

## ヤマトシジミにおける福島第一原子力発電所事故の生物学的影響の論文解説

2015/06/08

福島第一原子力発電所事故のヤマトシジミへの影響の論文に関しまして、インターネットまた直接の問い合わせによりさまざまなご意見、ご感想をいただきました。非常に多くの方々に興味を持っていただきありがとうございます。寄せられましたいくつかの疑問点、また論文中では記すことができなかった実験の詳細等も付け加えまして、以下に簡易ながら論文のまとめを作成いたしました。ヤマトシジミにおける放射線影響の研究はまだ始まったばかりです。この研究に関しましては今後長期間に渡り継続して調査していかなければならないと考えております。この研究が先駆けとなり福島第一原子力発電所事故の生物、生態への影響が今後より詳しくさまざまな形で調査、研究されていくことを望みます。

この度の震災により被災された多くの方々に心よりお見舞い申し上げます。

琉球大学 理学部 大瀧研究室 関連研究者一同

### どのような実験をおこなったのですか？

2011年3月に生じた福島第一原子力発電所事故を受け、私たちは生物学者として何かできることはないかと模索し、小型の蝶であるヤマトシジミを用いて放射性物質拡散の生物への影響を調査することを試みました。私たちは以下の4つの実験を実施しました。

- ・関東ー東北地方のヤマトシジミ（被曝世代）のサンプリング（図1）（2011年5月（事故2ヶ月後））およびその子世代、孫世代までの形態等の異常の有無の調査（沖縄で飼育）。
- ・事故後半年において、関東ー東北地方のヤマトシジミのサンプリング（2011年9月）およびその子世代の形態等の異常の有無の調査（沖縄で飼育）。
- ・セシウム線源を用いた沖縄産ヤマトシジミへの外部放射線照射による異常形態の再現実験。
- ・福島地方より採集した食草（餌）を用いた沖縄産ヤマトシジミへの内部被曝実験による福島環境の再現実験。



図1) 2011年5月採集におけるサンプリング地点

### どの様な結果が得られたのですか？

私たちは、採集した蝶の翅、色模様（斑紋）、脚、触角、パルピ（口髭）、複眼、胸部、および腹部の形態、翅サイズ（体長）について調べました。また、その子世代については形態異常に加え、成虫になるまでにかかるの日数についても調べました。その結果、福島地方より採集した被曝個体のみでなく、その子供や孫の世代の個体においてもさまざまな形態異常が観察されました（図 2）。その傾向は放射線量の上昇に応じて、また原子力発電所に近づくにつれて上昇していました（図 3、図 4）。さらに、2011 年 5 月に採集した福島地方の個体では、雄個体の翅サイズ（体サイズ）が他地域よりも小型化するとともに、線量に応じたサイズの縮小傾向が観察されました（図 5、図 6）。また、5 月および 9 月の子世代（F1 世代）では、福島第一原子力発電所に近接する地域の個体において、蛹になるまでや羽化までの発育期間が延長される傾向が見られました（図 7）。さらに、孫世代では子世代と同様の形態異常が出現し、異常が遺伝することがわかりました。

これらの結果に加えて、放射線源として  $^{137}\text{Cs}$ （セシウム 137）を用いて、沖縄産のヤマトシジミに放射線照射を実施したところ、福島地方の個体と同様な形態異常が観察され、線量に応じた生存率の低下が認められました（図 8）。また、沖縄産のヤマトシジミに、福島地方より持ち帰った放射性物質の混入した食草（カタバミ）を餌として与える内部被曝実験を行ったところ、食草に混入していた  $^{137}\text{Cs}$  量（セシウム 137 量）および  $^{134}\text{Cs}$  量（セシウム 134 量）に応じた生存率の低下が確認され（図 9）、さまざまな形態異常個体が出現しました（図 10）。

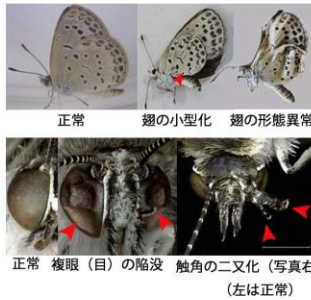


図2) 福島地方のヤマトシジミにおいて観察された形態異常

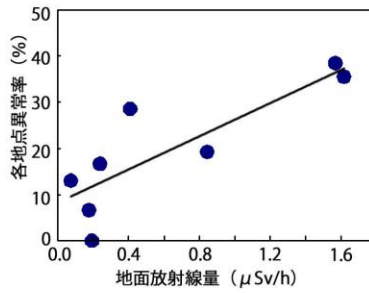


図3) 2011年9月採集個体における地面放射線量と地点別異常率

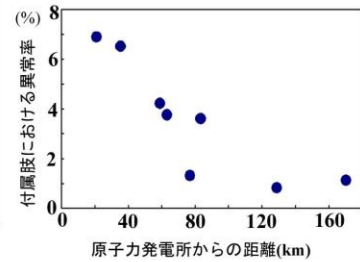


図4) 2011年5月採集個体子世代における付属肢の異常率と原子力発電所からの距離

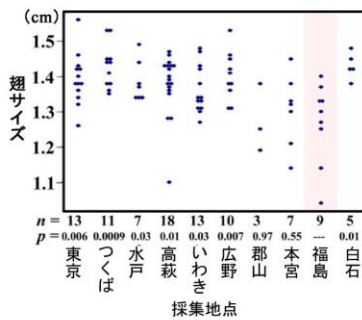


図5) 2011年5月採集雄個体の地点別翅サイズ

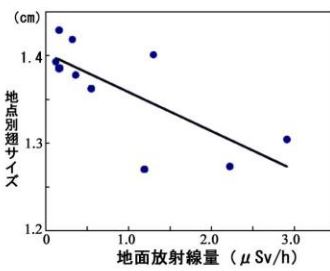


図6) 2011年5月の採集個体における地点別翅サイズと地面放射線量

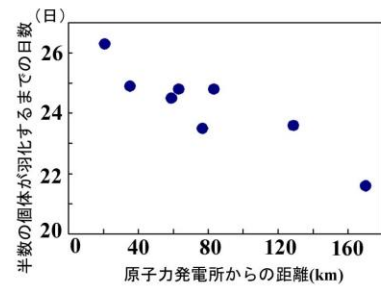


図7) 2011年5月採集個体子世代における半数羽化日と原子力発電所からの距離

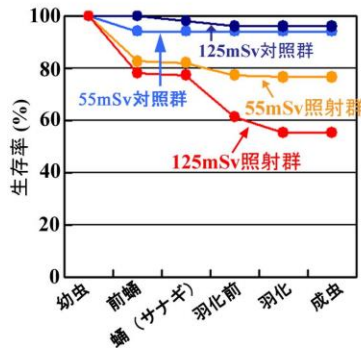


図8) 放射線照射実験における生存率

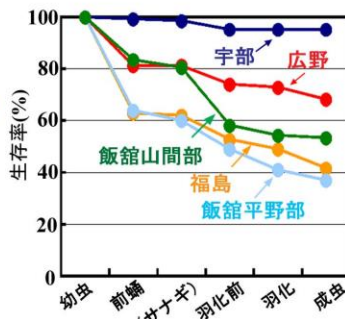


図9) 内部被曝実験における生存率



図10) 外部照射実験(上段)および内部被曝実験(下段)において出現した形態異常個体

### なぜ放射線の影響だといえるのですか？

私たちの実験によって、福島地方より持ち帰ったヤマトシジミにはさまざまな形態異常が見られ、またその一部は遺伝することがわかりました。この結果は、出現した異常の一部が、遺伝子レベルの異常に起因するものである可能性を示唆しています。また、出現した異常は、これまでの飼育経験上観察されたことのないものでした。さらに、採集地点別の異常率が我々の測定した放射線量とよく一致すること、福島地方の個体に観察された異常と同様な形態異常が<sup>137</sup>Cs（セシウム）による放射線照射実験および福島地方より持ち帰った放射性物質を含んだ食草を幼虫に与えた内部被曝実験においても観察され、その出現頻度は放射線量の増加に応じて増加する傾向が見られたことなどを考慮すると、福島地方のヤマトシジミにおいて観察されたさまざまな異常の出現は非常に特殊な現象であり、放射性物質の存在が原因で生じたという結論が最も妥当であると考えられます。

### なぜヤマトシジミを用いたのですか？

ヤマトシジミは小型で飼育しやすく、蝶の中でも非常に扱いやすい種です。幼虫はカタバミ (*Oxalis corniculata*) のみを食べて育つため、庭先や畑、田んぼに非常に多い種です。そのため、人の生活環境の変化を調べる上で、非常に利用価値の高い生物種の一つと言えます。また、私たちはこれまで10年以上にわたりヤマトシジミの研究をしており、非常に多くの個体を観察してきた実績があります。私たちは、この蝶の飼育法をすでに確立しています。そのため、非常に多くの個体を研究室内で飼育し、扱うことが可能です。以上のような理由により、私たちはヤマトシジミを用いて福島第一原子力発電所事故の影響を調べることを試みました。

### 北に行くほど異常率が上がると聞きましたが？

ヤマトシジミは近年、青森県内において北進傾向があることが知られています。しかし、それらの北限個体において斑紋変化以外の形態異常が増加しているという報告は現在のところありません。また、今回の実験におきましても緯度上昇と異常率との間に関連性は見られないことから、北の個体群ほど異常率が高いという認識は誤りであることがわかります（図11）。

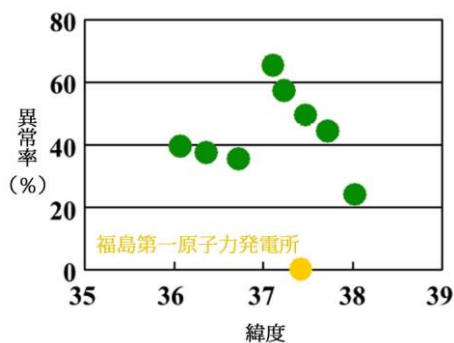


図11) 2011年5月F1個体異常率と緯度

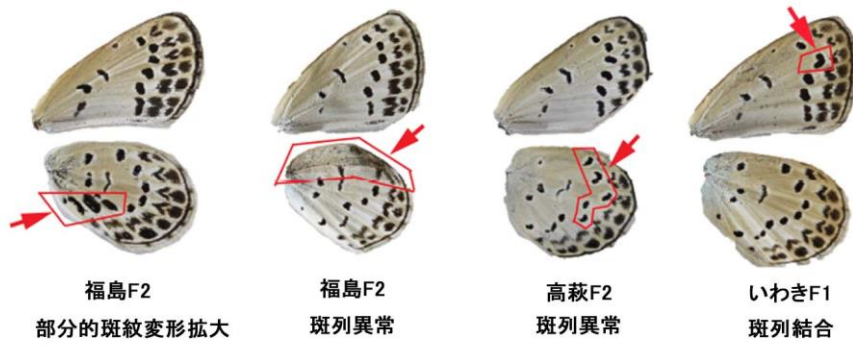
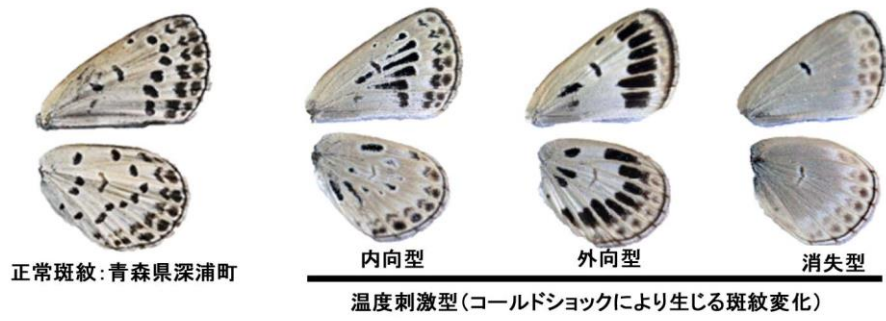
### 東北地方においてもともと斑紋異常が多いのではないのですか？

ヤマトシジミの研究において、東北地方全体について異常率が高いことを示した研究報告はありません。私たちはこれまで10年以上にわたりヤマトシジミの色模様や生態について研究してきました。そして、その研究の成果として、ヤマトシジミの生息北

限である青森県深浦町（福島第一原子力発電所より約 370km 北方）において多くの色模様異常型が出現した現象を報告し、2010 年に発表いたしました（論文 1）。しかし、この現象は、論文中においても記述されておりますように、深浦町というごく限られた地域のみで観察された非常に特別な現象です。同じくヤマトシジミの生息域の最北限である青森県八戸市や深浦町の南方に位置する秋田県北部においては、異常個体の出現は報告されておられません。これらの北限個体群の斑紋異常につきましても、私たちは引き続き研究を行っています。

### 北限個体の異常と福島個体の異常の違いはどのようなものですか？

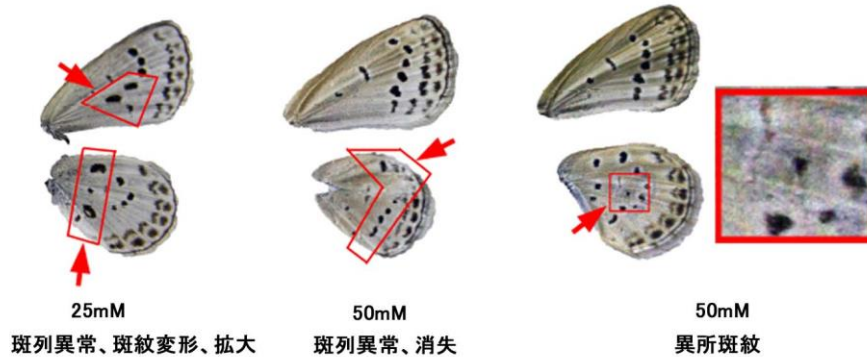
北限個体群（深浦町の個体群）で出現する異常は、これまでの研究により決まった斑紋変化が出現することがわかっています（表現型可塑性）。これは実験室内でのコールドショック（低温処理）によっても再現されるもので、3 種類のパターンに大別できるものです（図 12）。しかし、コールドショックの効果は、蛹が 4℃以下程度の低温状態にさらされた時のみ生じるため、夏季に採集された福島地方のヤマトシジミが野外でコールドショックを受けたことは考えられません。また、福島地方の個体ではコールドショックとは全く異なった無秩序な色模様の異常個体が出現しています。さらに、コールドショックでは出現しない、翅以外のさまざまな形態異常も出現しています。そのため、福島地方のヤマトシジミにおいて観察された形態異常は、低温とは全く異なった原因により発生したものと考えられます。また、福島のヤマトシジミにおいて見られた色模様異常と同様の異常が、遺伝子突然変異誘発物質（EMS）を与えた蝶においても観察されています。以上のことから、福島地方の蝶に観察されたさまざまな異常の原因は、コールドショックとは全く異なるものであり、突然変異誘発物質と同等の催奇性（異常を生じさせる能力）を持つ要因により引き起こされた可能性が強く示唆されます。



福島地方の個体において観察された斑紋異常個体



外部照射実験・内部被爆実験において観察された斑紋異常個体



突然変異誘発剤(EMS)混入実験による斑紋異常個体

図12) 福島地方のヤマトシジミにおいて出現した斑紋異常型とコールドショック、放射線照射、突然変異誘発剤により出現した斑紋異常との比較

### **翅サイズの矮小化は寒さ（緯度上昇）のためではないのですか？**

一般的に、昆虫の体サイズは外気温の低下に対して大型化することが知られています。それに反して、福島地方の蝶では翅サイズ（体サイズ）の矮小化（小型化）が観察されています。また、調査の最北地である白石市の個体ではサイズの縮小は観察されていません（図 5）。さらに、翅サイズの縮小は、放射線照射実験および内部被曝実験においても再現されており、放射線の影響を受けてサイズの縮小が生じたと考えるのが最も妥当です。

### **異常は地域変異ではないのですか？**

出現した異常の中には、斑紋の異常も存在していますが、その他にも翅や脚、触角、複眼（目）といった、生存上非常に重要な器官においても形態異常が確認されています（図 2、図 10）。また、その中には非常に重度の異常を示している個体も多数存在していました。さらに、私たちの実験では、子世代、孫世代において著しい稔性（次世代を残す能力）の低下が観察されています。そのため、これらの異常および性質が従来より存在する地域変異であるとは考えにくく、特殊な外的要因の変化を反映したものである可能性が高いと考えられます。

### **異常は津波が影響しているのではないのですか？**

サンプリング地点のほとんどは海岸線よりはるかに内陸側にあります（図 1）。また、沿岸地域のサンプリングにつきましても、津波の影響のないエリアでサンプリングを実施したため、津波による影響はないものと考えられます。

### **原発北部や西部についてのサンプリングが行われていないのはなぜですか？**

当初の実験デザインでは会津や仙台を含む、福島第一原子力発電所を囲むような形で採集を計画しておりました。しかしながら、サンプリングの進行状況や天候、また捕獲した母蝶を生きのまま持ち帰る必要性のため（成虫は1週間程度で死んでしまいます）、発表されているようなサンプリング地点、サンプル数を得ることで精一杯であり、そのため白石市が調査の最北地となっています。

### **飼育方法が不十分なため異常が出現したのではないのですか？**

ヤマトシジミの飼育法について記載した論文(論文 2)において報告してありますように、私たちの飼育システムでは、平常時における死亡率（異常率）は10%未満となっています。従来、この飼育システムでは福島地方の蝶で観察されたような色模様異常、形態異常等の異常個体は出現していません。そのため、福島地方の蝶で見られた異常は飼育方法の不備によるものではありません。

### 照射実験では照射の間全く世話をしなかったのではないですか？

照射実験では、2日または3日おきに飼育容器の清掃、エサの交換、補充を行っています。これは対照群についても同じで、対照群と実験群は全く同一のタイミングで行いました。また、飼育環境に関しましては明期-暗期:16L-8D、温度条件:27±1℃となっています。この飼育条件は、外部照射実験のみでなく、内部被曝実験、F1やF2の飼育についても同様です。そのため、得られた結果は飼育環境の違いによるものではありません。

### サンプル数が少ないのではないですか？

私たちの実験では、合計5,942個体のヤマトシジミを調べました。また、得られた結果につきましても、全て統計的に有意な結果です。私たちはこれまで10年以上ヤマトシジミを扱っており、一貫して同一の飼育法を用いて研究を進めてきており豊富な飼育経験があります。その中で、このような形態異常をもつ個体はこれまで出現したことがありません。そのため、福島地方のヤマトシジミで観察された異常個体の出現は非常に特殊な現象だと考えられます。

### 遺伝子異常といえるのですか？

観察された形態異常が遺伝子の異常であるという直接的な証拠はありません。しかしながら、形態異常のいくつかは次世代へ遺伝しました。これにより出現した異常の中に、遺伝子の異常により生じたものが存在している可能性があることがわかります。今後の実験では出現した形態異常が遺伝子異常によるものであるかどうか、DNA配列を比較し、直接的に調べていく予定です。

### 昆虫は放射線に強いと言われていますが？

一般的に、昆虫は放射線に強いといわれています。それは不妊虫の作成において、個体へ短時間に高線量の放射線照射を行う実験に由来するものです。今回の実験では幼虫期の非常に若齢の時期からサナギ期まで、長期間にわたる低線量の照射実験を行ったことに加え、放射性物質の混入した食草による影響についても検証しました。このような研究事例は他になく、従来の放射線照射実験とは実験条件が全く異なるため、結果について直接的に比較することはできません。さらに、放射線への感受性は種により大きく異なる可能性が考えられます。今回の実験結果がヤマトシジミに特異的であるのか、また他のチョウや昆虫にも適用されるものであるのか、今後研究していかなければならない部分であると考えています。

### 今後、人にも同様のことが起こり得るのですか？

この実験の結果のみをもって人体への影響を計り知ることはできません。昆虫の生理反応と人を含めた哺乳類の生理反応は全く異なります。また、放射線感受性は近縁種間によ



っても大きく異なることが考えられます。そのため、人における放射線の影響については、より多くの、さまざまな実験による検証結果に基づいて判断しなければなりません。

ただし、チョウも人も分子レベルで見ればかなり類似した生き物ですので、放射線の影響についても、特に分子レベルのメカニズムで考えると、何らかの共通点はあるということになります。

#### 今後どのような実験を予定していますか？

今後の実験では、まず、福島地方におけるヤマトシジミが今後どのように変化していくか、継続した長期的なモニタリングを行う必要があると考えています。2011年から2013年の3年間におけるモニタリング結果はすでに発表しています（論文3）。また、今回の実験において観察された形態異常が遺伝子の異常に由来するものであるかどうか、直接、遺伝子配列を比較することにより調べることを予定しています。さらに、ヤマトシジミ以外の種についても放射線感受性を調べることを予定しています。

#### ヤマトシジミの研究以外にはどのような研究をしていますか？

私たちの研究室では、ヤマトシジミへの放射線の影響調査以外にもさまざまな研究を行っています。研究対象も幅広く、沖縄の蝶の分類と進化についてや同じく沖縄の蝶であるタテハモドキやアオタテハモドキ、また、魚類であるマンダリンフィッシュを用いた色模様形成の発生のしくみ、さらにタンパク質のアミノ酸配列解析・機能解析や化学物質受容（嗅覚）のしくみまで幅広く行なっています。

#### 引用論文、参考文献

(論文1) Otaki JM, Hiyama A, Iwata M, Kudo T: **Phenotypic plasticity in the range-margin population of the lycaenid butterfly *Zizeeria maha***. *BMC Evol Biol* 2010, **10**:252.

(論文2) Hiyama A, Iwata M, Otaki JM: **Rearing the pale grass blue *Zizeeria maha* (Lepidoptera, Lycaenidae): Toward the establishment of a lycaenid model system for butterfly physiology and genetics**. *Entomol Sci* 2010, **13**:293–302 .

(論文3) Hiyama, A. Taira, W. Nohara, C. Iwasaki, M. Kinjo, S. Iwata, M. Otaki, J. M.: **Spatiotemporal abnormality dynamics of the pale grass blue butterfly: three years monitoring (2011- 2013) after the Fukushima nuclear accident**. *BMC Evol. Biol.*2015, **15**:15

(参考) Hiyama A, Nohara C, Kinjo S, Taira W, Gima S, Tanahara A, Otaki JM: **The biological impacts of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly**. *Sci Rep* 2012, **2**:570.

(参考) Hiyama A, Nohara C, Taira W, Kinjo S, Iwata M, Otaki JM: **The Fukushima nuclear**

accident and the pale grass blue butterfly: Evaluating biological effects of long-term low-dose exposures. *BMC Evol Biol.* 2013, **13**:168



Photo by M. Iwata