

福島原発事故に伴う放射性降下物によるワタムシ（アブラムシ科昆虫）の形態異常と集団の回復

秋元 信一

要旨

福島第一原発事故による放射性降下物の生物に対する影響を明らかにするために、ゴール(虫こぶ)形成性のアブラムシを用いて、福島集団と非汚染地域7地点の他集団との間で形態および生存率を比較した。特に、事故後初の有性生殖から生じた卵から孵化する虫こぶ形成者(1齢幼虫)の形態に注目した。2012年春に、福島第一より32km地点で得られた167頭のオオヨスジワタムシ1齢幼虫のうち13.2%は形態異常を示し、4個体(2.4%)は顕著な異常であった。これに対し、7地点の他集団では形態異常を示す個体の比率は、0.0%から5.1%(平均3.8%)であった。形態異常を示す個体と死亡個体の割合は、福島集団で他の対照集団よりも統計的に有意に高いことが示された。これと同様に、同時に採集された134頭のクロハラヨスジワタムシの1齢幼虫のうち5.9%は形態異常を示し、内1頭は顕著な形態異常であった。ところが、オオヨスジワタムシのゴール中で生み出された543頭の第2世代幼虫の内、わずかに0.37%が形態異常を示した。このことから、第1世代に見られた形態異常の大多数は次世代には遺伝しないことが明らかとなった。さらに、2013年春に同一地点で採集したサンプルを分析したところ、両種のアブラムシの生存率と健全個体の割合が、2012年のサンプルよりも有意に高まったことが明らかとなった。したがって、本研究の結果から、2013年に放射線のレベルが低下しただけではなく、アブラムシの放射線耐性が選択を受けたことを通じて、アブラムシの生存力と健全性が向上したことが示唆された。

1 はじめに

福島第一原発事故による放射性降下物が野生生物にどのような影響を及ぼすかは、一般市民も研究者も強い関心を示しているものの、ほとんど実態が明らかにされていない。チェルノブイリ事故に関しては、放射性物質の生物への蓄積や生物への影響に関して数多くの報告はあるが(Møller and Mousseau 2006, Yablokov *et al.* 2009)、事故直後から経時的に特定種や生態系の変化を追跡した研究は皆無である。とりわけ、事故直後の強い放射能汚染が生物にどのような影響を及ぼすかに関しては、検証に耐える証拠が集められてこなかった。チェルノブイリ地域では、Møller 博士、Mousseau 博士らの研究グループがツバメに現れた形態的变化、繁殖率、生体防御能力について詳細な報告を行い(Møller *et al.* 2005)、また昆虫類の棲息密度の変化を報告している。これらの研

究はチェルノブイリ事故後5年以上たってから行われたものであるが、チェルノブイリの強い汚染地域では、現在でも、ツバメに顕著な放射線の影響が認められ、繁殖率の低下が報告されている(Møller *et al.* 2005)。また、さまざまなグループの昆虫では、事故後20年を経ても、地上放射線量の高い地域ほど昆虫の生息数が減少する負の相関が明らかにされている(Møller and Mousseau 2009)。

放射性物質の生物への影響に関しては、すでに福島県の各地から得られたヤマトシジミ(シジミチョウ科)に顕著な形態異常が現れていることが報告されており(Hiyama *et al.* 2012, 大瀧 2013)、この報告は大きな反響を呼んだ。さらにそれ以前の報告で、ヨーロッパの原子力発電所や再処理工場周辺から多量のカメムシを集めて分析すると、カメムシの約1割に形態異常が生じているとする結果が発表されている(Hesse-Honegger and

Wallimann 2008)。

本稿では、福島第一原発から直線距離で 32 Km 離れた川俣町山木屋地区で行われたアブラムシに関する調査結果について報告する。ハルニレに形成されたゴール (gall、虫こぶ) から得られたワタムシ 2 種に顕著な形態異常が見出されたことから (Akimoto 2014)、本稿ではその発生要因について考察した。本稿が他の報告と異なるのは、同じ地点で 2 年間調査を行い、形態異常率の年間の変化を明らかにした点である。高線量汚染地域では、生物の形態異常率は年々増加していくのであろうか？ それとも、形態異常は事故直後に急増し、その後は収束していくのであろうか？ 本稿は、そうした疑問にも答えたい。

ここで、著者が本研究を行うに至った経緯を述べておく。

原発事故が起こった 2011 年には、筆者は取りたてて福島の生物に関心をいただいていたわけではなかった。いずれ大規模な調査が進められ、「専門家」が調査に入るものと思いついでいた。しかしながら、2012 年になっても、生態学者が福島の汚染地域で研究を始めたという話しは、まったく聞こえてこなかった。動植物への放射性物質の蓄積量を測定している研究グループの活動は報道で知ってはいたものの、生物の数や繁殖あるいは生態系全体がどのような影響を受けるのかに関する調査が進んでいるとか、計画されているという話しは全く耳にすることがなかった。しかし、この時点で、琉球大学の大瀧先生と院生の方々が、すでにヤマトシジミに焦点を絞り、資料を集められていた。この賞賛に値する素早い活動を私は全く知ることが出来なかった。この動きを知っていれば、自ら福島で調査をしようという気持ちにはならなかったであろう。2012 年初頭の段階で、チェルノブイリで活躍しておられた Møller 博士や Mousseau 博士が福島に入り、生物の数の変化を網羅的に調べ始めていることを報道で知り、この方々の素早い動きに敬服の念をいただいたのではあるが、では日本の研究者の動きはどうかと考へた。自分の国で起こった大規模な潜在的環境変動を黙ってみているというのは、これはいくら何でもおかしいだろうと思いついた。これだけの放射能汚染が起こって、その影響を調べないというのは、日々忙しい思いをし、急に新たな課題を背負い込む余裕すらないとしても、後世に申し開きが出来な

いであろう、という思いをいただいていた。転機となったのは、知り合いの生物学者と親しく話をした席のことであった。この生物学者は福島市出身で、故郷の生態系がどのようになっているのかを知りたいという思いとともに、なぜ日本の生態学者が調べ始めないのかについて、疑問をいただいていた。話し合いの中で意見が一致し、では一緒に行ってみましょうかと話しがまとまったことから、すべてが始まったのであった。

とりあえず福島に出かけるとしても、初めてでかける土地で、意味ある研究が出来る勝算はまったくなかった。数泊の調査旅行しか可能でなかったため、現状をよく観察し、初めての地で出来る限り効率よく採集できる昆虫を対象にした採集計画を立てた。こうしてキノコ食ショウジョウバエ類、エンドウヒゲナガアブラムシ等の採集を行うことが出来た。

今回の報告は、こうした採集品の中に含まれていた虫こぶを形成するアブラムシを検鏡したことから始まった。実は福島に出向くまで、ハルニレにゴールを形成するアブラムシが福島に分布することをまったく知らなかった。筆者は、北海道で長年にわたってゴール形成性のアブラムシを研究材料に用いており、北大構内のハルニレに多くのアブラムシがゴールを形成することを観察してきた。川俣町の山道で、北大構内同様、ハルニレにたくさんゴールが作られた樹を見つけたときには、ここにもハルニレが分布し、ゴールが出来るのだと素朴に驚き、この材料を用いれば効率よく放射性降下物の影響を検出できることが瞬間的に閃いた。(が、実は瞬間的にはない。10 個ほどのゴールサンプルを採集し、その場を立ち去ったのであるが、車中でつらつら考えるうちに、これは得がたい材料であることに気づき、共同研究者にお願いして車を元の場所に戻してもらって採集し直したのであった。)

2 ワタムシへの影響

2.1 ワタムシの環境指標としての利点

ワタムシはアブラムシ科 (半翅目) に属する昆虫で、ハルニレ、ドロノキなどにゴール (虫こぶ) を形成することで知られている。ゴール形成性のアブラムシには、放射線の影響を評価する指標生物として、3 つの利点がある。第一に、アブラムシは、春から秋まで無性生殖 (クローン増殖: メ

スだけで繁殖する)によって多くの世代を繰り返す昆虫で、増殖率も極めて高い。このため、アブラムシのメスは、常にその腹部に胚子を多量に発育させている。どの生物においても、急速に発育中の胚子ほど放射線の影響を受けやすいことが知られている (Russell and Russell 1952, Vereecke and Pelerents 1969, Cerutti 1974)。2011年3月11日の原発事故以降、ワタムシは高濃度の汚染の中で、その秋まで多くの世代がクローン増殖を行った。このため発育中の胚子は、高い線量によって悪影響を受けた可能性がある。仮に遺伝子レベルでの損傷が生じれば、損傷された遺伝子はクローン増殖によって次の世代に伝えられ、秋までの間に、多量の遺伝子損傷がクローン系統内に蓄積された可能性がある。2011年の秋には有性生殖が行われたために、遺伝的組換えの結果、特定の個体には多量に損傷遺伝子が受け渡されることも起こり得たであろう。この結果、事故後初めての有性生殖によって生み出された卵から孵化する幼虫には、多量の表現型変異 (形態や性質などの変化) が表れる可能性がある (Lynch and Gabriel 1983)。したがって、アブラムシを用いることで、他の生物では調査困難な表現型の大規模な変異性を検出できると期待できる。

第二に、アブラムシは不完全変態昆虫として、1齢幼虫から体各部の長さを計測可能であり、形態レベルで生じる変異があれば、容易に定量化可能である。これまでの研究からもアブラムシの1齢幼虫は、環境の影響や遺伝的影響を受けやすく、大きな変異性が見いだせることが明らかになっている (Akimoto 1988, 1990, 1998, 2006, Komatsu and Akimoto 1995, Akimoto and Yamaguchi 1997, Komazaki 1998)。一方、完全変態昆虫では、表現型変異が生じていても、ウジ虫状の幼虫であるため、よほど大規模な形態変異以外は変異を検出することが困難であろう。

第三に、ゴール形成性アブラムシは、越冬卵から孵化した1齢幼虫がゴールを形成し、ゴール内で1齢は成虫へと成長し、無性生殖的に産子する。卵から孵化した世代は幹母世代と呼ばれる。したがって、1齢幼虫の脱皮殻はゴール内に残されるので、その形態を精査でき、また第2世代目の1齢幼虫の形状を調べることも可能である (図1)。仮に、ゴール内で幼虫が死亡すれば、その形態を調べることもできる。昆虫類の形態学では伝統的に成虫形態が注目されてきたが、成虫を用いると、成虫まで成長可能な生存力の高い個体だけを調査対象とすることになる。一方、1齢幼虫に注目すれば、生存力の低い個体も調査の対象にでき、特

に成長途中で発育が停止した個体の変異性を調べることが可能である。一般に、野外において、脚や触角が欠けた昆虫が発見されても、捕食による影響を排除することは困難である。しかし、完全閉鎖空間であるゴール内で発見される昆虫が脚を失っていたら、捕食の可能性を排除できるというメリットもある。ゴール形成アブラムシの1齢幼虫に形態異常が見いだされた例は、別の種において筆者自身が報告している (Akimoto 1985)。

採集したゴールはピンセットで解剖し、中のアブラムシを80%アルコール中に保存した。幹母1齢幼虫の脱皮殻はキチン化が強く、ゴール内で容易に見つけることができる。福島県川俣町で採集したすべてのゴールから幹母1齢幼虫を取りだし、スライドグラス上にカナダバルサム (接着封入剤) で封入して永久標本を作成した。幹母成虫およびゴール内で死亡した幹母が見出された場合には、それらもスライド上に封入した。他地域で採集されたサンプルからも、同様にスライド封入した永久標本を作成した。

2.2 ヨスジワタムシの生活史

ヨスジワタムシ属のアブラムシは2種類の植物に寄生し、季節によって寄主植物を換える。4月下旬頃、ハルニレ幹上の越冬卵から孵化した幼虫 (幹母幼虫) は産卵場所の樹皮から芽吹いたばかりの新芽まで移動し、展開中の新葉でゴール形成を開始する。ゴール形成が行われる植物を一次寄主と呼ぶ。新葉の下面に静止し、口針によって葉の組織を刺激することで葉に肥大成長を生じさせ、幹母幼虫は膨れあがった葉の組織内に取り込まれる (図1)。ゴール内で成虫に達し、その後無性生殖によって第二世代の1齢幼虫を産子する。第二世代はゴール内で有翅型に成長し、ゴール壁の割れ目から出現し、ゴールを離れて二次寄主のイネ科草本に移動する (図2) (オオヨスジワタムシの場合にはススキ、クロハラヨスジワタムシの場合にはエノコログサ)。二次寄主上で有翅型は無性生殖的に産子し、第三世代の1齢は根に潜り込む。初夏から秋まで、数多くの世代が2次寄主の根で

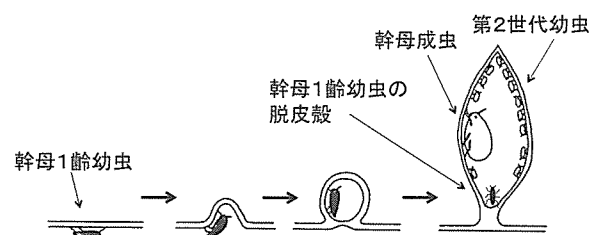
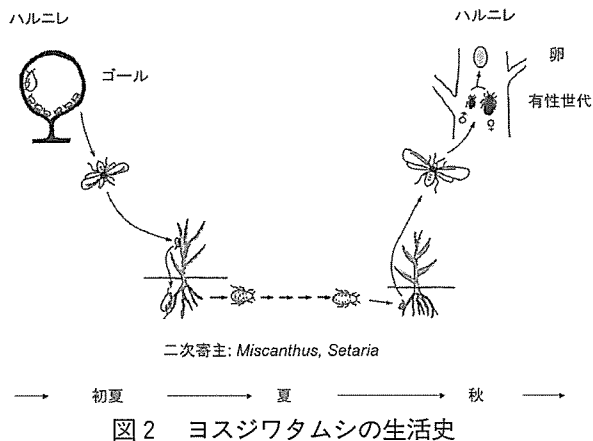


図1 ヨスジワタムシ幹母によるゴール形成を示す模式図



コロニーを維持し、秋に産出された幼虫が有翅型に成長する。秋の有翅型は10月中旬に二次寄主を離れ、一次寄主のハルニレに飛来し、その樹皮上で有性メスとオスを産出する。有性世代は交尾し、樹皮上に越冬卵を生み付ける。越冬卵は露出された状態で生み付けられており、放射性降下物が直接接触する状況にある。

2.3 2012年調査サンプルと他地域のサンプルとの形態異常の比較

形態の調査には、川俣町で6月3日に採集されたゴール由来の167頭のオオヨスジワタムシ *Tetraneura sorini* および136頭のクロハラヨスジワタムシ *Tetraneura nigriabdominalis* の幹母1齢幼虫を用いた。福島サンプルに対する比較群として、日本各地7地域のハルニレあるいはアキニレから採集された1559頭のオオヨスジワタムシおよび1677頭のクロハラヨスジワタムシの幹母1齢幼虫を用いた。1齢幼虫の体長は、オオヨスジワタムシが平均0.90 mm、クロハラヨスジワタムシが0.72 mmであった。川俣町採取地点での採集日の空間放射線量は、1 mの高さで4.0 $\mu\text{Sv/h}$ 、地表部で6.0 $\mu\text{Sv/h}$ であった。比較においては、死亡の有無は問わず、形態異常だけを問題とした。したがって、サンプル中には、死亡個体も含まれるが、形態異常が生じていなければ、その個体は異常なしと判定した。一方、生存していても、高度な異常と判定された個体も含まれる。死亡率については次の節で分析する。

福島のサンプルおよび他地域のサンプルを鏡検した際に、さまざまな形態異常を示す1齢幼虫が見出された。異常の程度はさまざまで、ごく軽微な異常から極端な左右非対称や新規の形質状態まで、多様性に富んでいた。福島集団、他地域集団を問わず最も多く見出されたのは、1齢幼虫の付属肢（脚や触角）において、組織の壊死が生じる

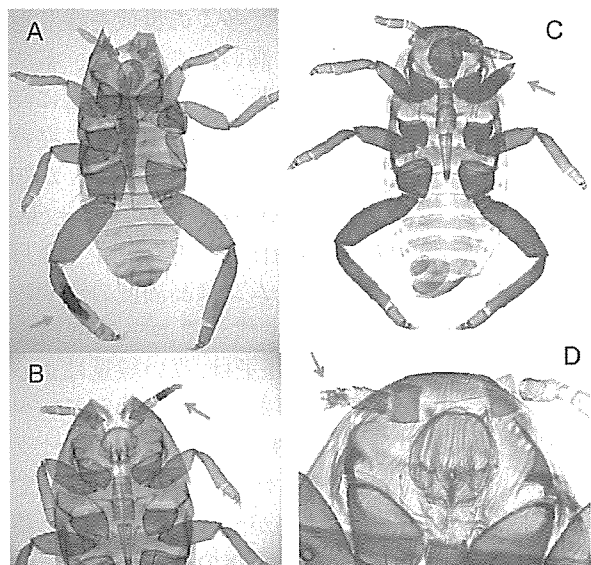


図3 ヨスジワタムシ1齢幼虫における組織の壊死および付属肢の欠損(矢印部)。AとBは組織の壊死、CとDは脚や触角の欠損。

ケースであった。組織の壊死が生じると、鏡検した際に、1齢幼虫の付属肢内部に壊死した組織がメラニン化した塊として残されているのが確認できる。この結果、この幼虫が脱皮すると、2齢以降の幼虫では壊死部分より先の付属肢が失われる(図3)。このようにして、ゴール内の多くの幹母成虫は付属肢を失っていた。組織の壊死の程度が進むと、脚や触角を欠いた状態で幼虫が孵化してきた。1齢幼虫の段階から脚や触角を欠いた個体は、外骨格が発生できなかったのではなく、内部の筋肉等の組織の発生に問題が生じたように思われた。さらに軽微な形態異常として、脚や触角の湾曲、腹部の小瘤、腹部体節の部分的融合などが見出された(Akimoto 2014)。

形態異常をその程度によって三段階に分類した。最も程度の軽いレベル1には、1本の付属肢での組織の壊死、脚の湾曲や小瘤が含まれる。レベル2では、2本の付属肢での組織の壊死、2本の付属肢の湾曲が含まれた。さらに1本の脚の欠損や触角の欠損もレベル2に分類した。レベル3の異常には、2本以上の付属肢における欠損、新しい形質状態、極端な左右非対称形質が含まれた。形態異常のカテゴリー分けは、福島集団での異常性の高さを示すために行ったが、統計分析には、この分類結果は用いなかった。

福島産の167頭のオオヨスジワタムシ幹母のうち13.2%の個体が何らかの形態異常を示した。これに対して、7地域の比較群では、0%から5.1% (平均3.8%)の個体に形態異常が認められた(図4)。福島における形態異常率(レベル1からレベ

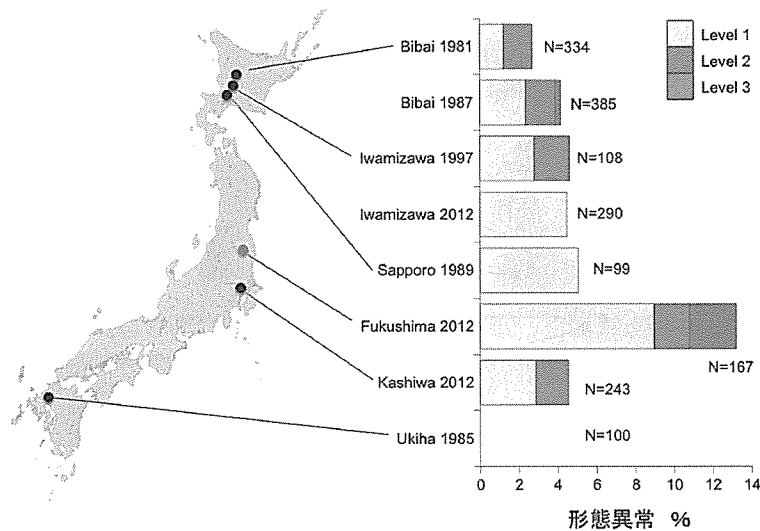


図4 オオヨスジワタムシ 1 齢幼虫における形態異常率の 8 集団の比較

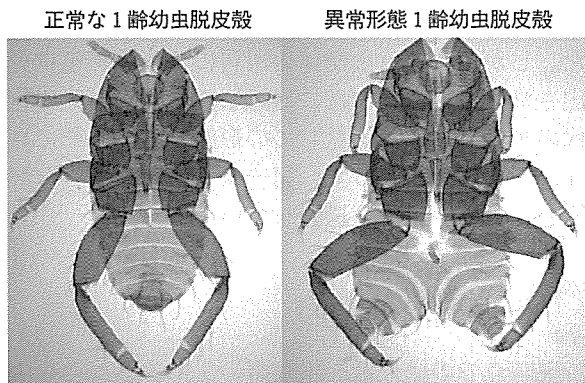


図5 オオヨスジワタムシ 1 齢幼虫における形態異常の例 (2つの腹部)

ル3の合計)は、比較群の形態異常率に比べて有意に増加が認められた (Akimoto 2014)。とりわけ、福島サンプルでは、レベル3の異常が4個体で見出された。これらの異常のうち3例を示した (図5、6)。これに対して比較群でのレベル3の異常は1987年に美唄市で得られた1頭のみにとどまる。

福島産の136頭のクロハラヨスジワタムシ幹母1齢幼虫のうち、形態異常を示した個体は5.9%であった (図7)。1頭は、レベル3の形態異常を示した。他の6地域と比べると、福島サンプルで最も形態異常率が高かったが、すべての他集団との間に有意差は検出されず、一部の集団との間に有意差が見出された。

2.4 川俣町2012年サンプルと2013年サンプルとの比較

同一のハルニレ調査木を用いて、2013年には2012年とほぼ同じ時期にゴールの採集を行い、幹

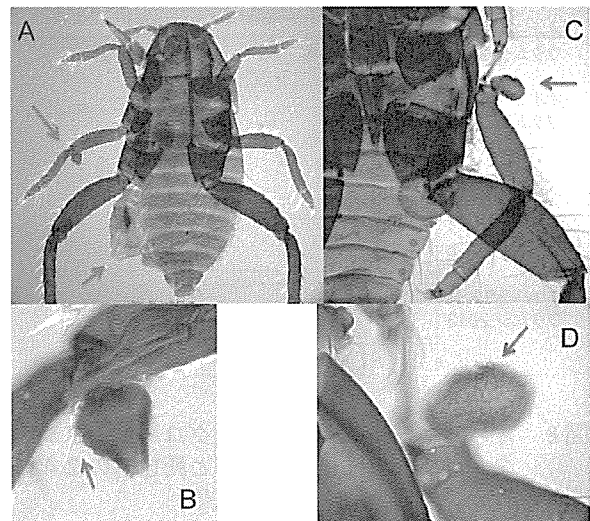


図6 オオヨスジワタムシ 1 齢幼虫における形態異常の例

AとB (拡大図)は瘤状突起 (脚と相同の構造と思われる)と腹部の張り出し、CとD (拡大図)は脚付け根と腹部の瘤状隆起。

母の形態異常率、死亡率を年間で比較した。本節での分析では、形態異常率は生存している幹母だけに限定しているため、前節の形態異常率とは一致していない。形態に異常が生じていた場合でも、幹母が死亡していれば、その個体は死亡と判定した。オオヨスジワタムシとクロハラヨスジワタムシ両種を通じて、2013年には、死亡率、形態異常率とも減少し、健全個体の割合が有意に増加した (図8)。ロジスティック回帰分析を行ったところ、幹母の運命 (健全、形態異常、死亡) に関して、年間の差異 ($df=2, X^2=33.1, P<0.0001$) と種の違い ($df=2, X^2=8.9, P<0.011$) は高度に有意であったが、年と種の交互作用は有意とはなら

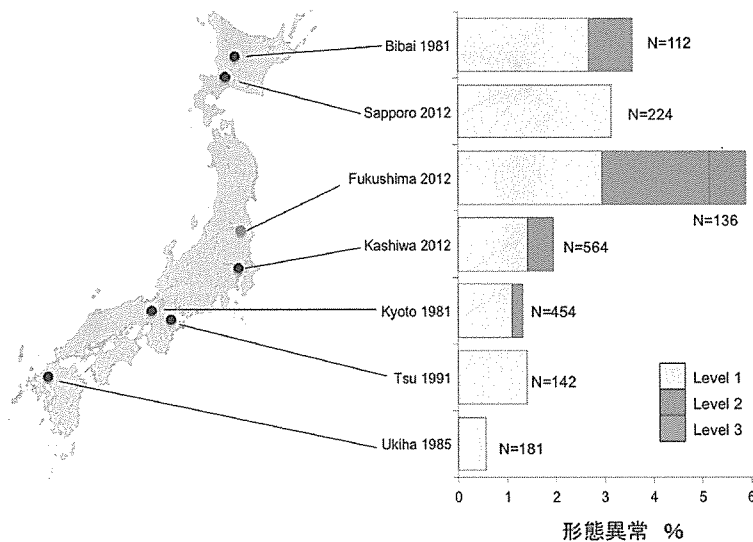


図7 クロハラヨスジワタムシ 1 齢幼虫における形態異常率の 7 集団の比較

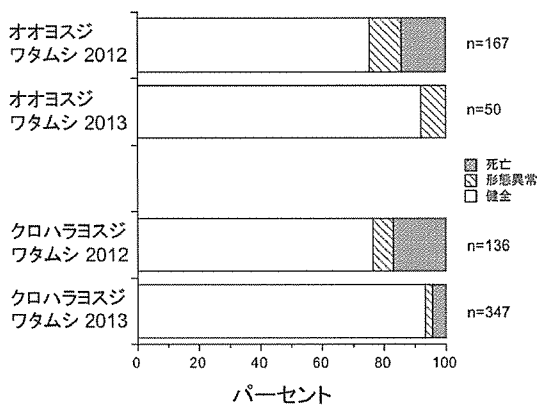


図8 オオヨスジワタムシおよびクロハラヨスジワタムシにおける形態異常率と死亡率の 2 年間の比較

なかった ($df=2$, $X^2=4.4$, $P=0.111$)。したがって、年によって環境からの影響に差が見られたことと、種によって感受性に違いがあることが推測できる。クロハラヨスジワタムシでは、オオヨスジワタムシよりも形態異常率は低いものの、死亡率はむしろ高くなった。採集地点での 2013 年 5 月 21 日時点での空間線量は高さ 1 m で $2.4 \mu\text{Sv/h}$ 、地表で $4.0 \mu\text{Sv/h}$ であり、前年よりも減少した。

2.5 2012 年ゴール内の第二世代幼虫の形態異常

第二世代 (図 1) が産出されていた 76 個のゴールのオオヨスジワタムシに関して、すべての第二世代幼虫を実体顕微鏡下で観察し、大規模な形態異常が生じているか否かを調べた。計 543 個体を顕微鏡下で 1 頭ずつチェックしたが、1 ゴール由来の 2 頭 (0.37%) だけに形態異常が見出された。

2 頭とも片方の触角が完全に欠損する異常であった。しかし、これら個体の母親には形態異常は見出されなかった。また、形態異常を示した第一世代の子世代には、一見しての形態異常は確認できなかった。したがって、第一世代で確認できた形態異常は次世代へは遺伝していない。

3 形態異常の要因

現時点での結果は、川俣町の 1 本のハルニレより採集された 2 種のワタムシゴールに基づく分析に限定されている。調査に用いた種類数、調査地点とも限られているため、福島汚染地域全体でワタムシの形態異常が増加していると結論することはできない。形態異常を引き起こす要因はさまざまなものが想定でき、採集されたワタムシ個体の放射線蓄積分析や化学分析も行われていないため、その要因を確定するのは困難である。しかしながら、この地点で 2 年間にわたる調査から、その要因に関して、ある程度の推測を行うことは可能である。

形態異常はさまざまな野生生物で見出されており、研究者の関心を引く現象であるため、詳しい調査が行われてきたが、決定要因はなかなか明らかになっていない。例えば、北米では、カエルやサンショウウオの形態異常が頻繁に発見され、化学物質説、放射性物質説、寄生虫説、捕食者説が提唱されているが (Stocum 2000, Lannoo 2008)、現在でも決着はついていない。両生類の場合には、幼生時に捕食者に襲われることによって、四肢が再生する際に形態異常が発生することも明らかにされており、形態異常が自然条件下でも生じうる

ことが指摘されている (Ballengée and Sessions 2009, Bowerman *et al.* 2010)。本研究のワタムシ2種に関しては、捕食や寄生の影響はきわめて考えにくい。ワタムシでは孵化幼虫を対象としているために、形態異常は卵内の発生過程で生じている。卵内での発生に病原体・寄生者が関与することで形態異常が生じることは報告例がなく、まして捕食者が関与する余地は想定しがたい。

アブラムシの形態異常に関しては、卵発生中の高温や抵抗性寄主植物での摂食が1齢幼虫の形態異常を引き起こしうることが報告されている (Shingleton *et al.* 2003, 小林・村井 2012)。また、交配時に近親交配が生じていれば、これがきっかけとなって劣性有害遺伝子がホモ接合体化し、形態形成に有害効果を引き起こした可能性も考えられる (Akimoto 2006)。さらに生物一般を考えれば、発生過程を攪乱し形態異常を引き起こす「突然変異源」となりうるものは、化学物質ではメタンスルホン酸エチル (EMS) や N-メチル-N'-ニトロ-N ニトロングアニジン (MNNG) (Singer and Kusmieriek 1982)、加えて、各種の放射性物質 (Møller and Mousseau 2006) が知られている。

調査地域の気象状況を気象台データから調べると、2012年春も2013年春も異常気象の年ではなく、越冬卵が高温状態にさらされた証拠は得られなかった。ハルニレ調査木自体の抵抗性に関しては、ワタムシの成長速度を他地域と比較することで推定されているが、北海道のハルニレと比べて、栄養条件が劣るといふ証拠は得られていない (Akimoto 2014)。さらに、調査地域は、計画的避難区域に指定されており、2011年以降、作物の作付けが行われておらず、このため殺虫剤や除草剤は使用されていない。実際に、調査木周辺は、森林に囲まれた自然度の高い元農耕地であり、雑草に覆われた状態であった。このような状況から、この地域に突然変異源となる化学物質が分布する可能性はきわめて低いと考えられる。

2013年の調査結果から、形態異常の多発は2012年春、あるいはその前年固有の現象であることが推察できる。なぜならば、2013年にワタムシ集団では健全個体の割合が増加し、急速に回復を見せているからである。近親交配や化学物質汚染によって形態異常が引き起こされたのであれば、一年後にその状況が急速に改善することは考え難い。したがって、2011年秋から2012年春にかけて越冬卵の周辺に存在した物質、あるいは2011年に無性生殖世代の遺伝子を損傷させた物質が形態異常を多発させた主要な原因である可能性が高い。

調査地域 (川俣町山木屋地区) における文部科学省の調査では、2011年3月16日採集の雑草は、ヨウ素131が727,000 Bq/kg、セシウム137が158,000 Bq/kg、セシウム134が157,000 Bq/kgの汚染を受けたことが記録されている。この時期、越冬中の卵も同程度の汚染を受けたと考えられる。ワタムシ2種は、こうした汚染状況の下でゴールを形成し、初夏には、イネ科草本の根際に移動し、地表近くの地中にコロニーを作り、さらに秋には、ハルニレの樹皮上に産卵した。福島第一原発周辺地域では、樹皮も地表も放射性降下物質で強く汚染されたことが報告されている (Kuroda *et al.* 2013, Tanaka 2013, Tanaka *et al.* 2013)。形態異常の原因として、もし放射性物質が関与しているとするれば、2つの要因が考えられる。一つは、高放射線下での遺伝子の損傷と有性生殖による変異の増大である。他方は、水の電離によって発生した活性酸素種 (酸化ストレス) から引き起こされる短期の生理学的影響である (Mousseau and Møller 2012)。

4 γ 線照射実験と降下物による汚染の違い

昆虫に対して γ 線を照射し、生存、成長、繁殖がどう影響されるかを調べる研究は1960年代～70年代に盛んに行われた。昆虫は哺乳類に比べて放射線に耐性を示し、多くの実験では数十グレイ (Gy: 吸収線量の単位) から数百グレイの強い放射線量が用いられた (Cole *et al.* 1959, Elbadry 1965, Elvin *et al.* 1966, Burgess and Bennett 1971, Burditt *et al.* 1989)。1970年代の沖縄のウリミバエの不妊虫放飼計画でも、個体あたり70グレイが照射され、成虫の生存・行動レベルでは問題がないものの、不妊となる個体を作り出され、野外に放たれた。こうした事例を見ると、福島の汚染地域の放射線量は照射実験の線量に比べて余りにも低く、昆虫類の成長・繁殖に影響が出るとは考えにくい。

しかしながら、放射性降下物による汚染と γ 線照射実験には大きな違いがあると思われる。汚染地域では、空間放射線量こそそれほど高くはないが (4 μ Sv/h)、放射性物質の粒子が地表面および樹皮表面を覆っている状況である。量の多いセシウム137であれば、1ベクレルの放射性物質粒子は、1秒間に1個の β 線と1個の γ 線を放出している。こうした放射性粒子は、越冬中のワタムシの卵の表面上に、あるいはその近傍に存在していたことであろう。放射性粒子は、卵期間である約

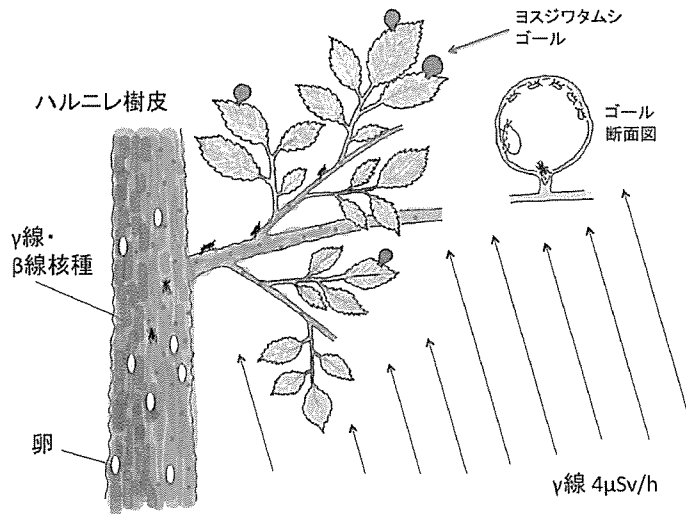


図9 ハルニレ上での放射性降下物による被曝を示す模式図

4ヶ月の間、近傍から放射線を出し続け、かなりの割合が卵内の細胞を貫いたと考えられる（大まかに考えれば、卵表面上の粒子からの放射線の約半数は卵を通過する）。小さな放射性粒子であれば、昆虫卵の全身に影響を与えることはないかもしれない。しかし、長径1mm以下の卵であれば、放射性粒子の近傍の細胞は影響を強く受け、遺伝子レベルあるいは生理的レベルで強いストレスを受けたと考えられる。

今回の調査では、高度の形態異常（レベル3）を示すものが複数個体見出された。こうした個体は、放射線を強く受けたと思われるかもしれないが、実はそうではない。全身に強い放射線を浴びれば、発育が停止し、死亡するのみである。放射性粒子から「局所的」に強い放射線を浴びたことによって発育中の一部の細胞が破壊されたために、それを補う補償的な細胞増殖が生じたように思われる。全身的には強い線量を浴びていないために、形態異常の1齢幼虫として孵化してくる。γ線照射実験とは異なり、今回の結果を説明する概念は、越冬卵近傍の放射性粒子から放出される放射線の局所的影響であると筆者は考えている。こうした点で、微小昆虫への放射性降下物の影響は、大型哺乳類に対する影響とは大きく異なると思われる。ゴール形成をめぐる放射線汚染の状況を図9に示した。興味深い点は、ゴール内で産まれる第二世代では、同じ空間線量を浴びているはずであるのに、形態異常がほとんど見られない点である。ゴールは新葉を肥大成長させて作った組織であり、内部には放射性物質がほとんど含まれていない。この点が、一次世代と二次世代の幼虫の受けた違いを説明するように思われる。

5 今後の予測

チェルノブイリの生物調査の報告を読むと、現在のチェルノブイリには奇形を起こした生物はまったく見られないことが繰り返し語られている（マイシオ 2007）。そうした形態異常は、仮にいたとしても原発事故の初期に現れ、すでに淘汰されてしまったとされる。2013年データでの健全個体の増加は、少なくともアブラムシ類では、初期の放射性降下物からの打撃を集団が乗り越えつつあることを示しているように思われる。ワタムシ類では、年間に約10世代が経過するために、この間に放射線に弱いクローンは淘汰され、放射線に耐性を示すクローンだけが残されてきた可能性もある。実際に、2012年にゴール世代は14.4%~16.9%がゴールの誘導に失敗し死亡している。同時に、樹皮表面や土壌表面から、放射性物質が時とともに移動しているため、ワタムシへの放射性物質の直接の影響は減りつつあるのかもしれない。したがって、影響の低下と放射線耐性が相まって、形態異常率や死亡率の低下がもたらされた可能性がある。今後、さらに何年かモニタリングを続けていく必要があるが、2012年に見られたような形態異常は、今後見られなくなっていくのかもしれない。

6 博物館標本の活用

原発事故のような大規模な環境変化が生じた場合に、その変化を検証できるのは博物館に蓄積されている過去の標本類である。今回のワタムシ調査において、最も重要だったのは、福島県から事故直後に採集されたワタムシとその他地域の過去

のワタムシ標本を効率よく比較できたことである。福島から1シーズンに得られたワタムシ2種の標本は合わせて300個体から400個体であったが、比較対象とした他地域の標本は2種を合わせて3200個体に上った。こうした標本類は事故が起こってから集めようと考えても、とても効率よく集められるものではない。今後どのような環境変動に見舞われるかを我々はまったく知ることが出来ないが、博物館に集められた標本は、過去の生態系の一断面を示す貴重な資料としてすぐにも役立つことが出来る。博物館標本は、環境変異が起こる前の生物の状況を伝えてくれ、時間の経過とともに価値を増す。現時点では、すぐに成果を生まない科学技術への風当たりは強いが、博物館の収蔵物は、長期的な観点から評価を受けなければならない。このような主張はしばしば耳にするが、実際に所蔵標本が役立てられたことは、日本ではあまりなかったのではないかと思われる。今回の原発事故では、意図せず博物館標本が役立ち、それなくしては研究事態が進められなかった。

今回の原発事故に際して、博物館標本の価値を再認識したのは筆者自身である。今回比較対象として用いた標本類は、筆者が修士課程の学生であった頃から、特に何の目的があったわけでもなく、いずれは比較研究のためにと、分類研究のかたわら蓄積し続けてきたものである。トラップ等によって無作為に採集された多量の標本は、博物館に多量に眠っていることであろう。自然史研究者の使命の一つとして、これらの収蔵標本を現代に生かす試みを進めていく必要があるだろうと改めて考えさせられた。

謝辞

産業技術総合研究所北海道センターの菊池義智博士のご協力無しには、福島県での野外調査を進めることはできませんでした。ここに厚く御礼申し上げます。

引用文献

- Akimoto, S. (1985) Occurrence of abnormal phenotypes in a host-alternating aphid and their implications for genome organization and evolution. *Evol. Theor.*, 7, 179-193.
- Akimoto, S. (1988) The evolution of gall parasitism accompanied by a host shift in the gall aphid, *Eriosoma yangi* (Homoptera, Aphidoidea). *Biol. J. Linn. Soc. London*, 35, 297-312.
- Akimoto, S. (1990) Local adaptation and host race formation of a gall-forming aphid in relation to environmental heterogeneity. *Oecologia*, 83, 162-

170.

- Akimoto, S. (1998) Heterogeneous selective pressures on egg-hatching time and the maintenance of its genetic variance in a *Tetraneura* gall-forming aphid. *Ecol. Entomol.*, 23, 229-237.
- Akimoto, S. (2006) Inbreeding depression, increased phenotypic variance, and a trade-off between gonads and appendages in selfed progeny of the aphid *Prociphilus oriens*. *Evolution*, 60, 77-86.
- Akimoto, S. (2014) Morphological abnormalities in gall-forming aphids in a radiation-contaminated area near Fukushima Daiichi: selective impact of fallout? *Ecology and Evolution*, 4, 355-369.
- Akimoto, S. and Yamaguchi, Y. (1997) Gall usurpation by the gall-forming aphid, *Tetraneura sorini* (Insecta Homoptera). *Ethol. Ecol. Evol.*, 9, 159-168.
- Ballengée, B. and Sessions, S. K. (2009) Explanation for missing limbs in deformed amphibians. *J. Exp. Zool.*, 312B, 770-779.
- Bowerman, J., Johnson, P. T. J. and Bowerman, T. (2010) Sublethal predators and their injured prey: linking aquatic predators and severe limb abnormalities in amphibians. *Ecology*, 91, 242-251.
- Burditt, Jr. A. K., Hungate, F. P. and Toba, H. H. (1989) Gamma irradiation: Effect of dose and dose rate on development of mature codling moth larvae and adult eclosion. *Int. J. Rad. Appl. Instrum. C*, 34, 979-984.
- Burgess, E. E. and Bennett, S. E. (1971) Mortality and abnormalities caused by gamma irradiation of alfalfa weevil larvae. *Ann. Entomol. Soc. Amer.*, 64, 88-90.
- Cerutti, P. A. (1974) Effects of ionizing radiation on mammalian cells. *Naturwissenschaften*, 61, 51-59.
- Cole, M. M., Labrecque, G. C. and Burden, G. S. (1959) Effects of gamma radiation on some insects affecting man. *J. Econ. Entomol.*, 52, 448-450.
- Elbadry, E. (1965) Some effects of gamma radiation on the potato tuberworm, *Gnorimoschema operculella* (Lepidoptera: Gelechiidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 58, 206-209.
- Elvin, T., Wendell, B. E. and Robert, C. R. (1966) Effects of gamma radiation on *Rhyzopertha dominica*, *Sitophilus oryzae*, *Tribolium confusum*, and *Lasioderma serricorne*. *J. Econ. Entomol.*, 59, 1363-1368.
- Hesse-Honegger, C. and Wallimann, P. (2008) Malformation of true bug (Heteroptera): A phenotype field study on the possible influence of artificial low-level radioactivity. *Chem. Biodivers.*, 5, 499-539.
- Hiyama, A., Nohara, C., Kinjo, S., Taira, W., Gima,

- S., Tanahara, A. and Otaki, J. M. (2012) The biological impacts of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly. *Sci. Rep.*, 2, 570.
- 小林政文・村井 保 (2012) 産地の異なるジャガイモヒゲナガアブラムシ *Aulacorthum solani* (Kaltenbach) (カメムシ目: アブラムシ科) 個体群のダイズ9品種での発育と増殖. *日本応用動物昆虫学会誌*, 56, 49-55.
- Komatsu, T. and Akimoto, S. (1995) Genetic differentiation as a result of adaptation to the phenologies of individual host trees in the galling aphid *Kaltenbachiella japonica*. *Ecol. Entomol.*, 20, 33-42.
- Komazaki, S. (1998) Difference of egg diapause in two host races of the spirea aphid, *Aphis spiraeicola*. *Entomol. Exp. Appl.*, 89, 201-205.
- Kuroda, K., Kagawa, A. and Tonosaki, M. (2013) Radiocesium concentrations in the bark, sapwood and heartwood of three tree species collected at Fukushima forests half a year after the Fukushima Dai-ichi nuclear accident. *J. Environ. Radioact.*, 122, 37-42.
- Lannoo, M. (2008) *Malformed Frogs: The Collapse of Aquatic Ecosystems*. University of California Press, Berkeley. 288 pp.
- Lynch, M. and Gabriel, M. (1983) Phenotypic evolution and parthenogenesis. *Am. Nat.*, 122, 745-764.
- マイシオ, M. (2007) チェルノブイリの森—事故後20年の自然誌. *日本放送出版協会*, 381 pp.
- Møller, A. P. and Mousseau, T. A. (2006) Biological consequences of Chernobyl: 20 years after the disaster. *Trends Ecol. Evol.*, 21, 200-207.
- Møller, A. P. and Mousseau, T. A. (2009) Reduced abundance of insects and spiders linked to radiation at Chernobyl 20 years after the accident. *Biol. Lett.*, 5, 356-359.
- Møller A. P., Mousseau, T. A., Milinevsky, G., Peklo, A., Pysanets, E. and Szep, T. (2005) Condition, reproduction and survival of barn swallows from Chernobyl. *J. Anim. Ecol.*, 74, 1102-1111.
- Mousseau, T. A. and Møller, A. P. (2012). Entomological studies in Chernobyl and Fukushima. *Am. Entomol.*, 58, 148-150.
- 大瀧丈二 (2013) 原発事故の生物への影響をチョウで調査する. *科学*, 83, 1037-1044.
- Russell, L. B. and Russell, W. L. (1952) Radiation hazards to the embryo and fetus. *Radiology*, 58, 369-377.
- Shingleton A. W., Sisk, G. C. and Stern, D. L. (2003) Diapause in the pea aphid (*Acyrthosiphon pisum*) is a slowing but not a cessation of development. *BMC Dev. Biol.*, 3, 7.
- Singer, B. and Kusmierck, J. T. (1982) Chemical mutagenesis. *Annu. Rev. Biochem.*, 52, 655-693.
- Stocum, D. (2000) Frog limb deformities: An “eco-devo” riddle wrapped in multiple hypotheses surrounded by insufficient data. *Teratology*, 62, 147-150.
- Tanaka, D. (2013) Distribution of radiocesium from the radioactive fallout in fruit trees. *In* Nakaniishi, T. M. and Tanoi, K. (eds.) *Agricultural implications of the Fukushima nuclear accident*. 143-162, Springer.
- Tanaka, K., Sakaguchi, A., Kanai, Y., Tsuruta, H., Shinohara, A. and Takahashi, Y. (2013) Heterogeneous distribution of radiocesium in aerosols, soil and particulate matters emitted by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident: Retention of micro-scale heterogeneity during the migration of radiocesium from the air into ground and river systems. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 295, 1927-1937.
- Vereecke, A. and Pelereyts, C. (1969) Sensitivity to gamma radiation of *Tribolium confusum* eggs at various developmental stages. *Entomol. Exp. Appl.*, 12, 62-66.
- Yablokov, A. V., Nesterenko, V. B. and Nesterenko, A. V. (2009) Chernobyl: Consequences of the catastrophe for people and the environment. *Ann. NY. Acad. Sci.*, 1181 pp.

秋元 信一 (あきもと しんいち)

東京都生まれ。1984年北海道大学大学院農学研究科単位取得退学。博士(農学)。2007年より北海道大学農学研究院教授。昆虫体系学研究室に在籍し、昆虫の分類学、系統学、生態学、行動学が専門。