第9章

原子力とその生態学的副産物

——チェルノブイリとフクシマの教訓

ティモシー・A・ムソー、
アンダース・P・モラー

要 旨

世界的な経済発展に伴うエネルギー需要の増加および化石燃料からの二酸化炭素放出による気候変動への懸念を受け、温室効果ガスを生まないエネルギー源を大規模かつ早急に確保する必要性が増している。それに対して先進国と発展途上国（たとえばアメリカと中国）はいずれも、原子力こそが解決策の一つであるとしてきた。しかしスリーマイル島、チェルノブイリ、そして最近では福島で発生した原発事故によって、この技術はヒューマンエラー、設計上の欠陥、そして自然災害に対して脆弱であることが判明し、かつこれらの事故によって、原子力を選択肢として含む全てのエネルギー政策において考慮すべき巨大なコストが健康、環境、経済の各方面で喚起された。過去に行なわれたこうした分析の大半は、事故周辺地域の生態系システムに潜むコストを無視してきた。必要に迫られ、あるいは政府の方針によって汚染地域に住み続けることを余儀なくされている人々への長期的な影響について、自然システムの研究はそれを投影するものであり、ゆえに必要な不可欠である。本章ではチェルノブイリと福島に生息する人間以外の生物に関する研究について論ずる。鳥、昆虫、^{げっし}齧歯動物、微生物、そして樹木を対象とした広範な調査研究により、かつては過小評価されていた放射線被曝を通じ、個体、種、および生態系の機能が著しく損なわれてきたことが明らかになっている。また本章ではDNA、先天性欠損症、不妊、がん、そして生存期間に対する放射線被曝の影響を概説するとともに、放射能汚染地域に暮らす野生生物の健康および長期的な見通しを示す。

序 論

チェルノブイリと福島で発生した核の惨事は経済面で巨大かつ直接的な衝撃をもたらし、損傷を受けた原子炉の廃炉や周辺地域の除染など、費用の総額は数千億ドルに上るとみられている (Samet and Seo 2016)。しかし大陸規模で拡散した放射性核種による生態学的な影響について、資金はほとんど投じられていない。基礎的な科学研究に対する投資が行なわれていないのは、多くはこれら汚染物質による直接的な影響が極めて小さいという認識によるものであり、原子力規制機関もしばしばそのような見解を広めている。さらに、立入禁止区域に指定されたことで捕獲される可能性が減少した結果、放射能汚染地域で野生動物の繁殖がみられるという見解すら存在し、放射性核種は恐れるに足らないという印象を人々に与えている。本章では、チェルノブイリと福島における野生動物の健康および個体数増加について放射能との関連で評価することを目的とした、最近10年間の科学研究の一部を検証する。原発事故の現場周辺で実施されたこれらの研究は、事故およびその他の原因によって被曝した生物、そして恐らくは人間に対する影響について、貴重な洞察を提示するものである。

過酷事故をはるかに超える核エネルギーの危険性

個人的にどう感じるかは別にして、原子力は世界のエネルギー構成の主要な部分を占めており、今後長きにわたってそうあり続けるだろう。現在全世界で438基の原子炉が稼働しており、65基が建設中である（うち中国で24基、アメリカで4基）。また発注中ないし計画中の原子炉は165基、建設が提案されている原子炉は325基に上る。「あらゆる」原子炉が日々の運転で大量の放射性廃棄物を生み出す一方、その排出量の総計が過去数十年間で大幅に減ったことはほとんど知られていない。たとえばアメリカで広く用いられている沸騰水型原子炉は年間1,000～10万ギガベクレルの放射性希ガスを生み出すが、加圧水型原子炉の希ガス生成量は平均してその10分の1から100分の1である (Burris et al. 2012)。さら

に原子力発電所では、その他のより危険と思われる放射性物質（ヨウ素131、セシウム137、ストロンチウム90など）も通常運転の中で生み出され、外部に放出されている。こうした放出物が人間に与え得る影響（一例を挙げると小児白血病など; Fairlie 2014）については幾分の研究が行なわれているものの、人間以外の生物に関しては放射能そのものの影響ではなく熱汚染の影響にほぼ限られてきた。予見可能な将来にわたって原子力が活用されるという状況の下、生態系に対する放射線の影響についての基礎的研究は必須であると思われる。

原子力発電所からの合法的かつ制御された放出に加え、これら施設の多くからは管理されていない放射性廃棄物が周辺環境へと漏れ出していることが現在明らかになっている。最近発覚した有名な事例として、アメリカのバーモント・ヤンキー原子力発電所で2010年に発生したトリチウム（放射性の水素）の大規模流出が挙げられる。原因は冷却水パイプの老朽化とされたが、この流出事故が2014年の廃炉決定に大きな役割を果たしたのは間違いない。それ以降、アメリカで稼働している商業用原子力発電所のうち4分の3以上で、なんらかの放射性物質漏れが発生していたと報告されている。部分的にはこうした流出事故は原発群の老朽化による避けられない結果であり、将来的にはさらに多くの流出事故が発覚するものと思われる。だがこれらの明らかな事象にもかかわらず、こうした外部放出の生態学的影響についてはほとんど知られていない。アメリカ政府監察院が外部に作成を依頼した報告書でも、トリチウム漏れの危険性についてはほとんど知られておらず、さらなる研究が必要だと示唆されている（US GAO 2011）。

事実、核燃料サイクルにおける全ての過程で大量の放射性汚染物質が放出されており、それは採掘の際に発生する選鉱くずから、核燃料の処理およびパッケージに及ぶ。燃料サイクルの最終段階である貯蔵された使用済み燃料は、各原発が日々運転する中で巨大に膨れ上がってゆく。これらの放射線発生源はいずれも周辺住民や生態系に危険を及ぼす可能性があり、とりわけ事故や自然災害が発生した場合にそれが高まる。しかし原子力施設における「事象」が克明に記録されることはなく、その生態学的影響についてもほとんど研究は行なわれていない。

近年、原子力にまつわる潜在リスクを包括的に検証したのがウィートリー、ソヴァークール、ソーネットの3人による調査研究（Wheatley, Sovacool, and Sornette

2016)である。それによると、福島原発事故と同規模ないしそれ以上の規模の事故が今後50年間で発生する可能性、今後27年間にチェルノブイリ事故と同規模ないしそれより大規模の事故が起こる確率、そして今後10年間でスリーマイル島事故と同規模ないしそれより大規模の事故が発生する確率は、それぞれ50パーセントに達するという。この分析結果から将来の原発事故は避けたいように思われるが、こうした事故による生態系への影響を正しく評価するのに必要な基礎的研究への投資額はいまだ低い水準にとどまっている。

原発事故による生態学的影響を評価するための研究プログラム

放射能汚染が自然システムに与える影響について、現在の知識における空白を部分的にでも埋めるべく、我々（ティモシー・ムソーおよびアンダース・モラー）は2000年に共同研究を始め、チェルノブイリ原発事故が周辺に生息する鳥類の個体群にいかなる影響を与えたかを調査した。2005年には調査対象を拡大し、昆虫や蜘蛛、あるいは植物など様々な生物を含むようになる。そして2011年7月には福島における調査研究を開始した。この研究活動を進めるにあたって用いた原理原則は、以下の疑問を基にしている。

- (1) チェルノブイリ（および福島）で観測された放射線レベルは、自然個体群の突然変異率を上昇させるとともに、遺伝子の損傷を増やすほどの線量なのか。
- (2) これらの地域において突然変異率の上昇と遺伝子損傷の増加につながるような、表現型への影響は見られるか。
- (3) 突然変異率の上昇をもたらすような適応度への影響（生存数および繁殖数の変化など）は見られるか。
- (4) これらの地域における突然変異率の上昇に個体群が適応している証拠は見られるか。
- (5) 自然個体群の繁殖および多様化につながる放射線の影響は見られるか。
- (6) 個体群が放射線の影響を受けた結果、生態系になんらかの影響が及ぼされたか。

人間以外の生物に放射能が及ぼす遺伝子的影響

放射能について論じる際、突然変異を引き起こす放射線に晒されたことで遺伝子はどのような影響を受けるのかと、まず頭に浮かぶだろう。事実、自然環境に存在する低線量の電離放射線を慢性的に被曝することで、遺伝システムが直接影響を受ける可能性があるという証拠は数え切れないほど存在する。そうした証拠は多数の個別研究によってもたらされたものであり、また最近ではそれら個別研究の蓄積をメタ分析することで得られている。

チェルノブイリに生息する個体群に関し、放射線がDNA突然変異率に及ぼす影響について最初に行なわれた調査は、マイクロサテライトマーカー（いわゆる「DNAの指紋」）を用いたものだと思われる。つまりツバメの親子のマイクロサテライトマーカーを比較することで、その突然変異率を新たに計測し直したのである（Mousseau and Møller 2014にて検証）。その結果、チェルノブイリの個体群におけるこれらマーカーの突然変異率は、ウクライナとイタリアに生息する対照群のそれと比べ2~10倍高いことが判明しており、チェルノブイリ原発事故の後始末にあたった人々の子孫を対象とした調査においても同様の結果が見られる。だが驚くべきことに、チェルノブイリ原発事故に関係して遺伝子の突然変異率を推定し直した調査研究は他に存在しない。個々のDNAにおける変化を突き止めるにはゲノム解析が必要だが、その費用は過去に比べずっと安価になっており、突然変異原と遺伝子との相互作用がいかに誘発され、また次世代へと伝達されるかの根本的理解に向け、大きな進歩がなされるものと期待される。こうした研究は保全生物学に関する諸問題だけでなく、進化遺伝学における根本的な疑問を解決するためにも不可欠である。進化遺伝学においては、DNAレベルの可変性とその結果として生じる表現型の変化との直接的な関係についての調査研究が、以前からの最優先課題なのである。

その一方、遺伝子の損傷を推定するにあたって間接的手法を用いた調査研究は数多く存在しており（それらの検証についてはMøller and Mousseau 2006, 2015参照）、それらをまとめ合わせて見れば、チェルノブイリ原発事故による放射能汚染が遺

伝子の損傷を引き起こし、突然変異率を上昇させたことに疑いの余地はない。また明らかにされた遺伝子損傷の度合いと、表現型への影響とが相関関係にあることも、多くの研究によって示されている。意外なことに、チェルノブイリ原発事故関連の被曝によって生じた遺伝子への影響について、それを最初に要約したのは我々であり (Møller and Mousseau 2006: 205, Table 1)、様々な動植物を対象に、被曝線量の増加が突然変異や細胞の遺伝にどのような影響を与えたか、チェルノブイリ周辺と対照エリアで比較調査を行なった33の研究結果を示したのである。それらの結果の間には相当程度の差異があるものの、25件の研究において、放射線被曝に関連する突然変異および細胞遺伝学的異常の大きな増加が見られた。またいくつかの研究においては、一部の遺伝子座で突然変異率の上昇が見られた一方、その他の遺伝子座では観測されなかったことも示されている。だがこれら研究の多くは小規模な例を基にしており、結果的に統計的検出力は低く、25パーセントの差異を統計的に有意であると示すことはできなかった。また生殖細胞系の突然変異（つまり次世代に伝達し得る突然変異）を調査した研究は33件中わずか4件であり、その全てで突然変異の有意な上昇が見られた。ここで強調すべきは、これら調査研究の多くが国際原子力機関 (IAEA) によるチェルノブイリフォーラム報告書で考慮の対象にすらなっていないことであり、大きな影響力を有するこの報告書は自然個体群に対する潜在的悪影響を過小評価したのである。

我々は最近になってチェルノブイリ個体群の突然変異率に関する調査研究をさらに拡大し、30の種を調査対象とした45件の公表済み論文を基に、チェルノブイリにおける放射線の影響を検証べくメタ分析を行なった (Møller and Mousseau 2015)。メタ分析は比較的新しい統計的手法であり、異なるデータ群を組み合わせることで対象となる仮説の世界的な分析を可能にする。その結果、ピアソンの積率相関係数として推定された放射線の全体的な影響規模は非常に大きく ($E=0.67$; 95パーセント信頼区間 $0.59\sim0.73$)、非構造化ランダム効果モデルにおける全分散の44.3パーセントを占めた (Møller and Mousseau 2015: 2, Figure 1)。簡単に言えば、対象とした調査研究における全分散のほぼ半分が放射線の影響によって説明されるということであり、これはいかなる基準と照らし合わせても極めて大きいものである。また「フェイルセーフ」の感度分析を用いれば、この結果

がどれだけ信頼できるかを決定できる。フェイルセーフ計算は、この平均的な効果量を消去するのに必要な未公表の無効な結果の数を反映する。その結果算出されたフェイルセーフ数は4,135であり、この発見の信頼度が極めて高いことを示している（ローゼンバーグ検定 $p=0.05$ において4,135）。また間接検定で論文における偏りの証拠は見られなかった。放射線が突然変異に及ぼす影響は分類群ごとに異なっており、動物よりも植物のほうが影響の大きいことを示している。人間の場合、突然変異の放射線に対する感度は他の種と比べ中程度であった。これは効果量が時間とともに減少することではなく、自然的条件の改善が見られないことを表している。また平均効果量が驚くほど大きかったことは、放射能汚染が現世代および次世代以降の各個体の適応度に大きな影響を及ぼすことを示唆しており、個体群レベルで見た影響はさらに大きく、放射性物質に汚染された地域の外にまで及ぶ可能性がある。全体的に見れば、自然個体群が電離放射線を慢性的に被曝することで生じる突然変異への影響について、この研究は現時点で最も強力な論証と言えるだろう。

現在のところ、福島原発事故による遺伝子への影響を扱った調査研究は比較的少ない。琉球大学の大瀧丈二准教授は福島原発事故で被曝した蝶類を対象に一連の調査研究を行ない、放射線被曝の直接的結果として突然変異率が上昇する強力な証拠を発見した（Mousseau and Møller 2014にて検証）。これら一連の研究は内部および外部の放射線源を用いた実験によって強く裏づけられており、現地で観測された突然変異率の上昇と表現型への影響を明確に立証している（Mousseau and Møller 2014）。大瀧率いるグループが後に行なった調査研究でも放射線による急性・慢性両方の影響が確認され、またその影響は年月とともに縮小しているが、線量率が数年かけて減少したためと思われる。ここで特筆すべきは、後天的な突然変異が子孫に遺伝する場合もあるという示唆である。総体的に見て蝶類を対象としたこの研究は、自然個体群における慢性的な放射能の影響につき最も厳密かつ包括的な実験分析結果をもたらした。

低線量率の被曝が突然変異率の上昇をもたらすという仮説をさらに裏付けるものとして、自然発生した放射性物質が世界中の動植物の個体群に与えた影響について最近行なわれたメタ分析が挙げられる（Møller and Mousseau 2013）。自然放射

線のレベルは地球上の各地で大きく異なっているが、それは地表面におけるウランおよびトリウムの堆積量と強い相関関係にあり、そうした場所はイランのラムサル、インドのケララ、そしてブラジルのグアラパリほか世界に数多く存在する。この研究は発表済みの論文5,000点以上を対象とし、そこからメタ分析を行なうにあたり十分な厳密さをもって実施された46点が絞り込まれた。個別の影響の多くは小さなものであり、それ自体では統計的に有意でないものの、全体的に見れば、ゼロ以上の数値を示したものは偶然によって生じ得る数よりはるかに多く、効果量の平均値は0.093（95パーセント信頼区間0.039～0.171）だった。この結果から、自然発生した放射線への被曝は、検証対象となった差異の1パーセントを説明することが示唆される。小さな影響ではあるものの、進化という時間の尺度で見れば決して無視することはできない。この分析から得られた第1の結論は、環境放射線の自然的差異が多様な動植物の免疫システム、突然変異率、そして病気発現に小規模ながら有意な負の影響をもたらす証拠が広範囲にわたって存在する、というものである（Møller and Mousseau 2013）。言い換えれば、統計的に有意な検出力の下、それを下回れば影響が観察されないというしきい値は存在しない。自然放射線に関する研究はまた、適応の進化過程を検証する機会ももたらすはずだが、我々の知る限りそうした研究はいまだかつて行なわれていない。むしろここでは、原子力発電所からの放射線放出は環境放射線と同程度であり、公衆衛生の観点から考慮する必要はないという、原子力業界や規制機関が繰り返し述べた言葉とは対比的に、「自然環境レベル」の放射線でも個体に害を及ぼすのに十分であるという発見のほうが重要だろう。この研究においては、放射線放出の規模が環境放射線のレベルと同程度だとしても、それを真剣に考慮しなければならないことが示唆されているのだ。

発達への影響——色素欠乏症、非対称、脳の大きさ、白内障、精子、および腫瘍

チェルノブイリ、そして現在の福島に関する実証的研究は着々と積み上がりつつあり、放射性汚染物質への被曝による生理学的、発達学的、形態学的、そして行動学的影響が幅広く明らかにされている。こうした影響の大半はその根底に遺

伝子学的要素を有しているが、中には直接的な毒性の可能性が無視できない場合もある。目に見える被曝の最初の兆候は、鳥の羽、そして恐らく哺乳類（福島の牛など）の体毛に現われる白い斑点である。このような「限局性白皮症」（限局性白変とも言われる）はチェルノブイリに生息するツバメなど、多数の鳥類ですでに観察されている（Mousseau and Møller 2014）。羽が異常白変したツバメは福島で2012年にアマチュアの野鳥観察者によって初めて発見されており、翌年には観察される頻度が明らかに増加した。しかしこうした傾向は、災害後に調査体制が強化されたことによる「スクリーニング効果」と部分的に関係があると思われる、さらなる調査が必要である。このような部分的白皮症は生存可能性を減少させるものと信じられているが、その性質は次世代へと遺伝され、また親子の類似から、少なくとも部分的には、生殖細胞系での突然変異が原因かもしれないとする十分な量のデータが存在する。白い羽の存在自体が個体の活動（生殖や生存など）に直接影響を与えるとは考えにくいものの、放射線による個体への影響を測る生体指標としては有効だと思われる。こうした特徴の発現と、その根底にある放射線被曝による遺伝子的ないし生理学的メカニズムとの関係性を突き止めるには、さらなる研究が必要である。

チェルノブイリに生息するいくつかの鳥類に関し、生殖細胞系の突然変異率を推定すべく配偶子の分析が行なわれてきた。一例を挙げると、チェルノブイリのツバメで精子に異常が発生する頻度は、対照エリアで暮らす雄ツバメのそれと比べ最大で10倍に上がることが報告されている（Mousseau and Møller 2014）。この異常発生率は血液、肝臓、および卵における抗酸化物質の減少度合いと相関関係にあり、放射性物質の被曝による直接・間接の影響からDNAを守る上で抗酸化物質が大きな役割を果たしているという仮説を裏付けている。またチェルノブイリ近辺の鳥類を対象に最近実施された分析によると、調査対象となった鳥類10種のうち9種において、チェルノブイリに生息する個体の精子異常発生率が、ヨーロッパ各地の対照エリアに生息する個体のそれと比べはるかに高いことが明らかになり、損傷の最も大きい種は精子がより長くなっていたことから、放射能汚染地域に生息する鳥類の間で精子の異常は珍しくないと思われる。さらに小型齧歯類の精子についても、形態学に関する同様の影響が最近になって報告されている

(Kivisaari et al. 2016)。ツバメの精子の遊泳能力は放射線のレベルと負の相関関係にあることは以前から知られており、またプラズマ酸化の状態によって精子の活発さを予測できることから、精子の形成を電離放射線による影響から守る上で抗酸化物質が果たす役割について、その仮説にさらに証拠を与えている (Mousseau and Møller 2014にて検証)。これらの研究結果を総合的に見ると、精子形成が低線量被曝の影響を強く受けること、およびその結果として生じる雄の生殖機能の喪失によって、当該地域に生息する多くの種において個体数が減少したという観察結果を部分的に説明し得ることを強く指し示している (以下を参照のこと)。

植物の花粉および発芽に関する研究も、生殖機能そして各個体の適応度に対する放射線の影響を測る上で重要と思われる。111種の植物を対象にチェルノブイリで最近行なわれた調査の結果、放射線が花粉の生存力に対して小規模ながら有意な負の影響を与えることが判明している (Møller, Shyu, and Mousseau 2016)。そしてそのことは、これら種のうち多くにおいて発芽率が減少している事実を、部分的に説明するものと考えられる (Møller and Mousseau 2017)。

他の多くの種類の細胞や細胞組織も、チェルノブイリの汚染物質から影響を受けたことが示されている。たとえば、鳥類で目に見える腫瘍が発生する頻度は放射能汚染地域においてははるかに高く、体細胞における突然変異率の上昇が原因と思われる (Mousseau and Møller 2014にて検証)。チェルノブイリに生息する鳥類の間で目に見える腫瘍が発生する割合は1,000羽中15羽以上だが、大規模な調査 (観測対象3万5,000羽) が実施されたデンマークの個体群では1羽も発生していない。またチェルノブイリの齧歯類を対象に最近行なわれた調査では、セシウム137の全身被曝により腫瘍発生率が増加することが示唆されている。

第2次世界大戦の終結直後、原爆の生存者の間で放射線による白内障が発生し、放射線被曝との相関関係が非常に高いことが示された (Otake and Schull 1991)。同様にチェルノブイリにおいても、白内障発症の頻度と規模は放射線被曝と相関関係にあり、環境放射線のレベルが高い地域に生息する鳥類は片目ないし両目が白濁する可能性が高い (Mousseau and Møller 2014)。人間における放射線由来の白内障と同じく、その現象は鳥の年齢と無関係であり、放射線が白濁の発生原因であるという仮説をさらに裏付けている。またレーマンら研究者は最近、ウクライ

ナの放射能汚染地域に生息する齧歯類の間で白内障の発症率が大きく上昇していることを報告しており (Lehmann et al. 2016)、電離放射線被曝の信頼に足る生体指標として白内障の発症が有効であることを示した。明示的に証明されたわけではないものの、白内障による視力低下は動物の適応度 (捕食者からの逃走や食物の発見など) に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

神経の発達が電離放射線の影響を受けやすいことは以前から知られていた。出生前に原爆の被害を受けた広島および長崎の生存者を対象とした多くの研究でも、深刻な知能障害や小頭症が電離放射線被曝の直接的結果として示されている (Otake and Schull 1998)。チェルノブイリにおいても、放射線濃度が高い地域に住む鳥は脳が縮小しており、生存可能性の減少に結びついたことが判明している (Mousseau and Møller 2014にて検証)。同様の影響はチェルノブイリおよび福島に生息する齧歯類でも確認されている (Mappes et al. 2016)。

チェルノブイリの放射能汚染地域に生息する野生動物についてはこれ以外にも様々な形態学的・行動学的異常が報告されているが、時間、努力、そして想像力さえあればチェルノブイリ原発事故による生物学的影響はこれからも突き止められると思われる。これを裏付けるのが、カッコウの呼びかけ行動を対象とした最近の研究である (Møller et al. 2016)。この研究において筆者らは、雄129羽の鳴き声における「音節」の数と、ウクライナ各地で観測された「異常な」鳴き声の発生頻度を調査した。観測地点の線量は毎時0.01マイクロシーベルト ($\mu\text{Sv/h}$) から218 $\mu\text{Sv/h}$ におよぶ。総体的に見て、放射能汚染地域における雄の鳴き声は音節数が少なく、異常が多かった。またその他の環境変数による潜在的影響を排除した後も、この影響は残った。人間の健康に対する影響をカッコウの鳴き声から推測するのは不可能だが、放射能汚染は様々な面で自然システムに明確な影響を与えているのである。

高線量地域における個体群の数と生物多様性

保全生物学者にとっての主要な問題は、チェルノブイリおよび福島に生息する個体群で観測された突然変異の蓄積による適応度への影響と、その結果生じる発

達への影響である。我々はそれを突き止めるべく、チェルノブイリと福島動物を対象に、個体群の規模、種の数（すなわち生物多様性）、雄雌の比率、生存率および生殖率、そして移住パターンの解明を目的とする統計的調査を行なった。いずれの放射能汚染地域においても放射性物質の分布は極めて不均等なため、汚染されていない比較的「クリーン」なエリアから、非常に線量の高いエリアまで、全ての放射線レベルを狭い範囲の中で特定することが可能である。またこの不均等性によって、一つの大規模事象によって放射線が生物の個体群や群集に及ぼす影響を与えるか、その反復調査が可能になる。実際、とりわけチェルノブイリにおいては、放射性物質の分布が一点から放射されたというよりモザイク状あるいはパッチワークに近く、放射線レベルが発生源からの距離と比例していない。こうした地理的構造の欠如と、各種生息地における様々な調査を組み合わせることで、その他の生物的・非生物的要素を排除した放射線効果の緻密な分析が可能になる。

鳥類、蝶類、およびその他無脊椎動物の個体数と多様性

著者らは2000年代中盤より、チェルノブイリにおける動物の個体数および多様性に関する包括的調査を行なった。「大量に生殖する生物群の一覧表作成」という基本的なサンプリング方針を基に、2006年から2008年にかけてウクライナ北部とベラルーシ南部のおよそ300カ所で、鳥類と無脊椎動物（主にチョウ、トンボ、ハチ、クモ）の個体数調査を実施した。また2011年から16年にかけて福島400カ所でも同様の方針で調査を実施している。その結果、チェルノブイリと福島で作成された生物群の一覧表は現時点（2016年）でそれぞれ1,146件および1,900件に上っている。両地点では個体数と種の多様性の量的推計に加え、植生の種類、開水域への距離、土壌の種類、周辺の気象状況、緯度、経度、標高、そして時刻など、多数の生物的・非生物的要素も同時に測定ないし推測した。これらの変数はいずれも多変量モデルに組み入れられ、各計測箇所における種ないし集団の予測個体数を算出するのに用いた。次にこのモデルを使い、個体数の変動のうち、その他の潜在的要因を除いた放射線のみによって説明し得る部分を推測

した。つまり、個体数と放射線の部分的関連性である。我々の知る限り、放射能汚染地域の調査研究でこうした手法がとられたのはこれが初めてだが、ヨーロッパと北アメリカでは1960年代以降、鳥類の個体数調査に用いられている。ともあれ、この種の複雑な生態学的問題に関し、このアプローチはおそらく唯一の解決策であろう。核分裂の生成物による影響を地理的規模で分析するにあたり、大規模な実験操作は不可能だからである。さらにこの手法には、事故以前の基礎データが存在しなくても生態学的影響を分析できるという利点がある。つまり、影響を受けていない地域における現時点での分布ならびに個体数の観測結果を用い、それを基に汚染地域のパターンを予測するのである。

一般的な認識とは対照的に、2006年から2009年にかけてチェルノブイリで実施した調査の結果、放射能汚染地域の森林および草原に生息する鳥類の個体数と多様性は極めて低く、被曝とその反応に類似した関係性が見られた。すなわち同じ地域の比較的「クリーン」なエリアから予測される数字に比べ、個体数は3分の1、種数は半分だったのである (Mousseau and Møller 2014にて検証)。全ての種が放射線量に比例して数を減らしているわけではなく、中にはなんら影響を受けていない種もいくつか見られ (Galván et al. 2014)、これは放射線に対する適応を示すものと思われる。とはいえ全体的な減少傾向は極めて明確であり、分析結果も統計的に有意である。チェルノブイリの汚染エリアでは猛禽類の数が減少傾向を見せているものの、それが捕食を通じた直接的な被曝の結果なのか、あるいは餌の数が減少したことによる間接的影響なのかは定かでない。また個体数調査以外にも、チェルノブイリにおける鳥類の個体群の規模縮小、雌雄比率の変化(雌より雄のほうが多くなった)、そして若鳥に比べ老いた鳥の数が半減した事実という、それぞれの観測結果を支持する証拠が存在する。またチェルノブイリ地方で採取した羽毛の安定同位体分析により、対照エリアの鳥類と比較した場合、あるいは同地域の博物館に所蔵されている鳥類と比較した場合、移住してそこに生息している個体の数がより大きな割合で存在していることを示している。

2011年7月に福島で調査した鳥類についても全体的な傾向は同じであり、福島とチェルノブイリに生息する14の種を調査したところ、個体数と放射線の負の相関関係は有意に福島の鳥類のほうが強かった (Mousseau and Møller 2014)。福島

で確認された強い相関関係は、急性被曝か長期的被曝によるものかという差異を反映したものか、福島に高い水準で存在しているその他の放射性物質（ヨウ素131やセシウム134など）が関係していると思われる。前者について言えば、チェルノブイリに生息する鳥の個体群は20年以上にわたる淘汰を経て耐性を身につけたという反応を示しており、後者については、2011年春に福島で確認された放射性物質はチェルノブイリにはすでに存在していない。

福島での実地調査は2011年から2014年にかけて実施され、初期の結果を分析した結果、所与の場所における環境放射線の水準と、個体数および種の数との間の負の相関関係が、時間の経過とともに強まっていることが明らかになった（Møller et al. 2015; Møller, Nishiumi, and Mousseau 2015）。日本の猛禽類を対象とした包括的調査はまだ行なわれていないものの、最近実施されたオオタカに関する調査研究の結果、震災後の福島において繁殖率が大きく減少したことが明らかになっている（Murase et al. 2015）。しかしこの調査は3つのエリアしか対象にしておらず、観測された放射線被曝の影響を断定するには時期尚早である。またツバメを対象に行なわれた調査研究においても、福島の放射能汚染地域に生息する個体の数が大きく減少しているが、予備的分析の結果、雛鳥の血液細胞における遺伝子損傷との因果関係は現われていない（Bonisoli-Alquati 2015）。

この種の調査で最初のものであるガルニエ＝ラプラスらによる研究（Garnier-Laplace 2015）は、2011年3月11日の核惨事後にモラーらが調査（Møller et al. 2015; Møller, Nishiumi, and Mousseau 2015）した、福島に生息する57種の鳥類（個体数約7,000）の被曝線量を計算したものである。線量計算は観測地点における放射線の状況を基にしており、それぞれの種の生態学的・生活史的性質をモデルに組み入れることで修正を行なっている。また結果に影響を与え得る環境変数（生息地の種類、標高、湖や池など水塊の存在、周辺の気象状況、および時刻など）を統計的に操作した上で、鳥類の総数を推計するために線量を用いている。その結果、総被曝線量は個体数を推測する上で有力（ $p < 0.0001$ ）な予測因子であることが明らかになり、線量の上昇と反比例する形で個体数が減少しており、またしきい値や中間の最適値が存在する兆候は見られなかった。この調査の結果、ED_{50%}（個体総数の50パーセント減少を引き起こす総吸収線量）はわずか0.55グレイと推計

されている。

興味深いことに、蝶類を集団としてみた場合、チェルノブイリと福島 of いずれにおいても放射線レベルと反比例する形で著しい個体数減少が見られた (Mousseau and Møller 2014)。鳥類と蝶類が共に持つ雌のZW性決定システム (つまり雌は異型配偶子を持っている) に特異な何かがあり、そのため突然変異を引き起こす物質に対して脆弱になったのではないかと推測される。

性染色体が雄の場合XY、雌の場合XXである哺乳類と違い、鳥類と蝶類の雌はXYに等しい染色体を有している。性決定に関わる遺伝システムのこうした「逆転現象」は、生殖における突然変異の有害作用をさらに大きくするものであり、そのため個体群の繁殖率を押し下げるのである。

大半の有性生殖生物 (哺乳類など) のように雌が同型の性染色体を持つ種と異なり、鳥類と蝶類においては産卵を行なう性が異型配偶子を有しているため、Z染色体で突然変異が繰り返されたことによる生殖への有害作用は被曝後ただちに現れる、というのが我々の仮説である。雌が同型の性染色体 (哺乳類の場合XX) を有している種においては、遺伝物質が過剰に存在するため、これら染色体で突然変異が繰り返されたことによる有害作用はすぐには発現しない。鳥類や蝶類では遺伝子の数量による代償作用がないと思われることから、これは特に重要である。加えて、突然変異によるわずかな作用は常染色体に比べ性染色体でより急速に蓄積されると思われる。このことは、鳥類および蝶類で確認された放射線へのより大きな脆弱性を少なくとも部分的に説明するものかもしれない。

簡潔に言えば、鳥類と蝶類の雌は逆の性決定システムを有するため、電離放射線によって突然変異の繰り返される可能性が他の種の雌に比べて高い、ということになる。さらに、種の繁殖においては雌の果たす役割が大きい (卵を産むなど) ため、突然変異による影響は、個体群の成長率を決定する上で最も重要な要素となることが多い多産能力に直接的な影響を与え得る。

調査対象としたその他多くの無脊椎動物 (バッタ、トンボ、ハチ、クモなど) について言えば、事故後20年以上を経たチェルノブイリの高濃度汚染地域で個体数の著しい減少が見られたものの、福島で同じ現象が発生した証拠はない。それどころか、少なくとも震災後最初の夏、クモの個体数は著しい増加を示してい

た (Mousseau and Møller 2014)。個体数に対する影響の経時変化がこのように異なっていることは、チェルノブイリにおいて劣性の有害な突然変異が数世代にわたって繰り返された結果であり、福島で観察された鳥類および蝶類に対する即時の影響とも一致している。言い換えれば、クモの数が増えたのは捕食者（鳥類など）の圧力が減少したためかもしれない、だとすれば、捕食の圧力がなくなった結果いくつかの種で個体数の増加が確認されたチェルノブイリ地方において、大型哺乳類の数が増えた事実と合致している。

最近行なわれた研究の結果、放射性物質の突然変異原的性質に対する反応度を決定する際にも、DNAの補修能力が関わっているのではないかと示唆されている。またチェルノブイリに生息する鳥類32種に関し、被曝した種における個体数の減少幅と、ミトコンドリアDNAの置換率の変遷との間に有意な相関関係のあることが、分析の結果示されている (Møller et al. 2010)。置換率の高い種は放射能濃度に対する個体数の減少幅が最も大きく、DNAの補修能力における差異が個体数の増減に影響を及ぼしているのではないかと推測されるものの、この仮説は実験によって検証されなければならない。本質的に、チェルノブイリと福島で電離放射線による遺伝子の損傷が増大したことに対し、ある種の個体はそれに対処する能力が低いのである。

大型哺乳類——特殊なケースか？

チェルノブイリの立入禁止区域で一部の大型哺乳類が数を増やしているという報告が最近なされている。そうした哺乳類が絶えず狩猟の対象とされている種であるなら、それは驚くべきことではないだろう。チェルノブイリと福島の立入禁止区域においては狩猟の可能性が完全にはないものの大きく減少しており、狩猟対象動物にとって格好の避難場所となっている。近年実施された2件の調査研究でも、チェルノブイリの立入禁止区域でオオカミ、シカ、そして野生イノシシの数が増加したと推測されている。しかしこれらの研究は、個体の繁殖や動物の健康に対して放射線がどのような影響を与えたかに関し、厳密な分析を可能にするような方法で実施されたものではない。哺乳類の分布および個体数に関して実

施された以前のより詳細な分析では、同じ区域の放射能濃度がさらに高いエリアにおいて、全ての種（ただしオオカミを除く）で個体数の著しい減少が確認されており（Mousseau and Møller 2014）、また齧歯類について最近実施された複数の調査研究でも、チェルノブイリ立入禁止区域の放射能濃度が高いエリアで個体数と繁殖数の著しい減少（Mappes et al. 2016）に加え、白内障の増加が確かめられている（Lehmann et al. 2016）。これら哺乳類の調査研究を総括すれば、放射線による影響の兆候ははっきり見られるものの、こうした分析には狩猟の圧力も組み込まなければならないと言える。また漁の対象とされてきた福島の水産物についても、最近になって同様の影響が報告されている。

放射線への適応？

自然淘汰による進化は、単純な生物学的過程において不可避でありかつ普遍的に起こる結果である。程度の差こそあれ、全ての生物は生殖することができ、生殖可能性における差異の一部は、多かれ少なかれ遺伝子によって決定される各個体の表現型と関係している。自然界の個体群における遺伝子的多様性を対象とした以前の研究（Mousseau and Roff 1987 など）によると、遺伝子の多様性はほとんどの種に、かつ大半の性質について存在するという。また実験結果からも、高線量の放射線に適応し得る生物のあることが繰り返し立証されている（クマムシを対象とした Jönsson et al. 2008 など）。しかし自然状態で暮らす生物に関し、放射線への適応反応を対象とした研究は比較的少数にとどまっている。筆者らは最近、チェルノブイリに生息する生物の進化反応に関する研究を全て見直した（Møller and Mousseau 2016）ものの、適応こそが電離放射線に対する一般的な反応だとする論拠はほとんど存在しなかった。この疑問を扱うにあたって十分な厳密さを有する研究論文14点のうち、進化した適応反応の存在を示すものは1点（バクテリアに関する論文、Ruiz-González et al. 2016）に過ぎなかった。さらに、これら自然個体群でホルミシス（訳注：放射性物質が低濃度あるいは微量に用いられれば有益な作用をもたらすとする説）が見られたとする研究論文は現時点で存在しない。放射線が存在する状況下で適応反応が進化しないことにはいくつか理由があり、

適応反応に関する遺伝子的差異が個体群の中に存在しない可能性、あるいは進化反応を引き起こすほど事故から十分な時間が経過していない可能性もそれに含まれる。生物が数千年をかけて環境放射線という自然淘汰に適応してきた地域に関する研究から、適応反応の基となったメカニズムを解明する貴重な手がかりだけでなく、原発事故の影響を受けた地域でこうした反応が起きる可能性についても、価値ある洞察がもたらされるだろう (Mousseau and Møller 2014)。

原発事故の生態系への影響

生態系は地球上で暮らす生命体に対し、基本的な必要事項の多くを与えている。人間にとってそれは水、薬品、食料の供給であり、そして他の多くの機能に加え、地球は生産力を提供している。植物、動物、微生物の個体、個体群、そして共同体に対する放射線の影響は様々であることから、生態系の機能にまで影響が及んでいたとしても不思議ではない。現在のところ、チェルノブイリあるいは福島において生態系レベルの研究はほとんど行なわれていない。しかしデータは限られていても、生態系が原発事故の影響に無縁でないことは明白である。最近行なわれた調査研究でも、チェルノブイリ原発事故で発生した放射線によって植物の基礎生産力が負の影響を受けたことが明らかになっている。つまり1986年以降、とりわけ干ばつによるストレスが加わった年に、樹木の成長率が低下したのである (Mousseau et al. 2013)。地表に落ちた枯葉の分解率に関する実証研究でも、放射線の線量が高い地域で分解率が劇的に減少していることが示されており、微生物（特に菌類とバクテリア）の群集に影響を及ぼした可能性が指摘されている (Mousseau et al. 2014)。枯葉の分解におけるこうした影響は、土壌中の養分循環率に大きな影響を与え、ひいては地域全体における植物の生産力にも打撃を及ぼし得ると考えられる。事実、チェルノブイリで観測された樹木の成長率低下は、地中の微生物群集に対する放射線の影響と間接的に関係しているかもしれない。植物がミネラル養分を吸収するにあたってはこれら微生物群集が重要な役割を果たすからである。またその他の調査研究においても、植物、授粉を媒介する昆虫、そして果実産出との間の相互作用に放射線が影響を及ぼし、生態系におけるその

他の構成要素にも明らかに負の影響を与えていることが示されている (Møller, Barnier, and Mousseau 2012 など)。また現在では、放射線によるストレスが気候変動と相互に作用し合い、放射能汚染地域の周辺に暮らす人間を絶えず脅威に晒す形で、生態系の継続様式に影響を及ぼすものと考えられている。一例を挙げると、放射能汚染地域で枯葉の分解率が低下したことによって生物の死骸 (枯葉など) が地表に蓄積し、その結果、森林火災を引き起こす燃料が劇的に増加した。事実、この地域における気候変動の結果として、近年森林火災の規模と頻度がともに増大している (Mousseau et al. 2014)。枯葉自体の放射能濃度が高いことから、森林火災は放射性物質を揮発させ、周辺諸国の人口密集地域にこれら汚染物質を拡散させる恐れがある (Evangelidou et al. 2015)。そのことは、2015年夏にチェルノブイリの立入禁止区域で連続して発生した森林火災でも示されている (Evangelidou et al. 2016)。

結 論

結論として、チェルノブイリと福島で発生した核の惨事は、自然界の個体群が地域的ないし局地的規模で、突然変異原に急性的・慢性的に晒されたことによる遺伝子学的、生態学的、進化学的、そして生態系の影響を検証する上で特異な機会となった。最近の研究結果によると、分子レベルから生態系に至るまで、生物システムに対する大小の影響が数多く発生しており、そのため今後数十年あるいは数百年にわたり、生態系の形態および機能にも影響を及ぼしかねないことが示唆されている。チェルノブイリで近年実施された個体群への影響に関する調査 (Garnier-Laplace et al. 2013) でも、様々な自然的ストレス要因 (生物および非生物) の下で暮らす個体群が電離放射線の影響を受ける度合いは、原子力規制機関や政府機関が通常用いている方法で推計した結果に比べおよそ10倍に上ることが示されている。このことは、実証的な生態学的研究と、放射線効果に関する通常の生態学的モデルから得られた予測結果との間に明らかな差異が見られることについて、その原因を明らかにするものと思われる。チェルノブイリおよび福島に生息する生物を比較対照することで、以前の研究では不可能だった科学的厳密性

(つまり繰り返し)を得ることが可能になり、また同時に、反応が生じ得る時間的枠組みの分析と、予測モデルの発展も可能になることで、将来原発事故が発生した場合における生態系の管理と保全にとっても有益だと考えられる。また分子遺伝学的技術における最近の進歩から、放射性突然変異原の生物学的影響に関する基礎研究に持続的かつ大規模に資金を投入し、福島およびチェルノブイリの原発事故をはるかに超える生態系をも対象とすることで、多くの新たな知識が得られるものと思われる。近い将来に大小の原発事故が発生するのはほぼ確実であり、過去の原発事故による環境への影響を突き止めるために必要な基礎研究に投資することが賢明であると言えよう。

〔献辞〕

我々はウクライナ、ベラルーシ、日本など世界各地の友人および同僚に深い感謝を捧げる。彼らがいなければ、この論文が結実することはなかった。また我々の研究はフランス国立科学研究センター (CNRS)、アメリカ国立科学財団、アメリカ国立衛生研究所、CRDFグローバル、ナショナルジオグラフィック協会、サウスカロライナ大学、フルブライト財団、サミュエル・フリーマン慈善信託、アメリカ学術団体評議会、中部大学などの諸機関、そして日米の個人から資金援助を受けている。最後に、ユージーン・ピサネッツ、ディミトリ・グロジンスキー、そしてアレクセイ・ヤブロコフに本論を捧げる。

〔参考文献〕

- Bonisoli-Alquati, A., K. Koyama, D. J. Tedeschi, W. Kitamura, H. Suzuki, S. Ostermiller, E. Arai, A. P. Møller, and T. A. Mousseau, 2015. Abundance and genetic damage of barn swallows from Fukushima. *Scientific Reports* 5: 9432. doi.org/10.1038/srep09432
- Burris, J. E., J. C. Bailar III, H. L. Beck, A. Bouville, P. S. Corso, P. J. Culligan, P. M. Deluca Jr, R. A. Guilmette, G. M. Hornberger, M. Karagas, R. Kasperson, J. E. Klaunig, T. Mousseau, S. B. Murphy, R. E. Shore, D. O. Stram, M. Tirmarche, L. Waller, G. E. Woloschak, and J. J. Wong, 2012. *Analysis of Cancer Risks in Populations Near Nuclear Facilities: Phase I*. Washington, DC: National Academies Press.
- Evangelidou N., Y. Balkanski, A. Cozic, W. M. Hao, F. Mouillot, K. Thonicke, R. Paugam, S. Zibitsev, T. A. Mousseau, R. Wang, B. Poulter, A. Petkov, C. Yue, P. Cadule, B. Koffi, J. W. Kaiser, and A. P. Møller, 2015. Fire evolution in the radioactive forests of Ukraine and Belarus: Future risks for the population and the environment. *Ecological Monographs* 85(1): 49–72. doi.

- org/10.1890/14-1227.1
- Evangelidou, N., S. Zibtsev, V. Myroniuk, M. Zhurba, T. Hamburger, A. Stohl, Y. Balkanski, R. Paugam, T. A. Mousseau, A. P. Møller, and S. I. Kireev, 2016. Resuspension and atmospheric transport of radionuclides due to wildfires near the Chernobyl nuclear power plant (CNPP) in 2015: An impact assessment. *Scientific Reports* 6: 26062. doi.org/10.1038/srep26062
- Fairlie, I., 2014. A hypothesis to explain childhood cancers near nuclear power plants. *Journal of Environmental Radioactivity* 133: 10–17. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.07.024
- Galván, I., A. Bonisoli-Alquati, S. Jenkinson, G. Ghanem, K. Wakamatsu, T. A. Mousseau, and A. P. Møller, 2014. Chronic exposure to low-dose radiation at Chernobyl favours adaptation to oxidative stress in birds. *Functional Ecology* 28(6): 1387–403. doi.org/10.1111/1365-2435.12283
- Garnier-Laplace, J., K. Beaugelin-Seiller, C. Della-Vedova, J. M. Métivier, C. Ritz, T. A. Mousseau, and A. P. Møller, 2015. Radiological dose reconstruction for birds reconciles outcomes of Fukushima with knowledge of dose-effect relationships. *Scientific Reports* 5: 16594. doi.org/10.1038/srep16594
- Garnier-Laplace, J., S. Geras'kin, C. Della-Vedova, K. Beaugelin-Seiller, T. G. Hinton, A. Real, and A. Oudalova, 2013. Are radiosensitivity data derived from natural field conditions consistent with data from controlled exposures? A case study of Chernobyl wildlife chronically exposed to low dose rates. *Journal of Environmental Radioactivity* 121: 12–21. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.01.013
- Jönsson, K. I., E. Rabbow, R. O. Schill, M. Harms-Ringdahl, and P. Rettberg, 2008. Tardigrades survive exposure to space in low Earth orbit. *Current Biology* 18(17): R729–31. doi.org/10.1016/j.cub.2008.06.048
- Kivisaari, K., Z. Boratynski, S. Calhim, P. Lehmann, T. Mappes, T. A. Mousseau, and A. P. Møller, 2016. Cut to the chase: Radiation effects on sperm structure at Chernobyl. In review.
- Lehmann, P., Z. Boratynski, T. Mappes, T. A. Mousseau, and A. P. Møller, 2016. Fitness costs of increased cataract frequency and cumulative radiation dose in natural mammalian populations from Chernobyl. *Scientific Reports* 6: 19974. doi.org/10.1038/srep19974
- Mappes, T., Z. Boratynski, K. Kivisaari, G. Milinevski, T. A. Mousseau, A. P. Møller, E. Tukalenko, and P. Watts, 2016. Radiation effects on breeding and population sensitivity in a key forest mammal of Chernobyl. In review.
- Møller, A. P., and T. A. Mousseau, 2006. Biological consequences of Chernobyl: 20 years on. *Trends in Ecology and Evolution* 21(4): 200–7. doi.org/10.1016/j.tree.2006.01.008
- Møller, A. P., and T. A. Mousseau, 2013. The effects of natural variation in background radioactivity on humans, animals and other organisms. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 88(1): 226–54. doi.org/10.1111/j.1469-185X.2012.00249.x
- Møller, A. P., and T. A. Mousseau, 2015. Strong effects of ionizing radiation from Chernobyl on

- mutation rates. *Scientific Reports* 5: 8363. doi.org/10.1038/srep08363
- Møller, A. P., and T. A. Mousseau, 2016. Are animals and plants adapting to low-dose radiation at Chernobyl? *Trends in Ecology and Evolution* 31(4): 281–9. doi.org/10.1016/j.tree.2016.01.005
- Møller, A. P., and T. A. Mousseau, 2017. Radiation levels affect pollen viability and germination among sites and species at Chernobyl. *International Journal of Plant Species* 178(7): 537–45. doi.org/10.1086/692763
- Møller, A. P., F. Barnier, and T. A. Mousseau, 2012. Ecosystem effects 25 years after Chernobyl: Pollinators, fruit set, and recruitment. *Oecologia* 170: 1155–65. doi.org/10.1007/s00442-012-2374-0
- Møller A. P., J. Erritzøe, F. Karadas, and T. A. Mousseau, 2010. Historical mutation rates predict susceptibility to radiation in Chernobyl birds. *Journal of Evolutionary Biology* 23(10): 2132–42. doi.org/10.1111/j.1420-9101.2010.02074.x
- Møller, A. P., F. Morelli, T. A. Mousseau, and P. Tryjanowski, 2016. The number of syllables in Chernobyl cuckoo calls reliably indicate habitat, soil and radiation levels. *Ecological Indicators* 66: 592–7. doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.037
- Møller, A. P., T. A. Mousseau, I. Nishiumi, and K. Ueda, 2015. Ecological differences in response of bird species to radioactivity from Chernobyl and Fukushima. *Journal of Ornithology* 156(S1): 287–96. doi.org/10.1007/s10336-015-1173-x
- Møller, A. P., I. Nishiumi, and T. A. Mousseau, 2015. Cumulative effects of radioactivity from Fukushima on the abundance and biodiversity of birds. *Journal of Ornithology* 156(S1): 297–305. doi.org/10.1007/s10336-015-1197-2
- Møller, A. P., J. C. Shyu, and T. A. Mousseau, 2016. Ionizing radiation from Chernobyl and the fraction of viable pollen. *International Journal of Plant Sciences* 177(9): 727–35. doi.org/10.1086/688873
- Mousseau, T. A., G. Milinevsky, J. Kenney-Hunt, and A. P. Møller, 2014. Highly reduced mass loss rates and increased litter layer in radioactively contaminated areas. *Oecologia* 175(1): 429–37. doi.org/10.1007/s00442-014-2908-8
- Mousseau, T. A., and A. P. Møller, 2014. Genetic and ecological studies of animals in Chernobyl and Fukushima. *Journal of Heredity* 105(5): 704–9. doi.org/10.1093/jhered/esu040
- Mousseau, T. A., and D. A. Roff, 1987. Natural selection and the heritability of fitness components. *Heredity* 59(Pt 2): 181–97. doi.org/10.1038/hdy.1987.113
- Mousseau, T. A., S. M. Welch, I. Chizhevsky, O. Bondarenko, G. Milinevsky, D. Tedeschi, A. Bonisoli-Alquati, and A. P. Møller, 2013. Tree rings reveal extent of exposure to ionizing radiation in Scots pine *Pinus sylvestris*. *Trees: Structure and Function* 27(5): 1443–53. doi.org/10.1007/s00468-013-0891-z
- Murase, K., J. Murase, R. Horie, and K. Endo, 2015. Effects of the Fukushima Daiichi accident on goshawk reproduction. *Scientific Reports* 5: 9405. doi.org/10.1038/srep09405

- Otake, M., and W. J. Schull, 1991. A review of forty-five years study of Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivors: Radiation cataract. *Journal of Radiation Research* 32: 283–93. doi.org/10.1269/jrr.32. SUPPLEMENT_283
- Otake, M., and W. J. Schull, 1998. Radiation-related brain damage and growth retardation among the prenatally exposed atomic bomb survivors. *International Journal of Radiation Biology* 74(2): 159–71. doi.org/10.1080/095530098141555
- Ruiz-González, M. X., G. Á. Czirják, P. Genevau, A. P. Møller, T. A. Mousseau, and P. Heeb, 2016. Resistance of feather-associated bacteria to intermediate levels of ionizing radiation near Chernobyl. *Scientific Reports* 6: 22969. doi.org/10.1038/srep22969
- Samet, J. M., and J. Seo, 2016. The financial costs of the Chernobyl nuclear power plant disaster: A review of the literature. Zurich: Green Cross Switzerland.
- US GAO (Government Accountability Office), 2011. Nuclear Regulatory Commission: Oversight of underground piping systems commensurate with risk, but proactive measures could help address future leaks. Report GAO-11-563. Washington, DC: US Government Accountability Office.
- Wheatley, S., B. K. Sovacool, and D. Sornette, 2016. Reassessing the safety of nuclear power. *Energy Research & Social Science* 15: 96–100. doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.026

This text is taken from *Learning from Fukushima: Nuclear power in East Asia* (Japanese version), edited by Peter Van Ness and Mel Gurtov, co-published 2020 by ANU Press and Ronso-sha Publishing.

doi.org/10.22459/LF.2020.09