

原発事故の生物への影響をチョウで調査する

大瀧丈二

おおたき じょうじ
琉球大学理学部

研究内容に入る前に

福島第一原子力発電所の事故は、それが想定外だったか想定内だったかどうかにかかわらず、人類史に残るほどの大きな事故であることは間違いないと思われる。ソビエト連邦のような社会主義国家の管理下にあった原発の事故ではなく、最先端の科学技術をもつはずの日本、また、原子爆弾による唯一の被爆国でもある日本での大惨事であるから、その意味は深長である（考えてみれば、最先端の科学技術をたとえ日本がもっていたとしても、それが安全性に直接結びつくわけではないことは当然のことである。安全性は社会システムの問題である）。

海外の研究者たちは事故当初から福島原発事故の野生生物への影響について積極的に調査を開始している。事故からほぼ1年後には、海洋生物への影響を懸念する論文がPNASに掲載されている¹。また、鳥類への影響調査が、それが適切な方法かどうかは別問題としても、積極的に迅速に行われ、結果が発表されている²。このような迅速な対応は、対象が変化し続けている場合には高く評価されるべきであるというのが、正当な生態学的な立場であろう。また、事故5カ月後の2011年8月には、アメリカのThe Society for Molecular Biology and Evolutionが、放射線の生物への影響について迅速な調査を求める声明を日本政府に提出した³。

では、実際の日本の状況はどうであろうか。残念ながら、私の知る限り、生物学的影響について事故当初からのデータを迅速に集め、すでに発表している研究グループは限られている。ただし、東京大学を中心としたいくつかのグループの研究

がすでに書籍として刊行されている⁴、まだ発表されていない研究もあるだろうから、これからは多少研究論文が増えるのではないかと思う。利権がらみの話ではなく、論理的でオープンなディスカッション（つまり、科学的なディスカッション）が望まれるところである。

われわれは迅速な調査の重要性を認識していたものの、それほど意識していたわけではない。ただがむしゃらにやってきただけであり、気づいたら、周囲に同じような研究をしている人々がほとんどいないばかりか、厳しい批判の対象になっていた。迅速な対応は、「早すぎる」と軽蔑的に批判された。つまり、「もっとじっくり検討しろ」、さらに言えば、「まったく信用できない」となる。日本の科学者は自主規制さえしている風潮である。そのような閉鎖的な環境のなかで真の科学はあり得ない。科学者こそ社会的責任を認知すべきであるという議論が盛んに行われた時代があった。現代ではそのような議論が通じにくくなってしまったことは、悲しむべき文化的退行である。

いろいろと批判を受けることになったとはいえ、ありがたいことに、福島県とその周辺地域に住む人々からは感謝されることはあっても、文句を言われたことはない（では、いったい誰が文句を言っているのだろうか）。いっぽう、当初から外国の研究者やメディアが評価してくれたこともあり、日本でも徐々に科学的な（つまり、論理的でオープンな）議論がなされるようになってきた。大変ありがたいことである。『昆虫と自然』ではすばやく特集が組まれた⁵、日本生態学会、飯舘村放射能エコロジー研究会、アメリカのThe Society for Molecular Biology and Evolutionなどで講演を行うことができ

た。これらの講演の反響は大きく、アメリカの学会での講演については『Nature』のニュースに取り上げられた⁶。それに伴って、日本のメディアでも徐々に真面目に取り上げられるようになってきた。

● 生物への影響はない？

現在でも、もしかしたら福島第一原発事故による生物への影響は皆無であるというのが、オフィシャルな日本政府の見解かもしれない。しかしながら、冷静に考えてみてほしい。あれだけの量(日本政府の低い見積もりでも、放射性セシウムは広島原子爆弾の168.5個分といわれている)の放射性物質が環境に拡散し、それが何も影響を起こさなかったとは到底考えられないことである。もしそうなら、これまでの放射性物質の厳しい規制は何だったのかと問わざるを得ない。

たとえば、分子生物学・生化学の分野では、放射性物質を用いて蛋白質をラベルし、NMR(核磁気共鳴)のスペクトルを得るような実験は現在でも頻繁に行われているし、過去には、DNA配列決定、サザンブロッティング、コロニーハイブリダイゼーション(いずれもDNAのラベルとして使用)など、多くの実験過程で放射性同位体が用いられていた。使用される量は極めて微量であることがほとんどだが、放射性物質は特別の管理棟や管理区域の中だけで使用可能であり、外部への放出は厳格に制限されている。もちろん、人への健康被害や野生生物への影響を危惧するためである。微量でも放射性物質を用いる実験をするためには、長々と教育訓練を受けたうえ、採血検査を含む健康診断を受けなければならない。実は、アメリカでの使用はそれほど厳密ではなく、少なくとも私がアメリカの学生だったころには、短い講習を受けるだけで普通の実験室の片隅で使用されていたことを覚えている。

そのアメリカが、福島原発事故が勃発した当初は、半径80 km圏内に住むアメリカ人に避難勧告を出した。この80 kmの根拠を私は知らないが、驚くべきことに、われわれのデータとそれほ

どかけ離れていない(これは単なる偶然だとは思う)。

生物への影響はないのではなく、生物への影響を検出するほど真面目に調べていないだけのことである。研究していないものに対して、安全だとか危険だとか、断言することはできない。「わからない」のであるから、それがはっきりわかるまでは慎重に行動するというのが欧米の基本的なポリシーであると聞いた。日本では、「わからない」が「安全」にすり替わっている。

● ヤマトシジミとは

さて、本題である。ヤマトシジミという小さなチョウにわれわれは着目し、地道に研究が続いている(図1)。ヤマトシジミは小型のチョウであり、人と住環境を同じにする、日本で最も繁栄しているチョウである。北海道以外であれば、人々が暮らしている場所には、都心であれ、農村地域であれ、ヤマトシジミが飛んでいる。つまり、環境に応じて素早く進化し、適応するということである。

私はアメリカで大学・大学院時代を、イギリスでポストドク時代を過ごしたため、欧米の生物学の世界がいかに競争の激しい世界であるかを認識していた。そして、アイデアではなく、いよいよ人力と経済力が研究の勝負を分ける時代になってきていた。そのような「最先端」の競争には私のような個人が日本でいくら同じ方向性の努力をしても勝ち目はない。日本での研究には日本独自の研究対象があってもいい。私にとっての日本独自のモデル生物、それがヤマトシジミであった。

そもそも、今回の原発事故のためにヤマトシジミを研究していたのではない。色模様形成の発生理学的メカニズムと進化のメカニズムを探究するために立ち上げたものである^{5,7-9}。一方、ヤマトシジミが環境指標生物として使用可能であろうという考えも以前からあり、環境モニタリングへの応用も考えていたことは確かである。

しかしながら、原発事故の影響のモニタリングに使用することになるとは、まったく想定外であった。われわれは放射線生物学についてはまったく素人であったため、研究を始める前に、ある先



図1—自然状態のヤマトシジミ
撮影：岩田大生。

生から「昆虫は放射線に強いから、チョウで実験するのはナンセンス」とのコメントをいただいた。私は「昆虫が放射線に強い」という常識をそれまで知らなかったので、この件についてじっくり考えてみた。

そもそも昆虫は放射線だけでなく、いろいろなストレスに対して強いと思われる。だからこそ、地球上で最も繁栄している生物群であるのだ。ある個体だけなら殺虫剤で殺すことはできるが、その種を根絶するのはきわめて難しい。耐性をもつ個体が出現するからである。物理的な事故によって身体の一部が失われても彼らはびくともしない。われわれは以前、「頭部を付け替える」という実験を行ったことがあるが(昆虫生理学では定番の実験である)、彼らはそれでも生きている。そして、昆虫は一般に環境への適応能力が高い。しかしながら、昆虫も不死ではない。適応能力が高いということは、集団レベルでみれば、死んでいく個体も多いということだ。また、昆虫は多様であるので、放射線に強い種も弱い種もいると考えるのが自然であろう。いずれにしても、これまでのヤマトシジミに関するもろもろの知識を考えあわせてみて、われわれの実験系では放射線の影響を十分検出できるだろうと予測し、実験に踏み切ることにした。

研究の重要ポイント

最初に本研究の「売り」となる重要なポイントについてまとめておきたい¹⁰。以下の5点について、本研究はユニークである。

- (1)事故当初から野外個体をモニタリングしていること。
- (2)飼育・交配実験により、子世代・孫世代の影響をみていること。
- (3)外部被曝実験を行っていること。
- (4)内部被曝実験を行っていること。
- (5)原発事故の影響を受けていない場所(沖縄)で飼育していること。また、原発事故の影響を受けていない沖縄の個体を必要に応じて実験に用いていること。

原発事故の影響であるかどうかの判断において、特に重要になるのは内部被曝実験である。これは、沖縄の個体(幼虫)に汚染地域から採集してきたカタバミ(ヤマトシジミの食草)を与えた実験である。シンプルではあるが、汚染地域のヤマトシジミの反応が沖縄で再現できたと思われる。

これについて、「信じられない」といった顔をした聴衆から、以下のような質問を受けたことがある。「カタバミが枯れていたとかのせいではないですか。そもそもどのようにして沖縄の幼虫に新鮮なカタバミをあげられるのですか」と。私はこのように答えた。「もちろん、新鮮なカタバミをあげました。現地に足しげく通ったのです。」

なお、本研究の原著論文¹⁰はオープンアクセスとなっており(<http://www.nature.com/srep/2012/120809/srep00570/full/srep00570.html>)、その日本語訳もわれわれの研究室のウェブサイトに掲載されている(<http://w3.u-ryukyu.ac.jp/bcphunit/ronnbunn.html>)。

実験内容 1: 野外採集と飼育実験

原発事故後2カ月の2011年5月、現地においてサンプリングを行った。その後、採集してきた個体の翅の大きさ(これはチョウの個体の大きさに相当する)と形態異常を調べた。当初はまったく予想していなかったが、福島市と本宮市の雄の翅の大きさが縮小していることが判明した(図2)。矮小化が起きているのである。これには、「東北地方

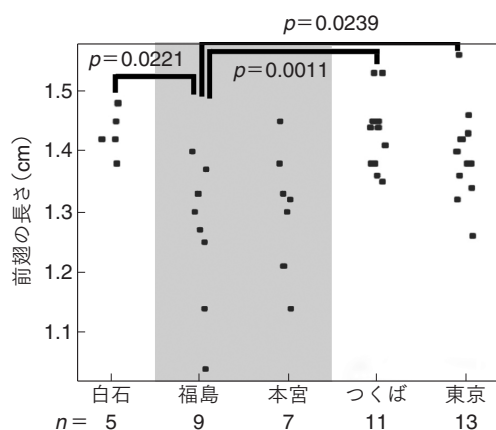


図2—ヤマトシジミ雄の前翅の長さ

2011年5月に採集された個体(P世代)のデータ。宮城県白石市、福島県福島市、福島県本宮市、茨城県つくば市、東京都での採集。

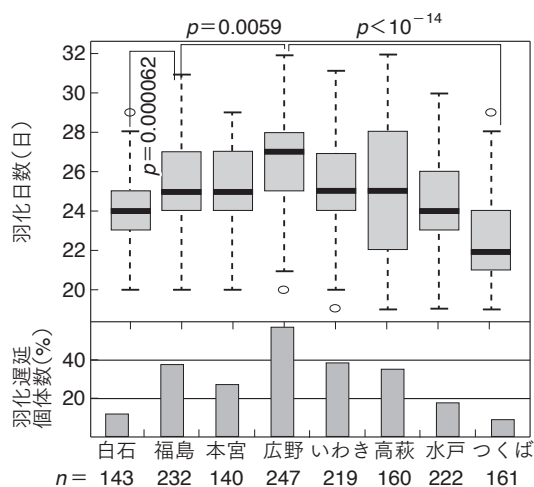


図3—羽化日数(上)と羽化遅延個体数の割合(下)

2011年5月採集の個体(P世代)から採卵された子(F1世代)についてのデータ。広野：福島県広野町、いわき：福島県いわき市、高萩：茨城県高萩市、水戸：茨城県水戸市。

が寒いためではないか」とか、「分布の北限に当たるためではないか」などの批判があるが、いずれも正当な理由にはなりえない。福島市と本宮市の個体群は、それよりも北方の白石市の個体群よりも小型であるのだ。もちろん、それよりも南方の個体群よりも小型でもある。福島市はヤマトシ

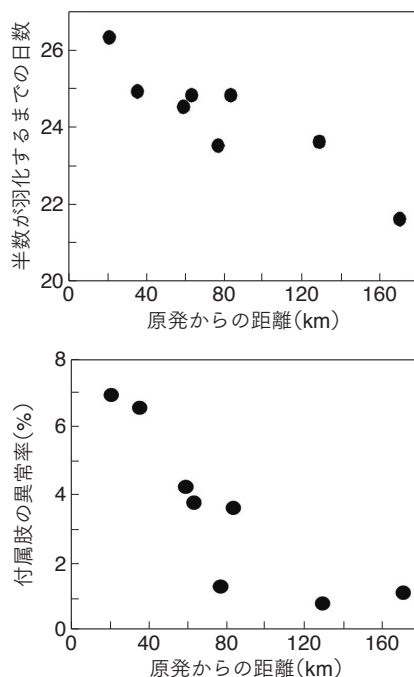


図4—半数羽化日数(上)と原発からの距離、および、付属肢の異常率と原発からの距離(下)

2011年5月採集の個体(P世代)から採卵されたF1世代についてのデータ。

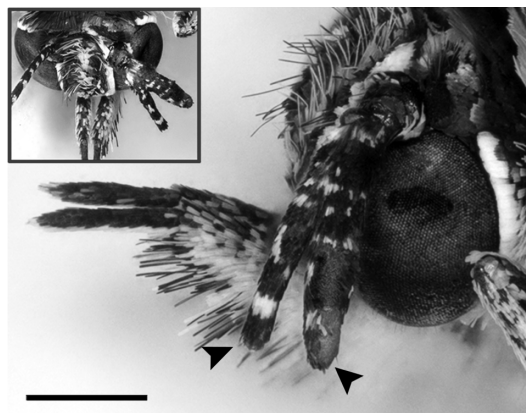


図5—F2世代の個体にみられた触角異常

2011年5月採集の個体(P世代)から採卵された孫(F2世代)についてのデータ。

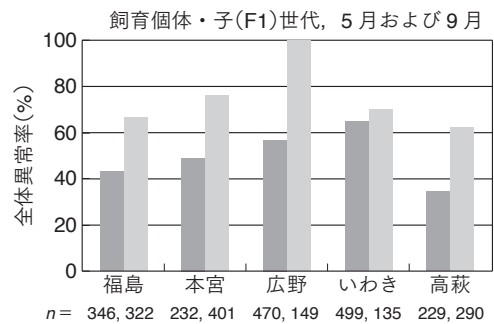
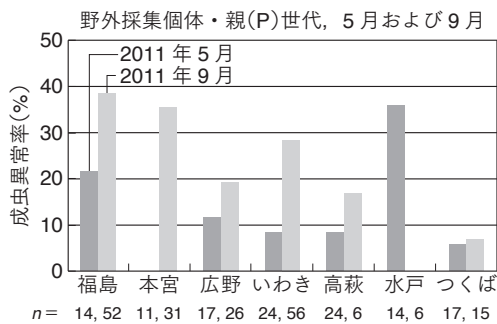


図6—各地域における成虫異常率(左)および全体異常率(右)

水戸を除いてすべての地域で9月のほうが5月よりも高くなっている。

ジミの分布北限よりも370 kmも南に位置している。さらに、地面の線量が高いほど、翅は小さくなる傾向がみられた。一方、形態異常も多少はみられたが、一般的にみられる程度であった。

そうはいっても、野外から直接採集してきた個体だけでは、影響の大きさはあまりわからない。そこで、われわれは、沖縄という放射能汚染のない場所で子世代を得ることによって、親世代での被曝が子世代にどの程度影響するのか検討することを試みた。最初に、卵から羽化までに要する日数と蛹化までに要する日数を調べると、原発からの距離が近くなるにつれて多くの日数が必要であることがわかった。つまり、成長遅延がみられるのである(図3、図4)。また、原発からの距離が近くなるにつれて、付属肢の異常率も上がることがわかった(図4)。原発から80 km以上の距離になると異常率はかなり低下している。子世代では親世代よりもほぼどの場所でも高い異常率となり、多様で比較的重度の異常がみつかった。

これらの異常が遺伝性のものであることを検討するため、子世代(F1)の異常個体を親として選び、孫世代(F2)を得た。すると、もともと異常のある個体を親に選んであるので当然ではあるが、類似の異常が次世代に遺伝した。そればかりではなく、触角が根元から二股に分かれるなど、これまでに見たこともないような異常形態をもつ個体も観察された(図5)。しかしながら、これだけでは、遺伝子レベルで起きた異常が遺伝しているのか、そのようにみえるだけなのか、はっきりしない。遺伝子・ゲノムレベルでの解析が必要である。

われわれは2011年9月にも同様のサンプリングと子世代を得る実験を行った。異常率は、親世代においても子世代においても、また、水戸を除くすべての地点において、9月のサンプルのほうが5月のサンプルよりも高くなっている(図6)。また、野外採集個体の異常率は、地面の線量に比例して高くなっている。

実験内容 2: 被曝実験

上記の実験結果は、福島地方において原発の影響がヤマトシジミの矮小化、成長遅延、形態異常として表れていると解釈することができる。けれども、現地調査だけでは原発が原因なのかどうかは断定できない。現地調査は最優先課題であることは間違いないが、これだけでは他の要因を排除するほどには説得力はない。

現地調査で得られた結果が放射能汚染による被曝のためであるならば、汚染されていない沖縄の個体を実験的に被曝させたら、同様の現象が再現できるはずである。最初は外部被曝実験を行った。セシウム線源の周囲で沖縄産の幼虫を飼育するという原理的には簡単な実験である。まったく同じ親から生まれた子個体を2群に分け、片方は非照射のまま飼育し(対照群)、片方は照射を行った。すると、対照群に比べて、照射群では生存率が低下した(図7)。55 mSvの照射群よりも125 mSv照射群のほうが生存率の低下が著しかった。照射量に応じた生存率の低下(死亡率の上昇)は、死亡原因が照射にあることを示唆している。

次に内部被曝実験を行った。これも原理として

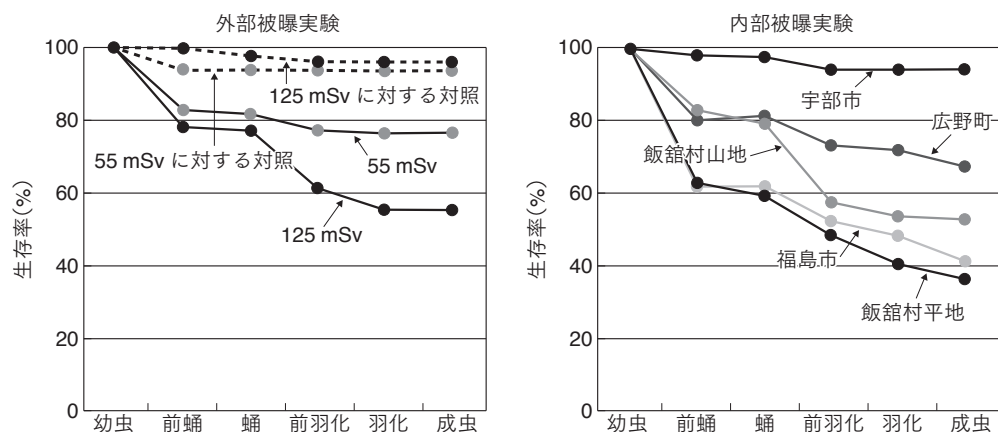


図7—外部被曝実験(左)と内部被曝実験(右)における生存曲線
これらの実験では沖縄個体を使用している。

は簡単な実験である。沖縄産の幼虫に、福島地方から採取してきたカタバミを食べさせるのである。別の場所(山口県宇部市)から採取されたカタバミを与えても、沖縄のヤマトシジミはほとんど死ぬことはない。しかしながら、福島市や飯館村から採集したカタバミの場合、カタバミの線量に応じた生存率の低下(死亡率の上昇)が著しいことには驚いた(図7)。ただし、最も線量の高いカタバミで最も低下したわけではなく、この現象に関しては議論の余地はあるだろう。

外部被曝実験・内部被曝実験の両方について、生存率の低下だけでなく、矮小化と形態異常がみられたことは注目し値する。つまり、野外採集での結果が実験室で再現されたことになる。また、外部被曝・内部被曝の両方で相互に類似の結果が得られたことも重要である。これらの実験システムの構成とその結果から考えて、放射性物質以外が原因で生存率の低下、矮小化、形態異常が起こったとは非常に考えにくい。さらに、野外調査の結果を考え合わせると、原発事故で放出された放射性物質がヤマトシジミに悪影響を与えたと考えるのが最も妥当であると結論する。

● その後の研究発表

上記の内容についてはさまざまな批判が寄せられたため、それらの批判に対する返答を論文として発表する予定である¹⁾。この論文はちょっとし

たレビューともなっているが、新しいデータも多少追加している。緯度と異常率の関係、緯度と翅の大きさの関係、内部被曝実験の異常率、幼虫の死に方などに関しては新しいデータが掲載してある。また、成虫の異常率については、総合的な比較を行った。

特に目立った批判は、「昆虫は放射線に強いはずなので、そのようなことは起こるはずはない」というものである。確かに、昆虫は高線量照射に強いと言われてきた。そのような実験データはほとんど不妊虫を作るのための実験から得られていることは認識しなければならない。不妊虫を作るためには、蛹の時期に短時間で高線量を照射し、生殖細胞を傷つける。しかし、われわれの実験条件はこれとはまったく異なっている。長期間で低線量の被曝である。実験条件が著しく異なる場合、結果を直接比較することはできない。「はずである」という推測は実験結果よりも優先されるべきものではない。もちろん、低線量長期被曝の実験結果は今後も検証される必要がある。

低線量長期被曝においては、細胞が壊死してしまうような死に方をするのではない。昆虫は脱皮を繰り返して大きくなるが、脱皮は正常状態でもリスクの高い生理現象である。内部被曝実験での死亡個体をみると、脱皮の途中で死んだ個体が多いことがわかる(図8)。われわれはさらに徹底した内部被曝実験を行っており、その結果について

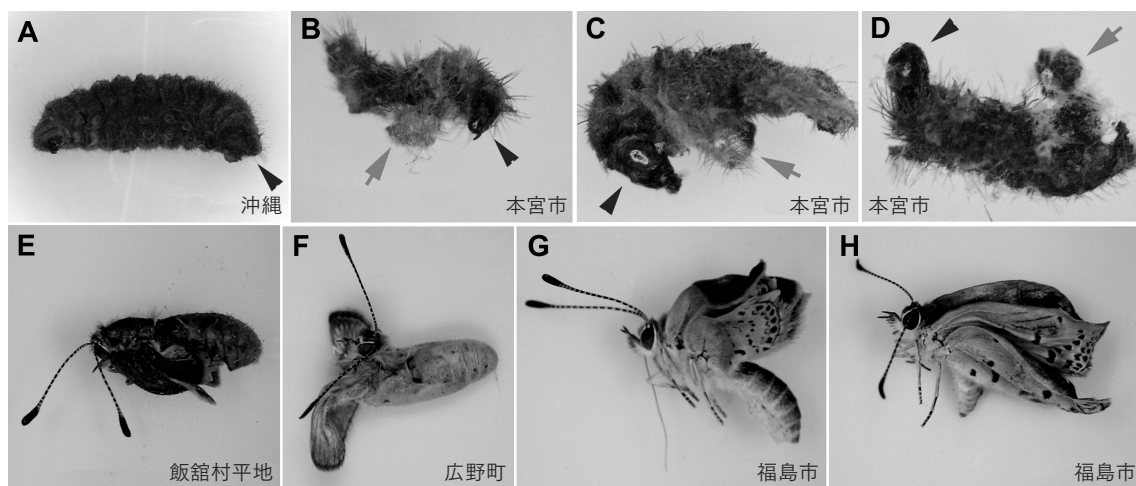


図8—内部被曝実験によって得られた死亡個体

記されている地域はカタバミ採集地。矢印は幼虫頭部の脱皮殻、矢尻は幼虫の頭部を示す。

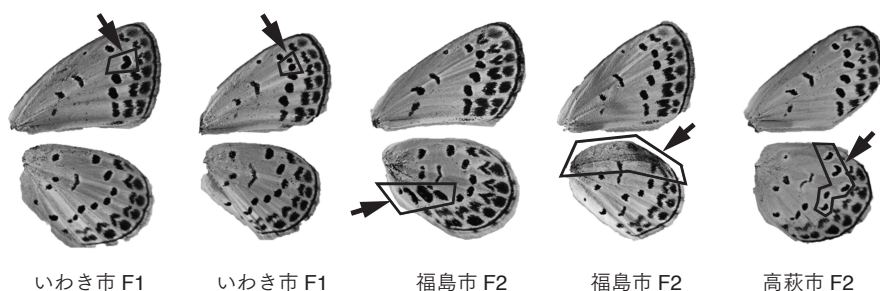


図9—F1 および F2 において得られた翅の色模様の異常
線で囲まれた部分(矢印)が異常部分。

は別途発表予定である。また、われわれが得た結果はヤマトシジミに特有なものではないと考えている。これについては今後の実験で答えを出さねばならない。

もう一つ、ヤマトシジミに関する別の実験結果も発表予定である。この実験は色模様の突然変異体を得ることで色模様形成のメカニズムを探る目的で行ってきたものである¹²。これはヤマトシジミに特殊な化学物質を与えて突然変異を誘発する実験である。この化学物質はEMSと呼ばれ、DNAにランダムに点突然変異を起こすことが知られており、ショウジョウバエの突然変異実験に広く用いられてきた。それらの色模様変化個体を比較すると、斑紋の消失、融合、異常な場所での出現などを含め、被曝実験で得られた規則性のない色模様変化個体(図9)と全体として一致するも

のであった。このことは、福島周辺でも突然変異によって異常が出ていたことを示唆するものである。今後は、ゲノム解析により、突然変異の分子レベルでの証拠を得ることが重要であろう。

● 耐性進化による 放射線環境への適応

ここで重要な未発表データについて触れておきたい。現地におけるサンプリング個体の異常率、その子世代の異常率を眺めてみると、2011年9月をピークにして減少し、現在では2011年5月以下のレベルとなっている。ヤマトシジミは世代時間が1カ月と早いため、年間6世代ほど、2013年7月現在では15世代ほどが経過している。この程度の世代を経れば、自然選択(ややこしいが、もともとの環境汚染が人為的な行為であることを考える

と「人為選択」の一種)が働き、十分に放射線環境にも適応できるようになることを示している。

このことは野外調査の結果を評価するうえで重要である。「何も影響が検出できなかった」あるいはそれを拡大解釈して「安全である」という生物学的調査結果が発表された場合、調査開始時がいつなのか、また、その対象となっている生物の世代時間はどのくらいなのかに注目してみるとよい。世代交代の早い生物種に関する調査を2012年から始めた場合、原発由来の影響は何も検出されないであろう。その生物はすでにその環境に適応しているのであるから。

今回の原発事故のように、放射性物質が環境中にふりまかれると、おそらく以下のようなことが起こるのであろう。放射性物質が突然変異を誘導し、生物にとって大きな脅威となる。多くの個体は突然変異の悪影響で死亡する。しかしながら、多くの突然変異が短時間で誘発されるため、放射線耐性を強化する突然変異も出現する。たとえば、DNA修復酵素の活性が高いものやHSP蛋白質(熱ショック蛋白質)の発現量が多いものなどが出現し、徐々に集団内に広まっていくのである。また、新しい突然変異体でなくても、もともと高い放射線耐性を示すゲノムをもって生まれた個体は生き残り、次世代に遺伝子を残していくことになる。

しかし、人類はこのような道を歩んではいけない。自然選択とは、死ぬものは死んで、生き残るものだけが生き残る過程のことである。人間社会は、人為的な環境(放射能汚染環境)における「選択」に人類の未来をゆだねるわけにはいかない。それ

に抗する社会をつくっていくべきである。ヤマトシジミの研究が人間にどの程度当てはまるかはまったくわからないが、多少でも当てはまった場合、現状のままでは、将来的にはヤマトシジミのように自然選択(つまり「人為選択」)が起こってしまう可能性があることは現時点で認識しておくべきである。

その意味でも、人の被曝量の「安全基準」を一律に政治家や科学者もどきの人々が決めてしまい、結果としてそれを人々に強要してしまうようなことは、現代の福祉社会で行われるべきことではない。安全基準は各個人の放射線耐性度や健康度によって異なってくるものであり、また、個人の意思によって被曝の許容量は決定されるべきであろう。放射線耐性や放射線許容量についても、各個人の多様な耐性度や価値観を尊重する社会体制を目指すべきである。

文献

- 1—K. O. Buesseler et al.: Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **109**, 5984 (2012)
- 2—A. P. Møller et al.: Environ. Pollut., **164**, 36(2012)
- 3—K. Wolfe et al.: Mol. Biol. Evol., **29**, 441(2012)
- 4—T. M. Nakanishi & K. Tanoi eds.: Agricultural implications of the Fukushima Nuclear Accident, Springer Japan(2013)
- 5—大瀧丈二: 昆虫と自然, **48**(3), 14(2013)
- 6—E. Callaway: Nature, **499**, 265(2013)
- 7—A. Hiyama et al.: Entomol. Sci., **13**, 293(2010)
- 8—J. M. Otaki et al.: BMC Evol. Biol., **10**, 252(2010)
- 9—A. Hiyama et al.: Front. Genet., **2**, 15(2012)
- 10—A. Hiyama et al.: Sci. Rep., **2**, 570(2012)
- 11—A. Hiyama et al.: BMC Evol. Biol., in press(2013)
- 12—M. Iwata et al.: Sci. Rep., **3**, 2379(2013)