすべて管理シナリオbによるもので、最低稼働率 $p^* = 80\%$ (同7)が230個体、90% (同8)が221個体、99% (同9)が204個体であり、最小は放置個体群によるもの (同2) 202個体であった。

成長率シナリオb(フィンランド成長率)についても傾向は変わらなかった。中央値の最大は、自然個体群 (図中番号1)によるもので347個体、初期値 (平均325個体)を上回った。次いで管理シナリオaによるものが続き、保全措置の導入基準 $p_c = 99\%$ (同6)が288個体、90% (同5)が275個体、80% (同4)が268個体であった。管理

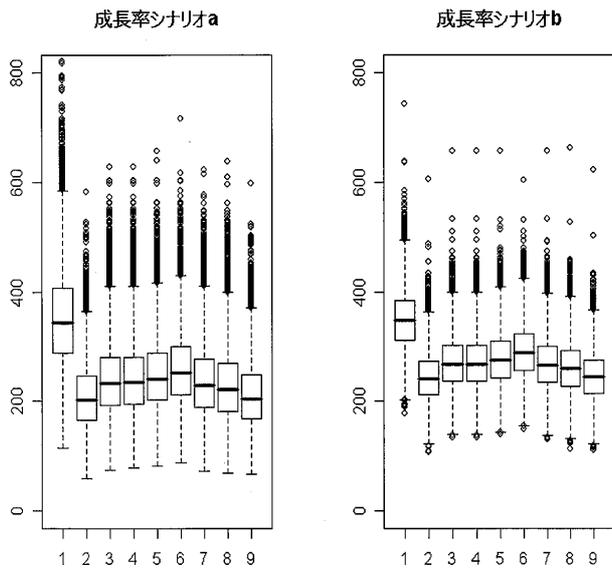


図6. 計算機実験結果 (21～22世代の平均個体数、成長率シナリオ別、箱ひげ図)。図中横軸は管理手法を示しており、1) 自然個体群、2) 放置個体群、3) 管理シナリオ共通75%、4) 管理シナリオa80%、5) 同90%、6) 同99%、7) 管理シナリオb80%、8) 同90%、9) 同99%

シナリオa,b共通となる75% (同3) は267個体であった。それ以下はすべて管理シナリオbによるもので、最低稼働率 $p^* = 80\%$ (同7) が265個体、90% (同8) が259個体、99% (同9) が243個体であり、最小は放置個体群によるもの (同2) 241個体であった。

表3に、成長率シナリオ別、管理シナリオ別のエンドポイントの達成率、設備利用率、事業の破綻率、保護導入率等を整理した。

成長率シナリオaについてみると、エンドポイント達成率は、管理シナリオaにおいて保全措置の導入基準 p_c が高くなるにつれて、わずかに向上した。達成率は98.5～99.58%であった。なお、平均稼働率も同様で、 p_c を高くしてもわずかな向上にとどまり (93.87→94.08%)、22年次についても同様であった (89.85→90.71%)。

これに対して、管理シナリオbについてみると、最低稼働率 p^* を上げるにつれエンドポイント達成率は低下し、 $p^* = 99\%$ での達成率は94.45%にとどまった。一方、平均稼働率は p^* を上げるにつれて増加し、 $p^* = 99\%$ での平均稼働率は99.54 (22年次99.39%)に達した。

管理シナリオaにおける管理対策に伴う設備利用率は20.25～20.31%となり、北海道の推定設備利用率 (21.9%) より約1.65%低下した。一方、管理シナリオbにおいては、最低稼働率 p^* を上げるにつれ設備利用率は向上し (20.25→21.86%)、変動係数は縮小した。

管理シナリオaの事業破綻率は、売電単価11円/kWhでは皆無であったが、10円/kWhでは、0.02%、9円/kWhでは8.44～10.51%発生した。これに対して、管理シナリオbは最低稼働率 p^* を上げるにつれ、採算割れは抑制された。売電単価11円では事業の破綻は皆無、10円と9円についても最低稼働率 p^* を上げるにつれて縮小し、10円は p^* が80%以上、9円も p^* が90%以上でそれぞれ事業破綻は皆無となった。

保護導入率についてみる。管理シナリオaで保護導入の開始稼働率 p_c が上がるにつれて、導入率は高くなり (たとえば99%の場合、39.31%/年と65.63%/22年次)、保護導入期間も増加した (たとえば99%の場合、5.50年)。これに対して、管理シナリオbでの保護導入率は小さかった。年あたり導入率は0.47～0.88%、22年時でも1.73～3.87%にとどまった。保護導入実施期間についても、平均1年未満 (0.07～0.12年)にとどまった。

成長率シナリオbを用いると、各項目の成績はいずれも向上した。エンドポイントの達成率はすべての場合において99.90～100%を達成した。事業の破綻率も縮小し、売電単価9円/kWhにおいても、5.10～5.92% (管理シナリオa)、0～4.15% (管理シナリオb)にとどまった。ただし、管理シナリオaにおける保護導入率はさほど短縮されず、導入開始稼働率99%のときには年あたり34.03%、22年次で57.06%であった。平均稼働率もシナリオaより多少向上したものの、管理対策に伴う設備利用率についてみると、管理シナリオaでは北海道の推定設備利用率 (21.9%) より1%以上の差があった (20.39～20.43%)。

表4に感度分析の結果を示す。各パラメタを10%増加 (あるいは縮小) させ、22年次の個体群サイズについて比較したものである。基本条件は240.9個体に対して、個体群サイズが10%以上増加 (あるいは減少) したものはなく、最大は環境収容力 K を増加させた場合であり (6.57%)、次いで死骸調査の間隔日数を短縮した場合であった (1.98%)。残りの2つのパラメタについては変化はみられなかった。

考 察

国内でバードストライクに対する生態リスク管理の取り組みが未熟であることを考えると、環境影響調査の予測評価、利害関係者での合意形成、保護政策等、応用面での活用が期待できる。また本モデルは、オジロワシだけでなく他種にも容易に適用できるシンプルな構造をもつ

表3. 計算機実験結果概要。

シナリオa(スコットランド成長率)

	自然個体群	放置個体群	管理個体群				管理個体群		
			共通	管理シナリオa			管理シナリオb		
保護増殖措置の導入条件 (稼働率)			75%	80%	90%	99%	80%	90%	99%
エンドポイント達成率 (99.9%値)	99.99	93.45	98.50	98.66	99.22	99.58	98.18	96.83	94.45
平均稼働率 (%/年)			93.87	93.88	93.95	94.08	94.40	96.05	99.54
〃 稼働率 (%/22年時)			89.85	89.88	90.24	90.71	91.04	94.31	99.39
管理対処済み設備利用率 (%/年)			20.25	20.25	20.27	20.31	20.40	20.87	21.86
〃 変動係数CV			0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01
単年度採算割れ率 (% , 売電9円/kWh)			33.04	33.01	32.56	31.80	29.56	15.87	0.00
(% , 売電10円/kWh)			6.71	6.68	6.23	5.58	4.03	0.00	0.00
(% , 売電11円/kWh)			1.13	1.09	0.87	0.68	0.21	0.00	0.00
事業破綻率 (% , 売電9円/kWh)			10.51	10.38	9.14	8.44	5.82	0.00	0.00
(% , 売電10円/kWh)			0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00
(% , 売電11円/kWh)			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
平均保護導入率 (%/年)			0.34	2.22	17.19	39.31	0.47	0.67	0.88
〃 保護導入率 (%/22年時)			1.12	6.86	38.60	65.63	1.73	2.79	3.87
〃 保護導入実施期間 (年/稼働期間)			0.05	0.31	2.41	5.50	0.07	0.09	0.12
管理判断 (a1) 出現率 (%)			13.25	13.24	13.31	13.44	13.21	12.97	12.26
〃 (a2) 〃			43.80	43.81	44.13	45.40	43.68	43.16	41.01
〃 (b1) 〃			42.44	40.48	26.17	2.99	42.53	43.10	45.68
〃 (b2) 〃			0.51	2.47	16.40	38.18	0.57	0.77	1.05

シナリオb(フィンランド成長率)

	自然個体群	放置個体群	管理個体群				管理個体群		
			共通	管理シナリオa			管理シナリオb		
保護増殖措置の導入条件 (稼働率)			75%	80%	90%	99%	80%	90%	99%
エンドポイント達成率 (99.9%値)	100.00	99.86	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.96	99.90
平均稼働率 (%/年)			94.38	94.38	94.44	94.52	94.74	96.07	93.53
〃 稼働率 (%/22年時)			91.43	91.44	91.68	91.96	92.15	94.58	99.42
管理対処済み設備利用率 (%/年)			20.39	20.39	20.41	20.43	20.49	20.87	21.86
〃 変動係数CV			0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01
単年度採算割れ率 (% , 売電9円/kWh)			30.03	30.01	29.65	29.08	27.34	16.77	0.00
(% , 売電10円/kWh)			4.00	4.00	3.74	3.42	2.78	0.00	0.00
(% , 売電11円/kWh)			0.29	0.23	0.17	0.13	0.02	0.00	0.00
事業破綻率 (% , 売電9円/kWh)			5.92	5.91	5.25	5.10	4.15	0.00	0.00
(% , 売電10円/kWh)			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(% , 売電11円/kWh)			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
平均保護導入率 (%/年)			0.05	0.65	11.40	34.03	0.09	0.12	0.14
〃 保護導入率 (%/22年時)			0.12	1.85	24.87	57.06	0.27	0.48	0.54
〃 保護導入実施期間 (年/稼働期間)			0.01	0.09	1.60	4.76	0.01	0.02	0.02
管理判断 (a1) 出現率 (%)			14.26	14.26	14.38	14.61	14.26	13.92	13.17
〃 (a2) 〃			50.36	50.36	50.81	52.72	50.16	49.73	47.37
〃 (b1) 〃			35.32	34.82	25.88	3.20	35.51	36.24	39.33
〃 (b2) 〃			0.06	0.56	8.93	29.47	0.08	0.11	0.13

ため、汎用性は高いものと考えている。

衝突率の推定

衝突率に関する推定方法のうち、発見数によるものは明らかに推定衝突率を過小推定した。衝突数を精度良く推定する方法として、① d_1 (消失日数) $< d_2$ (踏査間隔日数) なら発見数を補正する (式11)、② $d_1 = d_2$ となるよう踏査間隔日数を短縮する等が考えられる。

まず、①発見数の補正について述べる。衝突事象がポアソン確率、発見事象が二項分布確率で説明できるのであれば、平均消失日数 d_1 および踏査時の発見率 f_1 を推定できれば、踏査間隔日数で除す (d_2/d_1 : 式11) ことにより補正値が得られ、衝突数は推定できる。今回の条件(平均消失日数5日) なら、踏査30日間隔の補正値は6倍 (= 30/5)、15日間隔ならばおよそ3倍 (= 15/5) である。しかしながら消失日数について国内資料が見あたらない

風力発電事業における鳥類衝突リスク管理

表4. 22年次における個体群サイズの比較に基づく感度分析結果。

	個体群サイズ (22年次)				
	平均	増加率%	標準偏差	95%信頼区間下限	95%信頼区間上限
基本条件	240.9		69.2	105.3	376.6
環境収容力 <i>K</i> を10%上げる	256.8	6.57	74.6	110.5	403.1
個体群サイズの推定精度を10%上げる	239.9	-0.45	68.5	105.6	374.1
死骸調査間隔日数を10%短縮する (27日間隔)	245.7	1.98	68.5	111.5	380.0
保護増殖措置による増加率の上限を10%上げる	240.9	0.00	69.2	105.3	376.6

ことから、まず消失日数の推定作業に着手する必要がある。死骸調査の際、死骸を回収せず目印を付けて現場に放置しておく。便宜的に家禽を用いることも考えられる。死骸踏査毎にそれらの消失状況を確認すれば、おおよその日数は推定できる。ただし、消失日数は季節や場所、種によって異なるためデータの積み重ねが必要である。

発見数から衝突数(率)を推定する方法として、補正式によるもの(式11~13)と尤度推定(式14、15)の比較を行い、本稿では前者を採用した。ただし、踏査施設数が少なくても未発見率は高まるだろう。発見されなかった場合、補正が効かないので有限推定値は得られない。このような場合、たとえ未発見でも有限推定値を得られる尤度推定を採用すべきであろう。

次に、②全数調査——すなわち連日踏査——は相当の調査努力量が要求されるから、省力化が求められる。オランダでは「Bird Collision Recorder」という衝突音解析システムが開発されている(Verhoef et al. 2003)。カリフォルニアのエネルギー委員会でも振動計(加速時計)を用いて、衝突時の異常振動を記録することで、衝突に関するデータベース構築を提言している(Smallwood and Thelander 2004)。これらの実用化が待たれる。

また、現場に落下した死骸が、捕食によって消失しないような対策をとれるなら全数調査になるだろう。たとえば上田(私信)は、地表面から一定の高さに2層のネットを張り、衝突した個体を捕獲・回収することを提案している。落下した個体は上層のネットを通過し、下層のネットで捕獲される。下層のネットは地上徘徊性の捕食者を防ぐためであり、上層のネットはカラス、トビ等からの捕食を防止する。ただし、踏査円面積の半径はハブ高程度は必要と述べている(島田 2006)ことを考慮すると、相応の面積が必要である。

管理シナリオ—風力発電事業とオジロワシ個体群の共存—
エンドポイントの達成率を95%と99%で比較してみ

る。管理シナリオaについてみると、達成率を95%にいた場合は、すべてにおいて達成された。しかしながら、達成率を99%におくと、楽観的な成長率シナリオbでは達成されたものの、悲観的な成長率シナリオaでは、 p_c が90%以上の場合に限られた。

管理シナリオbについてみると、達成率を95%におくと、楽観的な成長率シナリオbではすべて達成できたものの、悲観的な成長率シナリオaでは p^* が99%で達成しなかった。さらに達成率を99%におくと、悲観的なシナリオ(a)はすべての p^* 条件で達成されなかった。

管理条件を安全側に配慮するなら、管理シナリオaにおいて p_c を90%程度にする必要があるかも知れないが、成長率シナリオaはスコットランド地域への再導入(放鳥)に基づく生存率の推定値によるものである。残り3地域の生存率が比較的高率0.0997~0.1182であることを考慮すると、日本における本種の成長率もこれら3地域と同じレベルであり、楽観的にみてもよいかも知れない。

事業破綻率は、悲観的シナリオaで0~10.5%、楽観的シナリオbで0~5.82%であった。とりわけ売電単価9円/kWhの場合は厳しい数値であり、事業破綻に備えたりスタヘッジが必要かも知れない。たとえば、年間(8760時間)において、対象とする鳥類の飛翔時間を x (時間)、売電単価Priceとおくと、管理前(a)と管理実施(b)の年間総収入 In_{come} および損失分 In_{loss} :

$$In_{come} = \sum_1^{8760} u(t) \cdot Price \quad (35)$$

$$In_{come} = \sum_1^x u(t) \cdot F(t) \cdot Price + \sum_x^{8760} u(t) \cdot Price \quad (36)$$

$$In_{loss} = \sum_1^x u(t) \cdot Price - \sum_1^x u(t) \cdot F(t) \cdot Price \quad (37)$$

で得られる。管理に伴う採算割れは $\sum_1^x u(t) \cdot F(t) \cdot Price$ に起因するから、その対策として、① x を小さくする。対象種の飛翔状況に応じ、動的稼働管理を行う。② $F(t)$ の下げ幅を小さくする。稼働停止以外の衝突防止対策を採用することで稼働率を下げずに衝突率を下げる。③売電

単価 $Price$ を対象種の飛翔期間とそれ以外で区分し、前者の単価を上げる。もしくは④損失分を損害保険等によって補填する等、が考えられる。たとえば、①と②については、「風力発電施設に係る適正整備推進事業」(<http://www.env.go.jp/guide/budget/h19/h19-gaiyo-2/103.pdf>, 2007/5/26確認)のバードストライク防止策実証事業と立地適正化事業が該当すると考えられる。④についても「風力発電事業に対するダイナミックな社会的受容性」(横浜国立大学21世紀COE「生物・生態環境リスクマネジメント」第35回公開講演会<http://risk.kan.ynu.ac.jp/sugimoto/070316COE.html>, 2007/5/23確認)によれば、稼働停止に伴う損失を損害保険で補填する方法を検討している。今回の採算性はおおまかな試算であるから、今後はキャッシュフローに基づいた試算が必要である。

稼働率と衝突率

今回のモデルでは、簡素化のため全施設が同一の設備利用率 u_p (%/年)と衝突率 s (個体/年)を保持していると仮定した。しかしながら、二つの属性は事業地や施設毎に異なるだろう。ある地域に合計 f_c 施設が稼働しており、各施設の設備利用率 Tu_n 、衝突率 Ts_n とすれば

$$\begin{aligned} \text{地域の平均設備利用率} &= (1/f_c) \sum_{n=1}^{f_c} Tu_n \\ \text{地域の平均衝突率} &= (1/f_c) \sum_{n=1}^{f_c} Ts_n \end{aligned}$$

とあらわすことができる。衝突係数 F を達成するため、大きい衝突率を持つ施設から停止していけば、設備利用率は自動的に定まる。死骸調査の資料が蓄積され、施設毎の設備利用率と衝突率がデータベース化されれば、衝突係数の目標値 F に応じて設備利用率を最適化することもできる。端的な例として、Smallwood and Spiegel (2005)は、アルタモント地域における風力発電施設群について、衝突率の高い施設群の停止や季節の停止を提言し、それに伴う発電量の低下について試算を行っている。

保護増殖値

米国アルタモント地域では風力発電施設へのバードストライクにより、年間75.6～116.5個体のイヌワシが死亡しているとしている (Smallwood and Thelander 2004)。彼等、カリフォルニア州エネルギー委員会の提言に事業地外での保護区の確保がある。同地域の風車群によるバードストライクで、イヌワシ個体群を消費しているから、緩和措置として代替保護地区を確保すべきとしてい

る。提言には「今後10年間で300個体のイヌワシが死亡したとすれば、保護区の面積は、300個体のイヌワシを保護するに足る土地面積の権利を入手すべき」と記載されている。

管理モデルは保護増殖措置によってオジロワシ個体群の増大を期待しているが、その具体化と実効性は、現時点(2007年5月)では明らかでない。道内で確認されているオジロワシ営巣地の繁殖成功率を調査し、成績の良いところは維持し、悪いところは生息環境を改善しつつ、全体として成功率向上を目指すことが必要であろう。計算機実験では良好な時期の繁殖成功率(1988～1995年)を用いており、実現不可能な数値ではないと思われる。

「オジロワシ保護増殖事業計画」(<http://www.env.go.jp/nature/yasei/hozonho/ojirowashi.pdf>, 2007/5/23確認)によれば、「生息及び繁殖地における生息及び繁殖環境の維持及び改善」の施策として、生息及び繁殖環境の維持及び改善、鉛中毒の防止、事故防止の対策および生息及び繁殖地における監視をあげている。このうち具体化されているのは鉛中毒の防止のみであり、それ以外の項目については現時点(2007年5月)で具体化されていない。残された項目の具体化が待たれるとともに、保護増殖事業に風力発電関係者が参加・協力(必要経費の負担も含め)できる方策を検討すべきだろう。たとえば、白木(1996)、植田・小坂(1996)および植田ほか(1999)は、オジロワシやオオワシの食物源としてのサケと河川環境に着目している。サケの上流への遡上を阻害している堰(ウライ)を外したり改良することが、越冬環境の改善につながるとしている。

残された課題

感度分析によれば、管理モデルの重要なパラメタとして、環境収容力 K と死骸調査の間隔日数が選定された。すなわちこの管理モデルを運用する場合、まず環境収容力 K の推定精度を上げること、次いで死骸の発見率を上げる重要性がそれぞれ示唆される。

残された課題を以下の四点に整理した。第一に、管理モデルで用いた施設数は259基で、これは2005年度末における北海道内施設の総数である。すなわち衝突係数の調整と保護増殖措置は、対象種の主な生息域で稼働しているすべての事業者による連携を想定している。鳥類共存のために事業者が相互連携して施設運用体制を変更することは、米国アルタモント地域で試みが始まっている(島田2006)。

第二に、衝突数(率)が施設数に依存するかも知れない中で、今後も北海道内の施設数が増加していくかどうかは現時点(2007年2月)で不透明である。北海道における風力発電の連系可能量は、短周期および長周期の調整力面から、25万kW程度となっており、現時点で既に全量が決定しているとされる(北海道電力株式会社『蓄電池による風力追加連系について』、<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g50606a34j.pdf> 2007/5/23確認)ものの、2010年目標300万kWに対しての達成率は低い。「自然エネルギー導入の目標量・義務量(第4回新エネ利用特別措置法改正検討委員会)」(<http://www.jca.apc.org/~gen/shinenkentou/4/0302huuryoku.pdf>, 2007/5/23確認)によると、2030年の目標値1,180万kWを提言している。新エネルギー・産業技術総合開発機構(2005b)も、2020年に1,000万kW、2030年に2,000万kWの目標を検討している。衝突数(率)は、定期的に更新する必要がある。

第三に、衝突死する個体の性別と年齢構成はランダムと仮定している。これまでの衝突事故報告(浅川ほか2004など)によると、幼鳥もしくは亜成鳥がほとんどで、性差については公表されていない。今後の資料の蓄積に伴い、衝突個体の性別と年齢構成に偏りがみられるならば、モデルを改良(管理モデルに密度効果を反映したレスリー行列を組み込む)する必要がある。

第四に、モニタリングによる個体群サイズの推定誤差 d について、式(24)を作成した。観測値には、観測誤差と過程誤差が含まれており、本来分離すべきものであるが、当該資料による分離作業は困難と判断し、今回は見送ることとした。したがってここで用いた推定誤差 d はすべて観測誤差として扱っているために、観測誤差としては過大評価している可能性がある。

この管理モデルは単一種に限らず、複数種にも応用できる。種別に管理モデルを策定し、保護増殖施策については種別に、衝突係数については種別に得られた値から最小を選択すればよい。

この管理モデルは、風力発電の立地環境と鳥類の生息環境がしばしば重複せざるを得ない狭い国土で両者が共存していくための提案である。膨大なデータ量に裏付けられた欧米の共存策に比べ、国内では、十分な衝突資料も揃わず感情的な議論(対立)が続いている。モデルが共存を模索する一助となれば幸いである。当面の課題として、死骸消失実験による消失日数の把握、発見率向上のための衝突自動監視装置等の開発、定期的な死骸踏査、個体群モニタリングによる成長率と個体群サイズ推定、

道内営巣つがいによる繁殖成績の把握を上げておく。

謝 辞

株式会社ユーラスエナジージャパンならびにエコ・パワー株式会社の関係者には、風力発電事業の概要について御説明頂いた。心より感謝する次第である。独立行政法人産業技術総合研究所の丸山康司博士には風力発電事業の採算性について、環境省自然環境局野生生物課には風力発電施設に係わる適正整備推進事業について、同釧路自然環境事務所にはオジロワシ・オオワシ保護増殖事業計画の進捗状況について、東京農業大学網走分校の白木彩子博士には、知床で繁殖するオジロワシの生産力について、それぞれ御教授頂いた。また査読者には有益な助言を頂いた。ともに感謝する。

引用文献

- 浅川満彦・吉野智生・相澤空見子・小野宏治・水野直治・横田博・長雄一・谷山弘行(2004) 北海道苫前にて発見された風力発電機に衝突死したとされるオジロワシ含む鳥類剖検所見と野生動物医学的検討課題. 日本鳥学会2004年大会(ポスター講演)
- Barlow J, Seven LS, Thomas CE, Paul RW (1995) U.S. Marine Mammal Stock Assessments: Guidelines for Preparation, Background, and a Summary of the 1995 Assessments. U.S. Dep. Commer., NOAA Tech. Memo. NMFS-OPR-6, p 73
- BirdLife International (2002) Action Plan for the conservation of White-tailed Sea Eagle (*Haliaeetus albicilla*)
- Erickson WP, Johnson GD, Strickland MD, Young Jr DP, Sernka KJ, Good RE (2001) Avian Collisions with Wind Turbines: A Summary of Existing Studies and Comparisons to Other Source of Avian Collision Mortality in the United States. National wind coordinating committee (NWCC) resource document:1-62
- Green RE, Pienkowski MW, Love JA (1996) Long-term viability of the re-introduced population of the white-tailed eagle *Haliaeetus alibicilla* in Scotland. *J Appl Ecol* 33:357-368
- *Helander B (in press) The international Colour-ringing programme — adult survival, homing and the expansion of the White-tailed Sea Eagle in Sweden
- 北海道経済産業局(2005) 北海道における風力発電の現状と課題～稼働状況とメンテナンスの実態～(平成15年度)
- 北海道産業保安監督部(2006) 北海道における風力発電の現状と課題～稼働状況とトラブル状況～(平成16年度)

- 北海道産業保安監督部 (2007) 北海道における風力発電の現状と課題～稼働状況とトラブル状況～ (平成17年度)
- 環境省 (1991) 日本の絶滅のおそれのある野生生物—レッドデータブック (脊椎動物編編)
- 環境省 (2002a) 地球温暖化対策推進大綱. 環境省地球環境局地球温暖化対策課
- 環境省 (2002b) 改訂・日本の絶滅のおそれのある野生生物2 [鳥類]
- 松田裕之 (2000) エゾシカの保護と管理=野生生物管理学入門. 環境生態学序説. 共立出版, 東京
- 松田裕之 (2004) 個体群管理とその限界. ゼロからわかる生態学—環境・進化・持続可能性の科学—. 共立出版, 東京
- 松田裕之 (2006) シカはどう増える、なぜ増える. 世界遺産をシカが喰う. シカと森の生態学. 文一総合出版, 東京
- Morrison M (2002) Searcher Bias and Scavenging Rates in Bird/Wind Energy Studies. Subcontractor Report: National Renewable Energy Laboratory/SR-500-30876:1-5
- 日本生態学会生態系管理専門委員会 (2005) 自然再生事業指針. 保全生態学研究 10:63-75
- 日本野鳥の会 (2004) 風力発電の鳥類に与える影響に関する評価. 111-161
- *Nygard T, Kenward RE, Einvik K (2000) Radio telemetry studies of dispersal and survival in juvenile white-tailed sea eagles *Haliaeetus albicilla* in Norway. *Raptors at Risk*. WWGBP/Hancock House, pp 487-497
- オジロワシ・オオワシ合同調査グループ (1996) 北海道と本州北部におけるオオワシとオジロワシの越冬数の年変動. 「平成7年度希少野生動植物種生息状況調査報告書」:1-9, 環境庁, 東京
- *Saurola P, Stjernberg T, Hogmander J, Koivusaari J, Ekblom H, Helander B (2003) Survival of juvenile and sub-adult Finnish white-tailed sea eagles *Haliaeetus albicilla* in 1991-1999: a preliminary analysis based on resightings of colour-ringed individuals. pp 155-167 (Helander B, Marquiss M, Bowerman W (eds.), SEA EAGLE 2000)
- 島田泰夫 (2006) 風力発電とバードストライク. 生物科学 57(4):233-242
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2005a) 風力発電のための環境影響評価マニュアル (第2版)
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2005b) 風力発電利用率向上調査委員会の風力発電ロードマップ検討結果報告書
- 新エネルギー・産業総合開発機構 (2005c) 風力発電導入ガイドブック (改訂第8版).
- 白木彩子 (1996) 越冬期の河川におけるオオワシ・オジロワシの生息状況とそれに関わる要因について. 平成7年度希少野生動植物種生息状況調査:1-9, 環境庁, 東京
- 白木彩子・中川 元 (2005) 知床半島におけるオジロワシの繁殖状況. *Stirx* 23:115-123
- Smallwood KS, Thelander C (2004) Developing methods to reduce bird mortality in the Altamont Pass Wind Resource Area. Final Report to the California Energy Commission, Public Interest Energy Research — Environmental Area, Contract No. 500-01-019. Sacramento, California. 531 pp
- Smallwood S, Spiegel L (2005) Assessment to Support An Adaptive Management Plan For The APWRA (<http://www.biologicaldiversity.org/swcbd/programs/bdes/altamont/CEC-assessment-mitigation-plan.pdf>, 2007/05/26確認)
- 田中昌一 (2001) 水産資源学を語る. 恒星社厚生閣, 東京
- Verhoef JP, Westra CA, Nijdam RJ, Kortering H, Eecen PJ (2003) Offshore Wind Energy and Noise Monitoring. OWEMES 2003 Conference, Naples (Italy):ECN-RX--03-012
- 植田陸之・小坂正俊 (1996) 北海道北部における秋期のオオワシの分布と食物との関係. 平成7年度希少野生動植物種生息状況調査:11-14, 環境庁, 東京
- 植田陸之・小坂正俊・福井和二 (1999) 秋期のオオワシとオジロワシの分布に影響する要因. *Stirx* 17:25-29

(*印を付したものは直接参照できなかった)