総合政策　第15巻第１号（2013）pp.1-17
Journal of Policy Studies

球体モデルによる風車への鳥類衝突数の推定法

由井　正敏*・島田　泰夫**

要　　旨　風車に鳥が衝突する頻度を予測する数理モデルはいくつかあるが、風向によって回転ブレード面の向きが逐次変化する風車において、その衝突危険域の設定法には課題がある。また、ブレード回転面へ鳥が角度を変えて突入する場合を想定した簡易なモデルはまだ開発されていない。本稿は、これらの課題の解決のための１手法を提示しようとするものである。風車設置予定区域の中の衝突危険域は、ブレード長を半径(r)とする球体体積 n 台分の合計体積(S)とする。S を調査区域のブレードが回転する上端と下端の間の高度幅 M 内の空間体積(M_V)で割った比率に、観察で得た設置予定区域内の高度幅 M 内の総飛翔距離を乗じて、S 内の総飛翔距離(T_L)を求める。球体内の平均通過距離(m_{ave})は $m_{ave}=4r/3$ で得られる。これから、球体内に侵入する鳥の頻度(T_n)は $T_n=T_L/m_{ave}$ で求まる。このうちブレード面に突入する個体数(B_n) は $B_n \leqq T_n/2$ である。ブレード面への接触率を T、風車の修正稼働率を R' とすると、衝突個体数(T_N)は $T_N=B_n \cdot T \cdot R'$ により得られる。T は最大回転数($M_{ax}\ u$)における角度別接触率の平均、R' は風速の階級別頻度 q_i に風速別回転数(u_i)の比率 $p_i(=u_i/M_{ax}\ u)$ を乗じて合計した数値である。

キーワード　風車、鳥類、衝突数、球体モデル、オジロワシ

はじめに

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災で発生した福島第一原発の事故以降、国内では地球温暖化防止対策の一環として、再生可能エネルギーである風力発電への期待が高まっている。しかしながら、風力発電基地の開発に当たっては、景観阻害、低周波騒音の他に野鳥やコウモリ類との衝突の影響が懸念されている（日本野鳥の会 2007；北村 2012；白木 2012)。こうした中で 2012 年 10 月からは国のアセス法に風力発電が取り込まれ、自然や人との調和を目指した風力発電基地の開発が指向されている。

鳥類の衝突を防ぐ対策として環境省（2011）は「鳥類等に関する風力発電施設立地適正化のための手引き」（以下、環境省手引きと言う）を出し、重要生息地や渡りのコースの回避策、接近や衝突の防止策、衝突数の推定法などを示した。これまでも同様のマニュアル（Band et al. 2007；日本野鳥の会 2007）や、調査解析手法（Tucker 1996；Sugimoto and Matsuda 2011）が出されており、衝突数の調査、推定により鳥種別に個体群維持が可能か否かを判断する（島田・松田 2007）のが基本スタンスになっている。

従来、風車への衝突数は、設置予定区域内の鳥類観察に基づき、風車ブレード回転域（以下、危険域と言う）を通過する一定期間内の個体数、ブレードへの接触率、回避率、及び風車の稼働率などから推定している。しかし、危険域の設定法、侵入頻度やブレード回転面での接触率の推定法、あるいは風車稼働率の定義の仕方については、どの方法が適切であるかの判断が難しく、以下に述べるように課題が残されている。なお、回避率については最近総括的な報告（Scottish Natural Heritage 略称 SNH 2010;BTO 2012）が出て調

*　東北鳥類研究所　〒 020-0173　岩手県滝沢村滝沢字巣子 152-137
**（一財）日本気象協会首都圏支社　〒 170-6055　東京都豊島区東池袋 3-1-1

査解析が進んでいるものの、国内において回避率が算出された鳥種は少ない（Sugimoto and Matsuda 2011）。上記の SNH（2010）では回避率が解明されていない種には 98% の回避率を当てはめることが推奨されており、回避率は一般に高い。本論文では回避率についてそれら先行事例を参照して取り込むこととする。

危険域は、Band et al.（2007）や九州響灘の解析（生物及び自然環境定量評価研究会 2002）では幅の狭い円盤型である。前者は危険域に入った個体はブレード回転面に直角方向のみから侵入すると仮定し、後者では斜方衝突を一部導入しているが、いずれも危険域の側面からの侵入を考慮していない。Tucker（1996）は斜め侵入を面的危険域の解析に含めているが、侵入個体の形を矩形と仮定しているなど､接触率推定式が複雑である。Sugimoto and Matsuda（2011）は直列に並んだ風車を正面から見た断面積への侵入頻度を扱っているが、ばらばらな配置方式が多い陸上風車基地への適用場面は限られると思われる。環境省手引きを含めて、設置予定区域内の飛翔頻度から危険域への侵入頻度を合理的に算出する普遍的手法はまだない。

本論文では、こうした課題のいくつかを解消するため、斜め衝突も考慮して風車回転域を球体とみなし、それを鳥類の衝突危険域として衝突個体数を推定する手法を提案するものである（以下、新モデルと言う：特許出願識別番号 512212807）。また、既存の解析例と新モデルの比較等を行った。

Ⅰ　新モデルの骨格

風車設置対象区域に n 台の風車建設が予定されている場合に、各ブレードの回転域、つまり球体部分を衝突危険域とする。現地調査結果から、危険域にランダムに侵入する鳥の個体数を推定する。その中でブレード回転面へ向かう個体数を求め、斜方からの突入も考慮したブレード接触率を当てはめて衝突数を得る。その際、風車基地の稼働率についても再検討した。以下に計算の順序の骨格を示す。主要パラメータの算出根拠はⅡ章に述べる。計算に当たっての詳しい前提条件はⅢ章に述べる。本稿で使用する数式の記号一覧を巻末の付表１に示す。

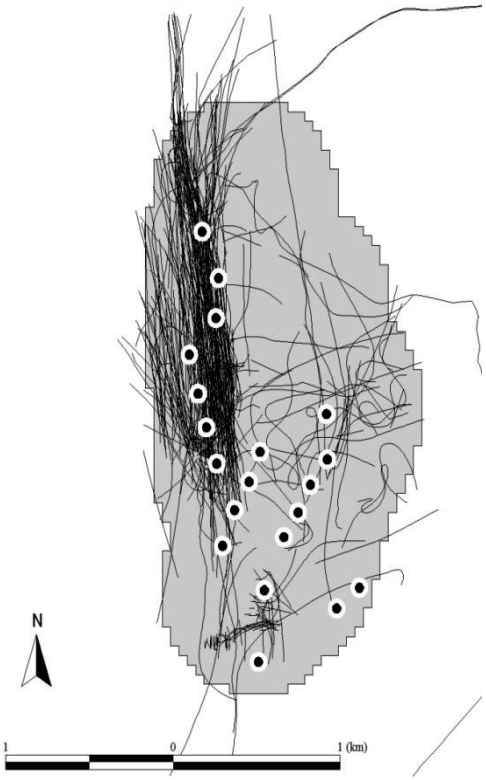


図１　風車設置対象区域 A のモデル図：環境省手引き p5-30 の図 5-20 を改変。

①設置対象区域の全面積：A（m^2）

全体のイメージを図１に示す。淡色部がＡ区域。黒ポツ○印が風車位置、黒線は鳥の飛翔軌跡。

②風車が回転する高度幅：M（m）（回転するブレード域の上端と下端の間の幅）

③高度幅 M の空間全体積　M_V（m^3）：

$$M_V = ① * ② = A \cdot M \quad (1)$$

④風車全台数（n）の合計球体体積＝全衝突危険域　S（m^3）：

$$S = n * 1\text{台の球体体積} = n \cdot (4/3) \cdot \pi r^3 \quad (2)$$

ここで r は風車回転半径＝ブレード長（m）

⑤全衝突危険域（合計球体体積 S）の体積比 P_V：

$$P_V = ④/③ = S/M_V \quad (3)$$

⑥ S 内の対象種の総飛翔距離　T_L(m)：

対象区域 A 内の高度幅 M 内における対象種の総飛翔距離を M_d とすると

$$T_L = ⑤ * M_d = P_V \cdot M_d = S \cdot M_d / M_V \quad (4)$$

⑦ S 内における対象種の通過頻度　T_n：

$$T_n = T_L / m_{ave} = (S \cdot M_d) / (M_V \cdot m_{ave}) \quad (5)$$

ここで m_{ave} は 1 台の風車球体内の平均通過距離（m）で、その算出方法はⅡ-1 に示す。

⑧ブレード面への突入個体数　B_n:

$$B_n \leqq T_n / 2 = (S \cdot M_d) / (M_V \cdot m_{ave} \cdot 2) \quad (6)$$

ここで分母の 2 は球体内突入個体がブレード面を横切る確率が 1/2 であることを意味する（Ⅱ-2 参照）。

⑨総衝突個体数　T_N:

$$T_N = B_n \cdot \text{接触率}\ T \cdot \text{修正稼働率}\ R' \quad (7)$$

ここで接触率 T は風車の規格における最大回転数で回っている時（Ⅱ-4-①も参照）にブレード面を通過した個体が、ブレードと接触する確率で、対象種ごとの飛翔速度と侵入角度別接触率から得られた接触率の平均値である（Ⅱ-3 参照）。修正稼働率 R' は、対象地の風速に応じて回転数が変動する場合の接触率の変化を反映した稼働率である（Ⅱ-4 参照）。

⑩回避率 e（Ⅱ-5 参照）における総衝突個体数

$$T_{Ne} : T_{Ne} = T_N \cdot (1 - e) \quad (8)$$

Ⅱ　主要パラメータの算出方法

1. 球体内の平均通過距離 m_{ave}

m_{ave} は 1 台の風車の回転球体内を鳥がランダムに直線的かつ水平に通過する（図 2）と仮定した場合の平均通過距離である。球体を薄く水平に輪切りにした各円盤の平均通過距離は円盤面積÷直径で求められるので、その全平均つまり m_{ave} は球体体積を半径 r の円形面積で割って求められる。

$$m_{ave} = [(4/3)\pi r^3] / \pi r^2 = 4r/3 \quad (9)$$

環境省手引き (2011) の事例 (p5-30) ではブレード半径が 25 m であるから、m_{ave} = 33.33 m になる。

2. ブレード面の通過個体数 B_n

球体の球面から侵入した鳥は、図 3 に示すよう

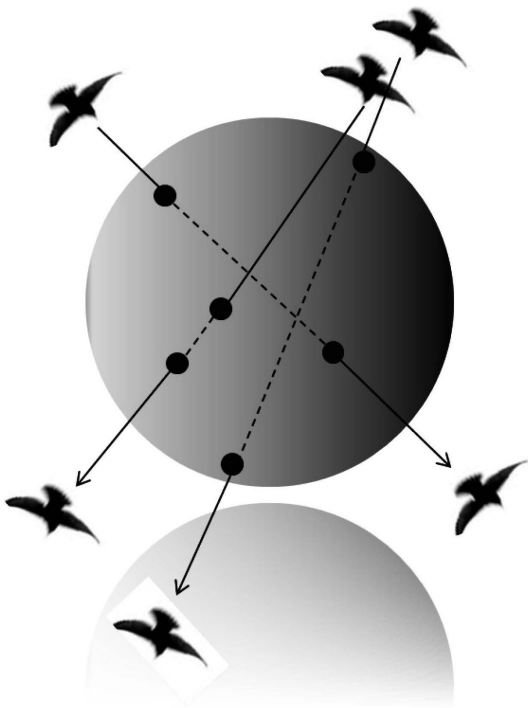


図２　球体を水平に通過する鳥の軌跡の模式図：球体内を様々な位置から水平に通過する際の平均距離は、球体内水平面の２点をランダムに選択しその全平均を求めることに等しい。水平通過ではなく立体通過でも同じ結果になる。

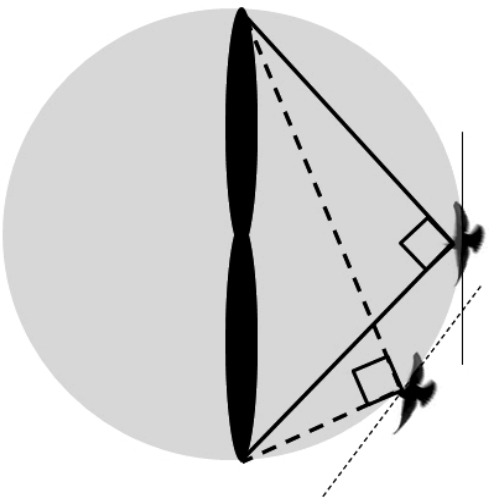


図３　球体内に侵入した鳥がブレード回転面を通過する場合の模式図：風車上部から見た中央部の横断面図であるが、Ⅲ-条件１に述べるように鳥は水平に飛ぶことを仮定しているので、どこで輪切りにしても同じ結果となる。

にブレード面に対しては常に90°の角度幅（円弧上の１点から円中央線の両端を結ぶ角度は常に90°である）の中で突入する。この場合、円弧の接線方向の余角（ブレード方向へ進まない角度）も常に90°の幅がある。したがって、球体内にランダムに侵入した個体がブレード面に突入する確率は常に1/2となる（ただし、Ⅲ－条件３末尾を参照）。

3. 接触率 *T*

Band et al.（2007）や環境省手引き（2011）では、ブレード面への突入角度は90°つまり常に垂直に突入することを前提としている。しかし国内でも希少猛禽類が斜めから衝突したと言う情報があることから（未公表）、実際には様々な角度で回転するブレード面へ侵入すると仮定する方が妥当であろう。

そこで角度別突入時における接触確率を求め、その平均値である *T* を計算する。これに対して季節風が吹く時期の渡り鳥を扱う場合で、ブレード面も渡りも特定の方位を向く場合の接触率についてはⅣ-3で示す。

①オジロワシ *Haliaeetus albicilla* の接触率の計算例を示す。図４は角度（θ）45°でブレード面に突入する場合である。図鑑類からオスメスこみの平均体長 ℓ（0.87 m）、平均翼開張 w（2.14 m）を求め、飛翔時の体型を手書きで図化する。ブレード面（ここでは平面とするが本来はブレードの厚みがあるのでそれを追加した計算が必要：下記③参照）を横断して通過する距離は、図上で計測すると2.3 mになった。環境省手引きによるとオジロワシの飛翔速度は10.6 m/secとしているので、通過に要する時間 t 秒は2.3/10.6＝0.217秒となる。つまり、

t＝ブレード面通過距離 L/飛翔速度 V　　(10)

風車が環境省手引き（2011）と同様2.5秒に１回転するとして、ブレード１枚が t 秒動く間にブレードの円形回転面を掃引する面積の割合（掃引面積率）は0.217/2.5である。ブレードは３枚あるので３枚のブレード合計の掃引面積率（T_θ）

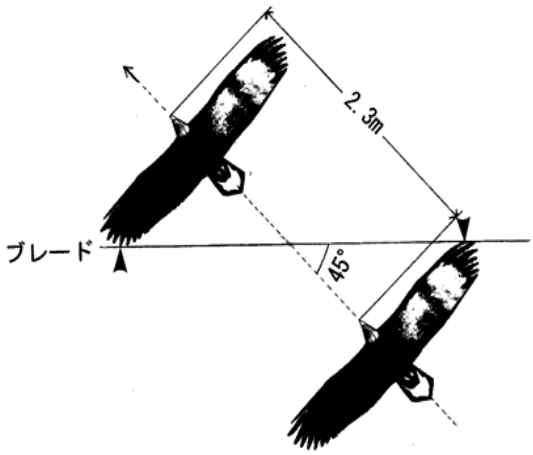


図４　オジロワシがブレード回転面へ45°の角度で突入する模式図

は3・0.217/2.5＝0.26になる。つまり角度別掃引面積率（T_θ）はブレード面の通過時間を t（sec）とし、

T_θ＝(3枚・t)/1回転の秒数 s＝(3・t)/s　　(11)

で求まる。この計算方法は環境省手引き（2011）の方法（p5-32）と同じ結果を示すが、計算がより簡単である。この角度別掃引面積率は角度別接触率 T_θ と同義である。

以上の例は角度45°の場合であるが、手書き図の角度を順次変えて0～90°の間の角度別接触率を図上で求めてプロットしたものが図５である。

この図によって得た回帰式を用いてさらに1°ごとの接触率を求めた結果を付表2a欄に示す。

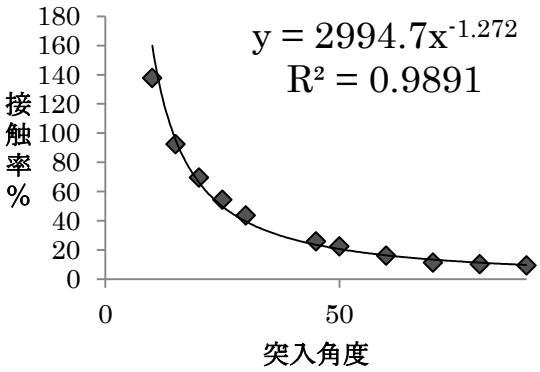


図５　オジロワシの接触率を手書図で計算した例

ブレード面突入角度が 14.5° 以下になると 100% ブレードに接触するので、付表 2a 欄の 14° 以下はその値を用いている。1° ごとの接触率 T_θ を全方位（0°～360°）について平均値を求めると 0.3924（39.24%）となり、これが平均接触率 T である。

図 4 は鳥種（特に飛翔時の体型）やブレードの厚みにより変化し、また図 5 は鳥種ごとの平均飛翔速度、ブレード回転数などで変化する。オジロワシで飛翔速度やブレード回転数が異なる場合、図 5 の Y 軸の値を上記（10）、（11）式を用いて変更すればよい。しかしながら、図 4、図 5 を鳥種ごとに作成するのは煩雑なことから、以下に鳥の飛翔型を模式化した図による解析法を示す。

② Band et al.（2007）と同様に体長 ℓ の 1/2 の箇所で翼開張（w）を十字クロスさせる。図 6 に示すように角度 θ で鳥がブレード面に突入する際の通過距離 L は、

$$L = w/\tan\theta \qquad (12)$$

オジロワシ、オオワシ *Haliaeetus pelagicus*、イヌワシ *Aquila chrysaetos*、チュウヒ *Circus spilonotus* の 4 種で推定した L は、突入角度が約 68° より急になると、すべて各鳥種の体長と同じ値になった。約 68° の角度は図 7 に示すように、$0.5w/0.5\ell$、つまりアスペクト比（w/ℓ：通常は ℓ として翼の縦幅を用いるが、ここでは体長を使う）をラジアン角度に変換して tangent 角度

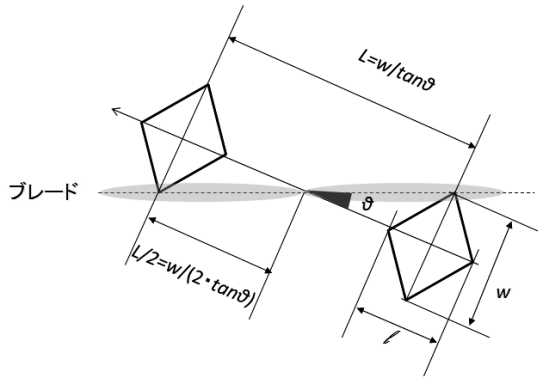


図６　ブレード回転面通過距離 L をモデル図から算出する方法

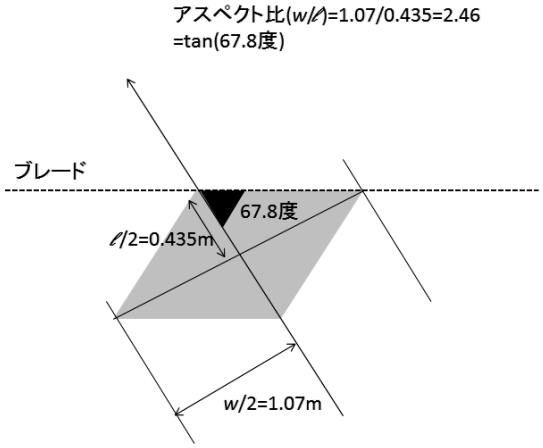


図７　ブレード回転面を通過する距離 L が体長と同じ長さになる角度を求める方法

を求めた値に等しい。上記 4 種のアスペクト比は 2.26～2.45 の範囲にあり、tangent 角度は 66° 以上 68° 以下に収まっている。この方式による突入角度別接触率はオジロワシの場合で付表 2b 欄のようになる。表 2b 欄最下段の平均接触率は T=0.3868 となり、図 4 から求めた T=0.3924 とほぼ等しい。

図 6 では翼のクロス位置を体長の 1/2 の箇所にしているが、実際のクロス位置は頭部から 1/3 付近である種も多い。しかし、1/3 部位でのクロス図から計算した数種の鳥類の接触率は、図 4、5 から求めた数値との違いが大きいため、ここでは 1/2 のクロス位置を使うこととした。

③ブレード厚み（b）と Band et al.（2007）が考慮しているピッチ角（強風時の破損を防ぐためのブレードの傾き）の変化による上から見たブレード幅（ブレード幅をコードと言い、それを上から見た場合の幅：c）は、必要に応じて L に加える。ブレード厚み（b）のみ考慮する場合は、式（12）に b の斜距離を加えて

$$L = (w/\tan\theta) + (b/\sin\theta) \qquad (13)$$

最近の大型風車では通常運転時（風速 10 m くらいまで）には、ブレードは傾きをほとんど持たず（ピッチ角度＝0°）、上から見ればブレード厚み（b）のみになる。ブレード平均厚み 0.3 m を

仮定したオジロワシの接触率は、付表2c欄に示すように平均0.4313（43.13%）になり、ブレード厚みを考慮しない場合の接触率（38.68%）に比べて約4.4%の増となっている。なお、Band et al.（2007）のピッチ角16°の場合のように、上から見たブレード幅cが大きい場合はこれも上式に追加する。ただし、上述のように運転時のピッチ角度が大きくなるのは強風の際であるが、強風が吹く割合は非常に低い（後述の付表3参照）ことから、平均接触率を用いる場合にピッチ角を考慮する必要はほとんどない。

4. 修正稼働率R'について

環境省手引き（2011）では、R'の代わりに設備利用率R=25%を用いている（ただし2012年12月に80%（http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=13331に修正）。設備利用率とは風車の機種ごとの定格出力による一定期間の総発電予想量で実際の発電量を割った値である（NEDO 2008）。イギリスのマニュアルは稼働率75%を用いている（Band et al. 2007）。稼働率は一定期間の総時間に対する実際の運転時間の比である（NEDO 2008）。

式（7）で用いたTは最大回転数（$M_{ax}\ u$）の際の接触率であり、また環境省手引き（2011）の設備利用率はその最大回転数の場合である。風速によってブレード回転数が変化するので1回転に要する秒数sも変化する。式（11）から、接触率T_θも変化し、平均接触率Tも変わる。接触率は風速に応じた回転数（u_i）を勘案したものに修正する必要がある。そこで、風速によって変化する接触率と稼働率をTに対する修正係数として一体化させた数値が修正稼働率R'である。以下にその求め方を示す。

①風速階級別頻度表の作成

対象地における風速階級別頻度表を得る。カットイン風速（風車が発電を開始する風速）とカットアウト風速（風車が発電を停止する風速）の間の風速別ブレード回転数を風車機種の規格に基づいて整理する。風車は強風時にはピッチ角を調整してほぼ一定の回転数（定格回転数と言う）になる。$M_{ax}\ u$はその際の回転数を用いるのが良い。なお、風速階級別頻度表が入手できない場合は、NEDOの風況マップ（http://app8.infoc.nedo.go.jp/nedo/top/top.html）等によりその地域の平均風速の情報を得て「風力発電導入ガイドブック（第9版）」（NEDO 2008）p82のレーレ分布を利用する（応用例は付表3参照）。ただし、NEDO風況マップの解像度は500 mメッシュのため精度は低下する。

②風速別の接触率

式（11）により、接触率Tはブレード1回転に要する秒数s_iに反比例する。s_iは

$$s_i=60/u_i \tag{14}$$

ここで最大回転数$M_{ax}\ u$における1回転所要秒数をs_{min}で表記すると

$$T_\theta=3\cdot t/s_{min} \tag{15}$$

この角度別接触率T_θを平均したものが式（7）のTに相当する。s_{min}は

$$s_{min}=60/M_{ax}\ u \tag{16}$$

ここで、角度別風速別の接触率を$T_{\theta i}$とすると

$$T_{\theta i}=3\cdot t/s_i \tag{17}$$

ここで、風車の最大回転数または定格風速時の回転数（$M_{ax}\ u$）を1とした場合の、それ以下の回転数の比率をp_iとすると

$$p_i=u_i/M_{ax}\ u \tag{18}$$

式（14），（16），（18）から

$$s_i=s_{min}/p_i \tag{19}$$

これを式（17）に代入して

$$T_{\theta i}=(3\cdot t/s_{min})\cdot p_i=T_\theta\cdot p_i \tag{20}$$

となる。この角度別風速別接触率$T_{\theta i}$を角度について平均したものが風速別接触率T_iになる。つまり、風速別の接触率T_iは、最大回転数における平均接触率Tに回転数比率p_iを乗じた値となる。

$$T_i=T\cdot p_i \tag{21}$$

③風速分布に基づく修正稼働率R'

風速別の接触率T_iに①で求めた風速頻度q_iを乗じ、風速頻度で按分した風速別の接触率T_jを求める。

$$T_j=T\cdot p_i\cdot q_i \tag{22}$$

カットイン風速（q_{in}）からカットアウト風速（q_{out}）の間のT_jを積算し、修正接触率T'を求める。

$$T' = \sum_{q_{in}}^{q_{out}} T_j = \Sigma(T \cdot p_i \cdot q_i) = T \cdot \Sigma(p_i \cdot q_i) \quad (23)$$

この式の$\Sigma(p_i \cdot q_i)$が修正稼働率R'である。

なお、最近の大型風車ではカットイン風速時（2-3 m/sec）の回転数で、ブレード先端の回転速度は数10 km/hourに達するので、鳥が回転ブレードに衝突する可能性があると推測される（Ⅲ章参照）。カットイン風速以下及びカットアウト風速以上の風速頻度は除外されていることから、R'は従来の稼働率さらには設備利用率よりも、現実的な値であろう。

付表3に、平均風速を6 m、風速分布のパターンを示す形状係数$k=2$（標準値）とした場合の風速分布（レーレ分布）をNEDO（2008）の式（同表の注参照）を用いて算出し、環境省手引き（2011）のp5-31にある最大回転数24回/分を用いてR'を求めた例を示す。カットイン風速は3 mで回転数は6回/分、カットアウト風速は25 mで回転数は最速の24回/分と仮定し、回転数は直線的に増加するものとした。この結果、R'は0.3319（33.19%）となり、環境省手引き（2011）の施設利用率25%より約8%大きくなった。

風力発電のアセスメントでは、風況データが得られており、導入予定の風車規格も判明していることから、修正稼働率R'が風速頻度の実測値と規格諸元値から求められる。

5. 回避率について

風車基地を設置する以前の飛翔状況から推定した衝突予測個体数（T_N）と、設置後の風車群に実際に衝突死した個体数（D_T）を用いて、下記の式で計算した値が回避率eである（Scottish Natural Heritage 2010）。

$$e = 1 - (D_T / T_N) \quad (24)$$

風車を回避する行動は、鳥が設置された風車基地に侵入しないように予め飛行コースを変更したり、個々の風車の球体危険域に侵入するのを避けたり（Dosholm et al. 2005；Masden et al. 2009）、あるいは回転するブレードに気付いて寸前に回避する行動などであり、回避率はこれらを合わせた全回避行動の結果として風車への衝突を逃れた割合になる。本論文では回避率自体の解析は行わなかったが、はじめにで述べたように回避率は衝突数推定に組み込むべき重要なパラメータである。

Ⅲ　衝突個体数推定における前提条件

新モデルにおける仮定や前提条件を以下に整理し、それに関連する考察を一部加えた。

条件1：鳥類は風車の球体危険域内では羽ばたかずに体軸の方向に直線的かつ水平に飛翔するものとする。羽ばたいている際には翼開張は断続的に短くなる。ここではそれを考慮せずに鳥の安全側に立って公表されている翼開張をそのまま用いる。

なお、球体危険域内を鳥が上昇、下降で通過する場合でも、球体内侵入確率、ブレード面突入確率（下記　条件3参照）、平均通過距離は水平飛行の場合と理論上変わらない。上昇・下降時で飛翔速度が異なればブレード面通過時間は変化するが、ここでは水平移動距離による平均飛翔速度で処理し、接触率の計算に用いる。また、上昇・下降飛翔の場合、ブレード回転域の通過時間が若干増加するので、上昇飛翔の多い断崖部などでは接触率の計算に考慮が必要になる。

条件2：風向きによる飛翔速度の違いは平均値を用いる。追い風（downwind）・向い風（upwind）で鳥の飛翔速度（したがって衝突リスクも）は当然異なるが、本モデルは観察あるいは文献によって得た平均飛翔速度を用いる。追い風・向い風別の平均飛翔速度、飛翔頻度が分かれば条件別の衝突個体数を新モデルで計算できる。なお、風向きによる衝突率の差異はTucker（1996）やBand et al.（2007）に扱われている。

条件3：鳥は球体危険域にランダムな方向から侵入する。

この仮定によって、式（9）の球体内平均通過距離m_{ave}が推定できる。ランダムな方向からの侵入は繁殖期行動圏内での探餌飛翔や、渡り途中

の滞在時などに見られると思われる。一方、風車危険域への侵入方向がほぼ一定で風車ブレード面もほぼ一定の方向を向くような場合には、Ⅳ-3で示す楕円形の危険域を想定するモデルで衝突個体数を推定できる。こうした一定方向への飛翔は渡り移動時や特定の餌場との往復時に多く見られると思われる。

ブレード面へ浅い角度で突入する場合、ブレード面に突入する円弧上の範囲が限定されブレード接触域が狭くなるので、角度別接触率（T_θ）の平均値を用いるのは誤りのように見える。そこで、円弧上からランダムに突入するのではなく、球体外部からすべて直線的に突入する（その場合、式(6) 分母の２は用いない）と仮定した場合に、突入角度により狭くなったブレード接触域の衝突断面積（図９参照）の全円面積に対する比で突入頻度（p'）の相対値を出し、それに角度別の接触率（T_θ）を乗じた変換接触率（$=p'\cdot T_\theta$：付表2d参照）を求めた。90°で突入する場合を$p'=1$とする。積算して平均した結果は0.1765であり（付表2d欄の最下段）、新モデルの式（7）における平均接触率（$T=0.4313$：付表2c欄の最下段）の1/2以下となった。この数値は鳥種、飛翔速度、風車規格などによって変化する。表2c欄に示すように狭い角度ほど接触率Tは高いが、その場合の断面積比は低いことから、断面積比から計算した変換接触率は一般に式（7）のTより低い値をとる。実用上は式(6)の分母２を用いるのが簡単である。

条件４：風車ブレード面は上に向かって風車中心部（ブレード３枚を支える柱の鉛直軸）方向に若干傾いており（チルト角と言う）、またナセル（ブレード３枚の結節点の発電機格納庫）中央から風車回転部が若干前に突き出しているが、球体危険域の設定に大きな影響は与えないためここでは無視する。

条件５：鳥は回転するブレードの歯の部分（厚みb）に衝突し、ブレードの幅部分（コードと言う）に側方からは突入しないものとする（図８）。

コード部分に側方から当たることを考慮する際には、３枚分のブレード面積を回転掃引面積の計算に追加することで対応する。風車のナセルに近い部分のブレード幅や厚みは特に大きいのでより多く衝突するかどうかの問題がある。松浦(1974)は車の速度が40 km（秒速11 m）以下なら鳥は回避可能であると言う。Bolker et al.（2006：http://www.cs.umb.edu/~eb/windfarm/paper072706.pdf）はTucker（1996）の論文に関連して秒速25 m（時速90 km）以下で鳥は車を避けられるとしている。ブレード長40 mで３秒に１回転の場合、回転速度が時速40〜90 kmになるのはナセルから約6〜12 m部分までであり、ブレード幅や厚みはまだかなりあるが、鳥からは幅のあるブレードは（昼間は）良く見えるので回避しやすいと思われる。また、その部位の球体体積比は全球の3%以下、面積比でも9%であり衝突数に及ぼす影響は小さい。一方、ブレード先端部は回転速度が速く、ブレードが鳥から見えにくくなるモーション・スミア現象（Hodos 2003）もあって当たりやすいと思われるが、ブレード厚みや幅はより狭いことから平均的な衝突率は大きく変わることはないと思われる。

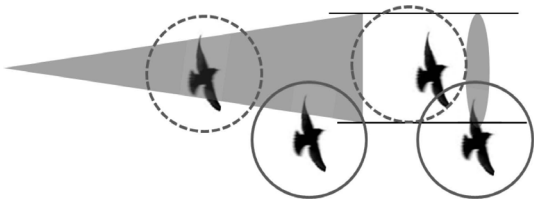


図８　条件５を説明する模式図：左側の横三角型はブレード掃引面、右側の紡錘形はブレード断面図。実線円内の鳥がブレード下端（歯の部分）に当たり、破線円内の鳥はブレード側面に当たらない。

Ⅳ　結果と考察

本章では、新モデルの妥当性を比較検証するとともに、特定条件下での衝突数の推定法等を述べる。

1. 新モデルの妥当性の検証

ここではBand et al.（2007）がチュウヒの衝突数推定に使ったデータ（以下Bandデータと呼

ぶ）を用いて、新モデルによる計算結果と Band らの方法による計算結果を比較する。

Band データから、調査区域（172 ha）の球体内危険区域（風車台数 37 台）における滞在期間内のチュウヒ飛翔時間は 48.12 秒である（＝1580 秒×37×[$4\pi r^3/3$]/89440000）。風車の半径は 26 m であり、Ⅱ-1 から球体内の通過距離の推定平均は 34.667 m になる。チュウヒの飛翔速度は 8 m/sec であり、球体内を通過する平均時間 34.667/8＝4.333 秒である。滞在時総飛翔時間 48.12 秒を 4.333 秒で割ると、球体内を 11.105 回通過することになる。ここで式（6），（7）を当てはめるが、接触率は Band データのチュウヒ体長 0.5 m、翼開張 1.2 m をもとに付表 2 のオジロワシの例と同様に計算する。その際、Ⅱ-3-③に関連してブレード幅 b（0.3 m）の代わりに Band データ（p26 Table4）のピッチ角 16° とブレード部位別コード幅から平均コード幅 c（上から見た幅）を求めた。その結果、平均で c=0.425 m となり、1 回転所要時間 1.91 秒と式（10），（11），（13）を用いてブレード面へランダムに突入する場合の平均接触率は 0.4822 が得られた。年間設備利用率として、ここでは Band データの稼働率 75％ をそのまま用いる。式（7）から新モデルによる総衝突個体数 T_N は

$$T_N = (11.105/2) * 0.4822 * 0.75 = 2.008 \quad (25)$$

Band データの期間内推定衝突数は 1.502 羽（厚みのある円盤の直角通過個体 11.19 羽×接触率 0.179×稼働率 0.75）となっており、新モデルの計算結果と見かけ上は近い。しかしながら、Band らはブレード面へ直角方向（90°）でのみ突入すると仮定しているので、その場合の平均通過距離 L' を求めると

L'＝チュウヒ体長（0.5 m）＋

ピッチ 16° の平均 c（0.425 m）＝0.925 m　（26）

となり、式（11）から接触率 $T_{90°}$＝（0.925/8）＊3/1.91＝0.1816 が得られ、新モデルによる平均接触率 0.4822 の 1/3 程度である。この値は Band データ（p26,Table 4）の平均接触率 0.179 にほぼ等しい。その場合の総衝突個体数 T_N は式（25）の接触率 0.4822 の代わりに 0.1816 を入れて 0.756 羽であることから、Band らの式による T_N＝1.502 羽は過大推定になっている。この原因は、Band らが式（26）の 0.925 m の代わりに、上から見たブレード最大幅 c（2 m）とチュウヒの体長（0.5 m）を足した厚み 2.5 m の円盤を衝突危険域体積として用いているためであろう。そのため、衝突危険域の体積比が 2.5/0.925=2.7 倍大きくなり、式（4）の一定期間内飛翔延長、したがって通過時間が大きくなり、T_N の推定値も大きくなる。一方、斜め衝突を考慮しないため平均接触率が 0.1816/0.4822=0.38 倍小さくなり、全体では 2.7×0.38=1.03 倍で、結果として新モデルの推定値に近い値になったものと思われる。

なお、Band らの式（2）について、向い風、$\alpha < \beta$（$\alpha = v/r\Omega$：Ω は角速度、$\beta = \ell/w$）の条件下で書き換えると、

$$p(r) = 3(c \cdot \sin\gamma/t + c \cdot \cos\gamma/2\pi r + \ell/(v \cdot s)) \quad (27)$$

となる。ここで 3 はブレード枚数、c は Band データで言うコード幅、γ はピッチ角である。式（27）の括弧内の第 1 項は新モデルのブレード厚みを考慮したものと、第 2 項はⅢ章条件 5 のブレード面積の追加の記述と、また第 3 項は新モデルの式（11）と各々同義である。結局、Band らの方法は、ブレード厚みの代わりにコード幅を用い、ナセルからの距離別の衝突確率を計算して積算したものである。しかし、ブレード面への斜め衝突を考慮せず、衝突危険域の設定にも不備があると言うことになる。

2. 環境省手引きの事例との比較

環境省手引き（2011）の p5-32 の希少猛禽類（オジロワシを想定）の事例では、回避率 90％ で一定期間内の衝突個体数は 0.031 羽となっている。そこで、衝突危険域を円球とした新モデルで総衝突個体数 T_{Ne}(90) を、環境省手引き p5-30～32 の事例によるパラメータを用いて式（7）で計算して比較する。

体積比 P_v=0.00662、T_n=7513 m/33.33 m=225.4 羽、B_n=112.7 羽となり、接触率 T=0.3868、修

正稼働率 R'=0.3319、回避率 90% の場合で、T_{Ne}(90) =1.447 羽（ブレード厚み無しの場合）となった。この数値は環境省手引きの衝突個体数 0.031 羽の約 47 倍になっている。

環境省手引きの事例では、風車設置予定域における高度 M の飛翔頻度を 111 回（p5-31 上段）、観察日数 16 日を滞在期間 180 日に換算し、平面積比（$\pi r^2 \cdot 20/A$）=0.01 として、上空から見た場合の危険域面積（以下、平面危険域と言う）内への侵入個体数が 12.49 羽と計算できる。環境省手引きではこの侵入個体（12.49 羽）のすべてが直角（つまり接触率 0.096：付表 2 ではオジロワシの体長を平均 0.87 m としているので接触率は付表 2a 欄の 90° で 0.0985）にブレード面に突入すると仮定して、回避率 90%、設備利用率 25% を用いて、T_N=0.031 羽が算出されている。新モデルではブレード面突入個体数 B_n は上記のように 112.7 羽であり、この段階で約 9 倍（112.7/12.49）の違いがある。接触率は環境省手引きで 0.096、新モデルでは 0.3868 なので、ここで約 4 倍の違いがある。さらに新モデルの修正稼働率 R' =0.3319 は環境省手引きの設備利用率 0.25 に比べて 1.33 倍になっている。したがって合計では新モデルの衝突個体数は、環境省手引き（2011）の約 47 倍（9×4×1.33）になる。

ブレード面突入個体数の差違が大きいが、この理由は以下による。環境省手引きの平面積比 0.01 を用いた場合、軌跡数の頻度が 1/100 になるが、実際の風車が回転する平面危険域（図 1）への侵入軌跡数は 1/100 ではなくかなり多い。これは軌跡が通常は長い距離を持つため、風車ごとの平面危険域を何回も通過するからである。環境省手引きでは高度 M における軌跡長 L の割合（L/全域軌跡長）が出現頻度の割合（0.41）と偶然に一致していたため、それ以降は軌跡長による解析をしていない。高度 M の軌跡長は p5-31 上段で 100912 m であることから、これに日数換算と平面積比を当てはめて平面危険域の総通過距離は 11353 m となる。環境省手引きではこの数値を用いて侵入個体数を求める手法は提示されていない。そこでⅡ-1 の手法から平面危険域の平均通過距離 m' を求めると、

$m' = \pi r^2$/直径 50 m = 39.27 m

これにより平面危険域通過個体数 $T_{n'}$ は

$T_{n'}$ = 11353 m/39.27 m = 289.1 羽

これは、上に示した新モデルの T_n=225.4 羽に近いレベルの値となっている。平面危険域に侵入した個体（289.1 羽）の 2/3（円球体積÷平面危険域の高度 M 内の体積 =$(4\pi r^3/3) \div (\pi r^2 \cdot 2r)$）、192.7 羽がブレード面に直角に突入する。したがって、192.7 羽に接触率 0.0985、修正稼働率 R' =0.3319 を乗じれば T_N=6.277 羽となる。

回避率 90% で　　T_{Ne}(90) = 0.628 羽

となり、球体危険域で計算した上記の 1.447 羽の半分以下となるが、環境省手引きの 0.031 羽の約 20 倍である。

環境省手引きの解析事例は、1 回ごとの飛翔軌跡が長い渡り時期のオジロワシの事例で、しかも飛翔頻度の平面積比を用いたために衝突予測数が過小評価になった。飛翔軌跡が短くしかもランダム方向に飛翔するような場合には、環境省手引きの方法と新モデルの計算結果は 47 倍もの差違にはならないと考えられる。なお、環境省手引き修正版（前出）の改訂稼働率 80% を仮に用いれば、衝突数は新モデルで環境省事例の約 15 倍となる。また、九州響灘での解析方法（生物及び自然環境定量評価研究会 2002）も、衝突数の推定において調査区域内の飛翔頻度を風車回転域の体積比（風車回転面積×厚み 1 m×風車台数／調査区の高度 M 体積）で換算しているので、環境省手引きと同様に過小評価になっていると推察される。

なお、環境省手引きの事例（図 1）では、飛翔軌跡の分布が局地的に偏っているが、本節の衝突数推定は飛翔軌跡が風車設置区域に満遍なく分布していることを仮定したものであり、実態とは異なる（おわりにを参照のこと）。

3. 一定方角を向いた風車における特定方向飛翔個体の衝突数の推定

オジロワシについて環境省手引き p5-30～32

の事例をもとに、新モデルを用いて一定条件下の衝突数推定法を示す。一定条件として西北西の季節風が卓越し、風車ブレード面が常に西北西を向き、さらにオジロワシが真北方向からのみ直線で飛翔して危険域に侵入する場合を想定する。

西北西の常風地域で、オジロワシが北からのみ飛来するとした場合、ブレード角度及び突入角度（θ）は図 9 に示すように θ=22.5° である。オジロワシが通過する部分、つまり暗色で示した断面積 Q' は、

$$Q' = \pi r^2 \cdot \cos(90° - \theta) \qquad (28)$$

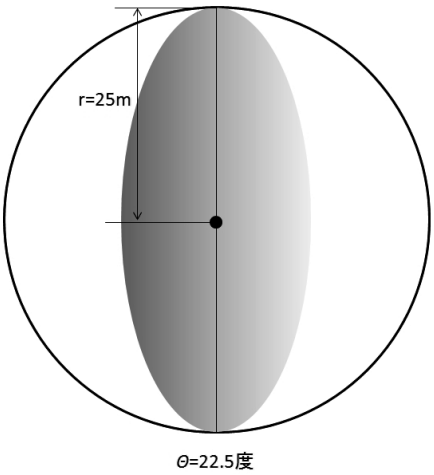
により求められる。ブレード半径 r が 25 m の場合、Q'=751.4 m^2 となる。全円面積 Q=1963.5 m^2 に対する断面積比は 0.3827 である。各風車の球体危険域内における北からの飛翔平均距離 m_{ave} は、Ⅱ-1 と同様、m_{ave} = 33.33 m になる。

接触率は付表 2b から 0.5852（ブレード厚みの無い場合）である。これらのパラメータから新モデルの骨格の順番にしたがって以下のように衝突個体数が求められる。

①区域面積　A = 3955835 m^2

環境省手引き p5-31 の事例による

②風車回転高度幅 M　　50 m



暗色部（Q'）はブレード接触危険域

図９　一定方向を向いた風車に特定方向から侵入する鳥の衝突面の断面（侵入角度 22.5° の場合）

③高度 M の空間全体積①＊②＝197791750 m^3

④オジロワシが通過する風車 20 台の合計球体積

S＝20＊65450 m^3＝1309000 m^3

⑤全衝突危険域（20 台分）の体積比

P_v= ④/③＝0.006618

⑥20 台 S 内飛翔距離 T_L：高度 M の年間飛翔距離 M_d=1135260 m に⑤を乗じる

T_L＝1135260＊⑤＝7513 m

⑦ 20 台 S 部分内のオジロワシ通過個体数

$T_n = T_L/m_{ave}$

（この場合はブレード面侵入確率 1/2 は用いない）

T_n＝7513/33.33＝225.4 羽

この値に 0.3827 を乗じた 86.26 羽がブレード回転面の危険域断面積への突入個体数 B_n となる。

⑧20 台当たりの期間内衝突個体数：$T_N = B_n$＊接触率 T(22.5°)＊修正稼働率 R'

T_N＝86.26 ＊0.5852 ＊0.3319＝16.75 羽

⑨回避率 90% で T_{Ne}(90)＝1.675 羽

この結果は、前節で示した全方位からのランダム突入を仮定した場合の推定衝突数 1.447 羽より多い。

4. ブレード厚みの扱い方

新モデルのオジロワシの風車ブレード接触率の計算においては、Ⅱ-3-③に示すようにブレード厚み（b）の平均値を 30 cm としている。この数値は環境省手引きで用いた風車の規格から、ブレード長の中央点での厚みを推定したものである。本章冒頭の Band データとの比較では、ピッチ角（16°）による上から見たブレード厚みのブレード長の厚みの単純平均値を用いた。ピッチ角を 0° とした場合でも実際のブレード厚みは風車の規格により、またブレード上の位置によって変化する。

そこで、ブレード直径 80 m 級の代表的な風車規格の例でブレード厚みの違いを勘案した接触率を計算する。まず、風車規格の資料を用いてナセルからブレード先端までの距離別のブレード厚みを求めた。次にその距離別に斜め突入を考慮したオジロワシの接触率を新モデルの式（10），（11），

（13）から求めた。その際の条件として定格運転時の定格回転数（18回）/min、及びピッチ角0°を用いた。この接触率を半径距離による円面積で重み付けして幾何平均値を求めた。その結果、平均接触率 T は0.3695となった。

次にこの平均接触率（0.3695）に相当するブレード厚み（b）を付表2に示した計算法から逆算すると約37 cmと推定された。b= 約37 cmになるブレード位置を求めると、ナセルから先端に向かって約60％の位置に相当した。Band et al.（2007）では、ピッチ角を16°としているが、これはナセルから先端に向かって2/3の位置のピッチ角である。その位置のピッチ角を選んだ根拠は不明であるが、Bandらは衝突に最も寄与する位置であるとしている。こうしたことから、衝突率の計算に用いるブレード厚みの平均値を決定する際に60％点付近の厚みを用いておけば、衝突率を過小評価することにはならないと思われる。

5. 渡り時の小鳥の衝突数の算定法

本論文ではこれまで希少猛禽類を対象に衝突数を推定する手法を解析してきたが、風車に当たる個体数から見れば春秋の渡り時期に大量に飛翔する小鳥の衝突リスクが大きい。しかし、調査区域内に無数に侵入する小鳥を逐一観察してその飛翔軌跡を地図上に記録するのは手間がかかる。そこで、主な渡り方向に直角に500 mのラインを取り、その両側各々に幅50 m（全幅100 mで面積は5 ha）の区画を設定し、高度 M（ブレード回転高度）の範囲内を通過する小鳥の数を数える。Ⅲ章条件1と同様に小鳥が区画内を水平に飛行するとすれば、小鳥がラインと直角方向にのみ飛翔する場合は、通過距離はすべて100 mになる。

直角方向ではなくランダムな方角で横切る場合は、林ら（1966）が開発した区画法（INTGEP法と言う：森林野生動物研究会編1997参照）によるノウサギ足跡延長距離の調査法を応用する。

林ら（1966）はノウサギ密度を求める方法として、雪上に幅2 m、長さ10 mの長方形（20 m^2）の区画を設けた場合、その区画をランダムに横切るノウサギの足跡本数に2.95 mを乗じれば、20 m^2 当たりの足跡延長距離が得られるとした。上記の小鳥の場合、もしランダムな方向で通過する場合の平均飛翔距離は2.95の50倍＝147.5 mとなる。したがって、通過した小鳥の個体数に100 mないし147.5 mを乗ずれば高度 M 内の空間体積内（5 ha×M）の飛翔総延長距離が求まる。あとはⅠ章の手順で衝突数を計算することになる。ただし、ラインが500 mでは遠すぎる場合には適宜縮小し、その分平均通過距離を換算縮小すればよい。

おわりに

新モデルは鳥が球体危険域にランダムに侵入し、ブレード面へ角度を違えて突入することを想定して構築したもので、従来のいくつかのモデルが持つ欠点を解消した汎用性が高いモデルと思われる。風車の稼働率についても従来の設備利用率と稼働率を統合し、修正稼働率を提案した。ブレードの厚みやコード幅、風車回転数、風向と飛翔速度など、いくつかのパラメータはより詳細にモデルに組み込むことが可能である。全体の計算過程は複雑に見えるが、考え方の骨格はこれまでの手法に比べてシンプルであり、また衝突個体数はエクセル上で予測式を作成し、関係パラメータを自動的に取り込むようにすれば簡単に算出できる。新モデルで計算した予測衝突個体数は一定期間における平均値であり、その単年度衝突数や経年的衝突数のばらつきを見るには、ポアソン分布（予測衝突数 T_N がごく少ない場合：環境省手引き2011のp5-33）や二項分布（T_N が多い場合：Sugimoto & Matsuda 2011）によるシミュレーションを行って推測する。

回避率の中身の分析は今回行わなかったが、回避率は一般に高い（SNH 2010）。しかし回避率が高いと衝突個体数が減るので、開発の影響は少なくなると言うことにはすぐにはならない。風車を回避すると言うことは、その場を行動圏とする鳥にとってそこが使えなくなること、長旅で疲れている鳥は風車基地を迂回するために余計労力を使

うこと（Masden et al. 2009；風間 2012）などが想定される。

したがって、図 1 に示した事例の場合、風車基地建設前の観察で飛翔軌跡が高密な区画は、飛翔密度分布のゾーニングにより区域ごとの衝突数を予測し、高い衝突数の区域は予め建設地から外すことが必要である（白木 2012）。環境省手引きの p5-30 の図 20 の事例のように、飛翔軌跡が高密な場所を外して風車が建設されていれば、予測衝突個体数は 47 倍ないし 15 倍ではなくかなり少なくなると想定できる。なお、風車位置が予め明確に決まっている場合には、設置前の観察により各風車の設置区域ごとの侵入頻度が直接予測できることもあるので、それに応じた保全対策が可能になる。

今後は、風車運転開始後のモニタリング調査で実際の衝突数（D_T）を鳥の種類別、雄雌別、成鳥幼鳥別に把握し、式（24）によって多様な条件下の回避率を解明することが最も重要である。

謝辞

新モデルの論文作成に当たり、横浜国立大学の松田裕之教授には球体モデルの平均飛翔距離や、他のモデルとの比較等について有力な助言を頂いた。ここに記して厚く御礼申し上げる。

【引用文献】

Band W., M. Madders & D.P. Whitfield（2007）Developing field and analytical methods to assess avian collision risk at wind farms. In de Lucas et al.（ed）Birds and Wind farms : Risk assessment and mitigation. pp 259-275. Quercus. Madrid, Spain.

Bolker E.D., J.J. Hatch & C. Zara（2006）Modeling bird passage through a wind farm. http://www.cs.umb.edu/~eb/windfarm/.

BTO（2012）A review of flight heights and avoidance rates of birds in relation to offshore wind farms. BTO Research Report No.618.

Desholm M. & J. Kahlert（2005）Avian collision risk at an offshore wind farm. Biological Letters 1 : 296-298.

林知己夫・石田正次ほか（1966）動く調査対象集団に対する標本調査について－Ⅰ ──野兎数推定をめぐって──. 統計数理研究所彙報 14：63-83.

Hodos W.（2003）Minimization of motion smear : Reducing avian collisions with wind turbines. National Renewable Energy Laboratory : NREL/SR-500-33249.

環境省自然環境局野生生物課（2011）鳥類等に関する風力発電施設立地適正化のための手引き.

風間健太郎（2012）洋上風力発電が海洋生態系におよぼす影響．保全生態学研究 17：107-122.

北村　亘（2012）風力発電施設が鳥類に与える影響とその評価手法に関する文献調査．電力中央研究所報告 V11055：21pp.

Masden E.A., D.T.Haydon, A.D,Fox, R.W.Furness, R.Bullman & M.Desholm（2009）Barriers to movement : impacts of wind farms on migrating birds.ICES J.of Marine Sci. 66 : 746-753.

松浦邦彦（1974）伊勢道路における野生鳥類の衝死について . 山階鳥類研究所報告 41：293-308.

NEDO（2008）風力発電導入ガイドブック第 9 版 . pp201.

日本野鳥の会（2007）野鳥と風車．野鳥保護資料集 21. pp246.

Scottish Natural Heritage（2010）Use of avoidance rates in the SNH wind farm collision risk model. pp10. Scotland.

生物及び自然環境定量評価研究会（2002）響灘風力発電計画に伴う環境影響（鳥類対象）評価/調査報告書．北九州市響灘風力発電所建設にかかる環境影響評価・調査報告書：313-335．日本風力開発株式会社.

島田泰夫・松田裕之（2007）風力発電事業における鳥類衝突リスク管理モデル．保全生態学研究 12：126-142.

森林野生動物研究会編（1997）フィールド必携　森林野生動物の調査．共立出版.

白木彩子（2012）北海道におけるオジロワシ *Haliaeetus albicilla* の風力発電用風車への衝突事故の現状．保全生態学研究 17：85-96.

Sugimoto H. & H. Matsuda（2011）Collision risk of White-fronted Geese with wind turbines. Ornithological Science 10 : 61-71.

Tucker V.A.（1996）A mathematical model of bird collisions with wind turbine rotors. J.of Solar Energy Engineering 118 : 253-262.

（2013 年 6 月 11 日原稿提出）
（2013 年 9 月 12 日受理）

付表1　記号と定義　　Appendix 1. List of symbols, its meaning and unit.

記号 Symbol	定義及び単位	Meaning and unit
A	風車設置対象区域面積　　m^2	Survey area
b	ブレードの平均厚み　m	Mean thickness of a blade
B_n	n台の風車のブレード面への突入個体数の予測値　羽	Estimated number of birds invaded to the rotor disk
c	上から見た場合のブレード傾きの幅　m	Width of blade(having pitch angle γ) measured from upper part
D_T	風車に衝突死した個体数	Number of birds collided in the wind farm
e	鳥類の風車衝突回避率	Avoidance rate of a species passing through a wind farm or blade
k	風力階級別分布パターンの形状係数	Shape factor of the Weibill distribution
L	鳥1個体のブレード面通過距離　　m	Passing length of a bird through roter disk with angle θ
ℓ	鳥の体長　　m	Body length of a bird species
M	回転ブレード域の上端と下端の間の幅　m	Height of area swept by a roter diameter
m_{ave}	1台の風車球体内の平均通過距離　m	Mean passing distance of birds in a sphere
m'	1台の風車回転域の水平面円形危険域内の平均通過距離　m	Mean passing distance of birds in a horizontal πr^2 disk
$M_{ax}u$	ブレードの最大回転数	Maximum rotation per minute　(=Max rpm)
M_d	区域Aの高度幅Mにおける鳥類1種の総飛翔距離　m	Total flying distance of a species in the height M in A
Mv	区域Aにおける高度幅Mの空間全体積　m^3	Total volume of flying space($A*M$)
n	風車台数	Number of turbines in A
p_i	最大回転数$Max\ u$に対する風速別回転数uiの比率	Ratio of $Max\ u$ to ui
p'	突入角度によって異なる接触危険域の垂直断面積割合	Q'/Q
Pv	S/Mv	S/Mv
Q	1台の風車の円面積＝πr^2　m^2	Area of a roter circle　(πr^2)
Q'	特定方角からのみ突入する際の円盤の垂直断面積　m^2	Partial area of Q in Fig 9
q_i	風速階級別の風速頻度率	Frequency ratio of wind velocity in a wind farm
q_{in}	カットイン風速	Cutin wind velocity
q_{out}	カットアウト風速	Cutout wind velocity
R'	修正稼働率＝$\Sigma(pi \cdot qi)$	Modified operation rate of a wind farm
r	風車の回転半径（ブレード長）　m	Roter radius (blade length)
S	風車n台の合計球体体積　m^3	$n*(4/3)\pi r^3$
s	ブレード1枚が1回転するのに要する時間　秒(sec)	Sec/one cycle of blade rotation
s_i	風速i におけるブレード1回転に要する時間　秒(sec)	s at wind velocity i
s_{min}	最大回転数$Max\ u$ における1回転所要時間　秒(sec)	s at Max u
T	最大回転数におけるブレード回転面接触率の平均値	Mean probability of roter disk collision at Max u
T'	修正接触率＝$T \cdot R'$	Modified collision probability
t	鳥のブレード面通過時間　　秒(sec)	Sec/a bird passing through a roter disk
T_i	風速別の接触率	Collision probability in each wind velocity
T_j	風速頻度を考慮した風速別接触率	Ti considering the freqency ratio of each wind velocity
T_L	S内における鳥類1種の総飛翔距離　m	Total flying distance of a species in S
T_N	S内における総衝突個体数　　羽	Total colliding number of a species in S
T_n	S内における鳥類1種の通過個体数　羽	Individual number of a species passing through S
$T_{n'}$	n台の風車の平面危険域の通過個体数　羽	Number of individuals passing through n horizontal disks
T_{Ne}	回避率eにおける総衝突個体数　　羽	T_N at avoidance rate e
T_θ	突入角度別の接触率(掃引面積率)	Collision probability at θ(invasion angle) to roter disk
$T_{\theta i}$	角度別風速別の接触率	Collision probablity in each wind velocity at respective θ
u_i	風速i によって変化した回転数	rpm changed by wind velocity i
V	鳥の飛翔速度　　m	Mean flight speed of a bird species/sec
w	鳥の翼開張　　m	Wing span of a bird species
θ	垂直に回転するブレード面へ水平に突入する際の角度	Horizontal invasion angle of a bird to the vertical roter disk
π	円周率	3.1416

付表2 オジロワシのブレード接触率計算法. ブレード長25m、最大回転数24/min の場合.

	a	b			c				d		
	図5の式による	図6によるブレード厚み0mの接触率 ①	②		図6でブレード厚み0.3mの接触率 ③	④	⑤	⑥	同左 面積比変換接触率 ⑦		
突入角度 θ	接触率Tθ	通過距離 m 2.14/tanθ	通過秒 ①/10.6	接触率Tθ ②*3/2.5	0.3 / sinθ	修正通過距離m ①+③	通過秒 ④/10.6	接触率Tθ ⑤*3/2.5	断面積 Q' m2	面積比率 % p'	変換接触率 ⑥*⑦
0	1			1				1	0	0	0
1	1	122.60	11.566	1	17.19	139.79	13.188	1	34.3	0.0175	0.0175
2	1	61.28	5.781	1	8.60	69.88	6.592	1	68.5	0.0349	0.0349
3	1	40.83	3.852	1	5.73	46.57	4.393	1	102.8	0.0523	0.0523
4	1	30.60	2.887	1	4.30	34.90	3.293	1	137.0	0.0698	0.0698
5	1	24.46	2.308	1	3.44	27.90	2.632	1	171.1	0.0872	0.0872
6	1	20.36	1.921	1	2.87	23.23	2.192	1	205.2	0.1045	0.1045
7	1	17.43	1.644	1	2.46	19.89	1.876	1	239.3	0.1219	0.1219
8	1	15.23	1.436	1	2.16	17.38	1.640	1	273.3	0.1392	0.1392
9	1	13.51	1.275	1	1.92	15.43	1.456	1	307.2	0.1564	0.1564
10	1	12.14	1.145	1	1.73	13.86	1.308	1	341.0	0.1736	0.1736
11	1	11.01	1.039	1	1.57	12.58	1.187	1	374.7	0.1908	0.1908
12	1	10.07	0.950	1	1.44	11.51	1.086	1	408.2	0.2079	0.2079
13	1	9.27	0.874	1	1.33	10.60	1.000	1	441.7	0.2250	0.2250
14	1	8.58	0.810	0.9717	1.24	9.82	0.927	1	475.0	0.2419	0.2419
15	0.9558	7.99	0.753	0.9041	1.16	9.15	0.863	1	508.2	0.2588	0.2588
16	0.8805	7.46	0.704	0.8449	1.09	8.55	0.807	0.9681	541.2	0.2756	0.2668
17	0.8151	7.00	0.660	0.7924	1.03	8.03	0.757	0.9086	574.1	0.2924	0.2656
18	0.7580	6.59	0.621	0.7456	0.97	7.56	0.713	0.8555	606.8	0.3090	0.2644
19	0.7076	6.22	0.586	0.7036	0.92	7.14	0.673	0.8079	639.3	0.3256	0.2630
20	0.6629	5.88	0.555	0.6656	0.88	6.76	0.637	0.7649	671.6	0.3420	0.2616
21	0.6230	5.57	0.526	0.6311	0.84	6.41	0.605	0.7259	703.7	0.3584	0.2601
22	0.5872	5.30	0.500	0.5996	0.80	6.10	0.575	0.6903	735.5	0.3746	0.2586
23	0.5549	5.04	0.476	0.5707	0.77	5.81	0.548	0.6577	767.2	0.3907	0.2570
中略											
66	0.1452	0.95	0.090	0.1079	0.33	1.28	0.121	0.1450	1793.7	0.9135	0.1325
67	0.1424	0.91	0.086	0.1028	0.33	1.23	0.116	0.1397	1807.4	0.9205	0.1286
68	0.1398	0.87	0.082	0.0985	0.32	1.19	0.113	0.1351	1820.5	0.9272	0.1253
69	0.1372	0.87	0.082	0.0985	0.32	1.19	0.112	0.1349	1833.1	0.9336	0.1259
70	0.1347	0.87	0.082	0.0985	0.32	1.19	0.112	0.1346	1845.1	0.9397	0.1265
71	0.1323	0.87	0.082	0.0985	0.32	1.19	0.112	0.1344	1856.5	0.9455	0.1271
72	0.1300	0.87	0.082	0.0985	0.32	1.19	0.112	0.1342	1867.4	0.9511	0.1276
73	0.1277	0.87	0.082	0.0985	0.31	1.18	0.112	0.1340	1877.7	0.9563	0.1281
74	0.1255	0.87	0.082	0.0985	0.31	1.18	0.112	0.1338	1887.4	0.9613	0.1286
75	0.1234	0.87	0.082	0.0985	0.31	1.18	0.111	0.1337	1896.6	0.9659	0.1291
76	0.1213	0.87	0.082	0.0985	0.31	1.18	0.111	0.1335	1905.2	0.9703	0.1295
77	0.1193	0.87	0.082	0.0985	0.31	1.18	0.111	0.1333	1913.2	0.9744	0.1299
78	0.1174	0.87	0.082	0.0985	0.31	1.18	0.111	0.1332	1920.6	0.9781	0.1303
79	0.1155	0.87	0.082	0.0985	0.31	1.18	0.111	0.1331	1927.4	0.9816	0.1306
80	0.1137	0.87	0.082	0.0985	0.30	1.17	0.111	0.1330	1933.7	0.9848	0.1310
81	0.1119	0.87	0.082	0.0985	0.30	1.17	0.111	0.1329	1939.3	0.9877	0.1312
82	0.1101	0.87	0.082	0.0985	0.30	1.17	0.111	0.1328	1944.4	0.9903	0.1315
83	0.1085	0.87	0.082	0.0985	0.30	1.17	0.111	0.1327	1948.9	0.9925	0.1317
84	0.1068	0.87	0.082	0.0985	0.30	1.17	0.111	0.1326	1952.7	0.9945	0.1319
85	0.1052	0.87	0.082	0.0985	0.30	1.17	0.110	0.1326	1956.0	0.9962	0.1321
86	0.1037	0.87	0.082	0.0985	0.30	1.17	0.110	0.1325	1958.7	0.9976	0.1322
87	0.1022	0.87	0.082	0.0985	0.30	1.17	0.110	0.1325	1960.8	0.9986	0.1323
88	0.1007	0.87	0.082	0.0985	0.30	1.17	0.110	0.1325	1962.3	0.9994	0.1324
89	0.0992	0.87	0.082	0.0985	0.30	1.17	0.110	0.1325	1963.2	0.9998	0.1324
90	0.0978	0.87	0.082	0.0985	0.30	1.17	0.110	0.1325	1963.5	1.0000	0.1325
SUM (1-89°)	34.7684			34.2585				38.2463			15.8199
360° 平均 *1	0.3924			0.3868				0.4313			0.1765

*1: 全平均＝(合計×4 ＋ 0° のTθ×2＋ 90° のTθ×2)/360

付表３　レーレ(Rayleigh)分布を用いた修正稼働率R'の計算法. 平均風速*vm*=6mの場合を示す。

風速 *v* m/sec	レーレ分布[注1] 第1項	レーレ分布 第2項	レーレ解 *f*(*v*) 第1項x第2項	風車回転数 *ui*	*pi*（風速別回転数 ÷24mの回転数）	*f*(*v*)**pi*	備　考
0	0	1	0	0	0	0	
1	0.0436	0.9784	0.0427	0	0	0	
2	0.0873	0.9164	0.0800	0	0	0	
3	0.1309	0.8217	0.1076	6.0000	0.2500	0.0269	Cutin 風速
4	0.1745	0.7053	0.1231	6.8571	0.2857	0.0352	
5	0.2182	0.5796	0.1264	7.7143	0.3214	0.0406	
6	0.2618	0.4559	0.1194	8.5714	0.3571	0.0426	
7	0.3054	0.3433	0.1049	9.4286	0.3929	0.0412	
8	0.3491	0.2475	0.0864	10.2857	0.4286	0.0370	
9	0.3927	0.1708	0.0671	11.1429	0.4643	0.0311	
10	0.4363	0.1129	0.0492	12.0000	0.5000	0.0246	
11	0.4800	0.0714	0.0343	12.8571	0.5357	0.0184	
12	0.5236	0.0432	0.0226	13.7143	0.5714	0.0129	
13	0.5672	0.0250	0.0142	14.5714	0.6071	0.0086	
14	0.6109	0.0139	0.0085	15.4286	0.6429	0.0055	
15	0.6545	0.0074	0.0048	16.2857	0.6786	0.0033	
16	0.6981	0.0038	0.0026	17.1429	0.7143	0.0019	
17	0.7418	0.0018	0.0014	18.0000	0.7500	0.0010	
18	0.7854	0.0009	0.0007	18.8571	0.7857	0.0005	
19	0.8290	0.0004	0.0003	19.7143	0.8214	0.0003	
20	0.8727	0.0002	0.0001	20.5714	0.8571	0.0001	
21	0.9163	0.0001	0.0001	21.4286	0.8929	0.0001	
22	0.9599	0.0000	0.0000	22.2857	0.9286	0.0000	
23	1.0036	0.0000	0.0000	23.1429	0.9643	0.0000	
24	1.0472	0.0000	0.0000	24	1	0.0000	
					合計	0.3319	修正稼働率R'
25	1.0908	0.0000	0.0000	0	0	0	Cutout 風速
26	1.1345	0.0000	0.0000	0	0	0	
27	1.1781	0.0000	0.0000	0	0	0	
28	1.2217	0.0000	0.0000	0	0	0	
29	1.2654	0.0000	0.0000	0	0	0	
30	1.3090	0.0000	0.0000	0	0	0	

注1：レーレ分布の式（ワイブル分布で形状係数 $k=2$ の場合）

風速階級別頻度　$f(v)=[(\pi/2)\cdot v/vm^2]*\exp[-(\pi/4)*(v/vm)^2]$

*v*は風速、*vm*は平均風速

A New Sphere Shape Model for Estimating the Number of Bird-Wind Turbine Collisions

Masatoshi Yui and Yasuo Shimada

Abstract There are several mathematical models which are used to predict the frequency of bird strike in the wind farm. However, there are problems to be solved to establishing "collision risk zones" as the rotational direction of the turbine's blades gradually changes according to the direction of the wind. A simple model has yet been developed that hypothesizes cases where a bird changes the angle which it flies into the rotational surface of the wind turbine's blade. This paper presents a method to solve these problems. The collision risk zone in an area planned for the building of wind farms is assumed to have a total volume S that is n (the number of wind turbine units) times the sphere volume with a radius r, which is the blade length. A ratio is obtained by S being divided by the volume Mv of a space in the surveyed area within the height range between the uppermost and lowermost levels reached by the blade tips. This ratio is multiplied by the birds' total flying distance obtained by observation within the height range M in the planned wind farm area to provide the total flying distance T_L within S. The average passing distance m_{ave} through the sphere is represented by the formula $m_{ave}=4r/3$. From this, the frequency T_n of birds flying into the sphere can be calculated using the formula $T_n=T_L/m_{ave}$. The number of birds that fly into the plane of the turbine blades is represented by the formula $B_n \leqq T_n/2$. Let T be the rate of contact with blades and R' be the modified operation rate of wind turbines, and the number of colliding birds T_N will be given by $T_N=B_n \times T \times R'$, where T is the average rate of contact by collision angle at the maximum rotational speed $M_{ax}u$, and R' is obtained by adding up the product of each frequency q_i and the ratio $p_i(=u_i/M_{ax}u)$ of the rotational speed u_i for each grade of wind velocity.

Key words Wind farm, Bird strike, Sphere shape model, White-tailed Eagle