



論文要旨

平成 19 年 12 月 17 日

リスクマネジメント専攻	氏名	島田 泰夫
論文題名	風力発電事業の鳥衝突問題における順応的リスク管理	
<p>風力発電の技術開発が進むにつれ、国内の施設も大型化・大規模化しつつある。2006 年度末における国内の総設備容量は約 1,491 千 kW (1,314 基) に達した。これに伴い、風力発電施設への鳥類の衝突事故（バードストライク）が報告されるようになってきた。国内では、衝突数についての調査研究がほとんどない。地球温暖化抑制の有力な手段のひとつとして風力発電事業を選択するとき、より実証的で定量的な議論へ脱皮する必要がある。</p> <p>本論文の目的として、第一に欧米における風力発電への鳥類衝突事故に関する報告を収集・整理すること。第二に、猛禽類（ワシ・タカ類）の個体群モデルを構築して風車への衝突による個体群サイズの減少リスクを評価すること。第三に、衝突数に応じた順応的な稼働計画を立案した。第二と第三については衝突数に応じた稼働管理モデルを開発し、<i>AMUSE</i> と名付けた。</p> <p>第一に、既存文献調査によれば、米国カリフォルニア州エネルギー委員会は、アルタモント地域において調査を実施し、衝突死する鳥類は推定 40 種を越え、年間推定数死亡数は、発見率と分解・消失率で補正して、イヌワシで 75.6～116.5 個体/年（発見率による補正值～発見率と分解・消失率による補正值，以下同）であるのをはじめ、猛禽類全体（all raptors）で 881.4～1300.3 個体/年，鳥類全体で 1766.5～4721.3 個体/年とした。全米における風車への衝突数はおよそ 3.5 万と推定された。一方，National Wind Coordinating Committee (NWCC) は，相互比較を目的として自動車（航空機，鉄道を含む），建造物（とガラス窓），送電線，通信鉄塔への鳥類衝突調査事例を収集し，平均衝突数を求め，絶対量（主要道路の総延長キロ，建物数，送電線の総敷設キロ，通信鉄塔数）を乗じて，全米の衝突数を推定した。その結果，自動車への衝突 6,000 万～8,000 万（道路総延長 400 万マイル），建物への衝突 9,800 万～9 億 8,000 万（450 万棟のビルと 9,350 万戸の住宅），送電線への衝突 1 億 7,400 万（送電線総延長 50 万マイル），通信鉄塔への衝突 400 万～5,000 万（80,000 基の鉄塔），風力発電への衝突 1 万～4 万（15,000 基の施設）であった。なお，国内においてこのような資料はみあたらなかったが，ハンティング（狩猟）による捕獲数が公表されていた。日本における狩猟鳥類は 29 種，狩猟登録者数は約 20 万人である（2000 年）。平成 2，7，12 年度で年間 330 万～180 万個体の鳥類が捕獲されている。これらのことから，日本国内でもおそらく我々の想像以上の数の鳥類が何らかの原因で——事故と狩猟を含めて——死亡していると考えられた。</p>		

第二に、順応的管理を取り入れた鳥衝突リスク管理モデルを提案した。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。

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。

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

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

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。

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。

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

$$\text{ただし, } \lambda(t) = s \cdot F(p(t)) \cdot B(t)$$

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

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。

本論文の保全対象種とな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。

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

衝突個体群モデルを管理するために、式を次のように修正する。

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

ただし、 $c(t)$ は保護増殖施策による成長率の増分である。

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。推定誤差 d を伴うので、以下の式に従うと仮定する。

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

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。

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。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。

$$B_1 = B_{est} \cdot b_1$$

$$B_{end}=B_{est} \cdot b_{end}$$

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。

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。

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

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、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 $s_{est}(t)$ を推定した。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。

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

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

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。

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

$sF(p(t))$ 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_l 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_l 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。このときの衝突係数 F は次式であらわす。

$$F = S_{est} / X_{est}$$

X_{est} は PBR (潜在的生物学的捕獲数; Potential Biological Removal) を用いた。

第 2 に、推定個体群サイズ B_{est} が、 $B_{end} < B_{est} < B_l$ となるような場合、次式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)。

$$F = \max[(1 - F^*)(B_{est} - B_l) / (B_l - B_{end}) + 1, 0] \quad \text{ただし、} 0 \leq F \leq 1$$

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と仮定した。

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の各種パラメータ——成長率、環境収容力、衝突率、保護増殖措置による成長率増分等——を定めた。成長率については、レスリー行列を用いて、生存率については欧州の既存資料から、繁殖率については

国内のものから与えて、2通りの成長率データセットを作成した。2つの成長率シナリオと管理シナリオを用いて、4通り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。以上を式であらわすと：

$$t \text{ 年における設備利用率 } u_y(t)(\text{年}) = (1/12) \cdot \sum_{m=1}^{12} u_m(t, m)$$

t_1 年における管理対策用設備利用率 $u_{cy}(\text{年})$ は

$$u_{cy}(t) = (1/12) \{ \sum_{m=5}^{10} u_m(t, m) + \sum_{m=11}^{14} u_m(t, m) \cdot (1 - F(t)) \cdot g + F(t) \}$$

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、 $g = (1/2)$ 。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 $u_c = (1/17) [\sum_{t_1=1}^3 u_y(t_1) + \sum_{t_1=4}^{17} u_{cy}(t_1)]$

管理下の設備利用率 u_c と損益分岐となる設備利用率($u_{9\sim11}$)を比較することによって、事業の採算性を評価した。

計算の結果、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、必要に応じて衝突強度(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。

以上、国内でバードストライクに対する生態リスク管理の取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ため、汎用性は高いものと考えている。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。