

長距離を移動する昆虫の同位体を調べて分かること

大塚 彰
（農研機構）

昆虫には季節の変化に合わせて長い距離を移動するものがあります。ここで言う長距離とはどのくらいの距離を言っているのでしょうか。数 km？数十 km？ いやいや、もっと長い距離です。西日本を例にして長距離移動性の昆虫を見てみましょう。

春の桜が散り青葉の季節になる5月頃から梅雨時期まで、日本の南の温かい湿った大気が徐々に勢いを増して来ると、中緯度帯で低気圧が発生し、東シナ海を西から東に移動するようになります。そういった低気圧はその南側に南西からの強い風を伴っています。この暖かい南西風は熱エネルギーを北へと運ぶのですが、中国南部など南方でこの時期に発生する移動性の昆虫もこの気流を利用し東シナ海を越えて九州など西日本に飛来するようになります。その距離は数百 km から 1,000 km を越えることがあります。ここで対象とする移動距離はこのようなスケールです。具体的な昆虫種としてはハスモンヨトウ、アワヨトウ、ツマジロクサヨトウなどのヤガ類や、トビイロウンカ、セジロウンカなどのイネウンカ類がその代表です。こうした長距離移動性昆虫の同位体を調べるとどんなことが分かるのでしょうか。

1. 水素の安定同位体比

それを知るために北米大陸での移動性昆虫の代表であるオオカバマダラ（monarch butterfly, *Danaus plexippus*）の研究を見てみましょう。このチョウは冬季にメキシコなど北米大陸の熱帯地域で越冬し、春以降世代を繰り返しながら北上し、夏季にカナダ南部以南、ロッキー山脈より東部の北米大陸で生育し、秋になるとまた熱帯地域の越

冬地まで戻ります。Hobson ら（1999）は大勢のボランティアの協力を得て、夏季に北米大陸の33地点でこの虫の卵を自然に生えている寄主植物トウワタ（*Asclepias curassavica*）に付けその上で幼虫を育てて羽化させました。その翅の水素の安定同位体比 $\delta^2\text{H}_m$ を調べました。自生するトウワタは天水のみで育ちます。これはとても大がかりな研究ですね。測定の結果、メキシコ湾岸からカナダ南部にかけて、緯度が増えるにしたがって $\delta^2\text{H}_m$ の値が徐々に小さくなりました。北米大陸の降水中の重水素の安定同位体比は緯度が増えるにしたがって小さくなることが知られていますから（緯度効果）、両者の関係は直線回帰式で表現できて

$$\delta^2\text{H}_m = 0.62 \times \delta^2\text{H}_p - 79 \text{ (‰)}$$

ここで $\delta^2\text{H}_p$ は降水中の重水素の安定同位体比です（添え字 p は precipitation の意味）。

降水⇒餌であるトウワタ⇒オオカバマダラの翅の順に重水素が移って行ってこのような関係が生まれていることが分かります。

この研究ではさらに 99.9%の重水を使って異なる重水濃度の水を用意してトウワタとそれに寄生したオオカバマダラを育て、トウワタの $\delta^2\text{H}_a$ と翅の $\delta^2\text{H}_m$ との関係を調べ、直線回帰式

$$\delta^2\text{H}_m = 0.99 \times \delta^2\text{H}_a + 1.4 \text{ (‰)}$$

を得ています。傾きがほぼ1で切片が小さな値ですから、オオカバマダラの翅の安定同位体比はトウワタの安定同位体比にはほぼ等しく、重水素は餌

から翅へ割合をあまり変えず移行していることが分かります。最初の式と合わせて考えると降水の重水素がトウワタに同化される時にその割合が減っていることが示唆されます。

このような大陸における降水と翅の水素の安定同位体比の関係は他の種でも報告されています。Holder ら (2018) の重水と寄主植物の大麦を使った室内飼育実験によるとヤガ類のアメリカキヨトウ (*Mythimna unipuncta*) の翅の同位体比と降水との関係式は

$$\delta^2\text{H}_{\text{moth}} = 0.40 \times \delta^2\text{H}_p - 84.4 \text{ (‰)}$$

切片の値は上のチョウと近いですが、傾きはさらに小さくなっています。一方北米大陸のトンボ類 3 種 (*Aeshna interrupta*, *Aeshna umbrosa*, *Pachydiplax longipennis*) について、それらの翅の同位体比と降水の関係式は

$$\delta^2\text{H}_{\text{dragonfly}} = 0.91 \times \delta^2\text{H}_p - 42.5 \text{ (‰)}$$

のように得られています。トンボの幼虫ヤゴは水中で過ごし、微小な甲殻類や水生昆虫をエサとするため、幼虫が草食のチョウ目とは異なり、切片、傾きともにより大きな値となっていることが興味深いです。

こうした関係式と降水の $\delta^2\text{H}_p$ 地図を使えば捕獲した昆虫がどの緯度帯から移動して来たのかを推定することができます。それを見るために今度は場所をユーラシア大陸に移してさらに 3 種の同位体研究について見てみましょう。

最初の例は中国の渤海にある島で光トラップを用いて捕獲されたチョウ目のタマナヤガ (*Agrotis ipsilon*) です。小さな島でのモニタリングですので海の上空を移動していた個体が捕獲されていると考えられ、5, 6 月の早いシーズンでは $\delta^2\text{H}_{\text{moth}}$ が -41 から -32‰ と高い値を示す個体が 20 パーセントと多く、これは南からの飛来を示唆していますが、秋の 9-10 月になると -62 から -51‰ と

低い値を示す個体が 80 パーセント弱のように主体となり、北部地域からの戻りの移動を示唆しました。

同様に、タジキスタンなど中央アジアで捕獲されたウスバキトンボ (*Pantala flavescens*) の例では 5 月に捕獲された成虫の翅の $\delta^2\text{H}_{\text{dragonfly}}$ は -78.7 から -49.6‰ となり、その後 6 月から 10 月にかけては中央アジアの個体群が主体となり、その同位体比は -170.9 から -91.7‰ とより低い値となりました。この研究では本種が冬季にエチオピアで発生していることや、エチオピアで捕獲した別種のトンボの翅の $\delta^2\text{H}_{\text{dragonfly}}$ が -61 から -35‰ の値となり、シーズン初期のウスバキトンボの値に近いことなどから、東アフリカが 5 月の飛来虫の飛来源ではないかと推定されています。

さらに、中国大陸では主に熱帯、亜熱帯地域分布するミカンコミバエ (*Bactrocera dorsalis*) とする熱帯果実などに卵を産む重要害虫が発生しています。気候変動によってこれらの分布域が大陸のより北部へと拡大しないかと懸念されています。そこで北京市の市場、その郊外の有機ブドウ園と中国各地 (南から海南省海口市 (20.0°N)、広東省広州市 (23.1°N)、福建省福州市 (26.1°N)、湖北省武漢市 (30.6°N)、江蘇省宜興市 (31.3°N)) に設置したトラップで誘殺されたミカンコミバエの体全体を乾燥後粉碎し、同位体を計測しました。その結果、中国各地のミカンコミバエの $\delta^2\text{H}$ は平均で南から -80.3 から -93.5‰ で、緯度が上がるにしたがって小さな値となりました。一方北京市で捕獲されたミカンコミバエの $\delta^2\text{H}$ の平均値は -88.1‰ と -87.1‰ であり、福州市の値に近いものでした。そのため、北京市のミカンコミバエはそこで羽化したものではなく、中国南部から飛来したものと示唆されました。

以上のように、大陸での春の北向きの長距離移動や秋の南への戻り移動について虫の水素安定同位体比を調べることで個体ごとに出生地のおおよその緯度帯を推定できることが分かってきました。

2. ストロンチウムの安定同位体比

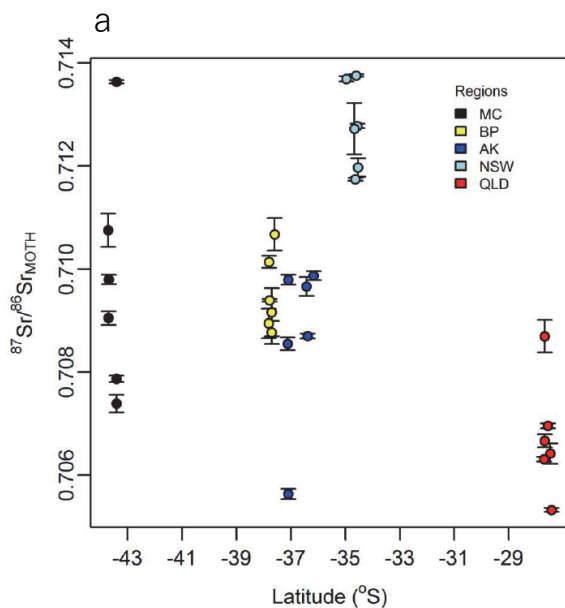
次に昆虫とストロンチウムの安定同位体比 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ について見てみましょう。ストロンチウムの場合 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の値は岩石の種類とそれらの形成年代によって異なってきますから (第3章 重元素同位体を参照)、これらが異なる地域で育った昆虫はその $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値がどのような値になるのか興味あるところです。

Holder ら (2014) はニュージーランドとオーストラリアの異なる地質地域のトウモロコシを食べて育ったオオタバコガ (*Helicoverpa armigera*) の翅を除いた体の同位体比を調べました。その結果図1のように $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値は地域によって異なる値となりました。地質図を参照すると、一番値が高かったオーストラリアのNSW 付近はオルドビス紀の地質で年代が古く、値が低かったQLD は若い火成岩の値を反映しているのではないかと考察されています。またニュージーランドのMC 付近は背景の山から流れ出る河川による扇状地となっているため地質的に非一様なものが混ざり、虫の採集地点ごとに値がばらばらしているのだらうと考察されています。さらにストロンチウムに加えて、水素、鉛の同位体解析を合わせて判別モデ

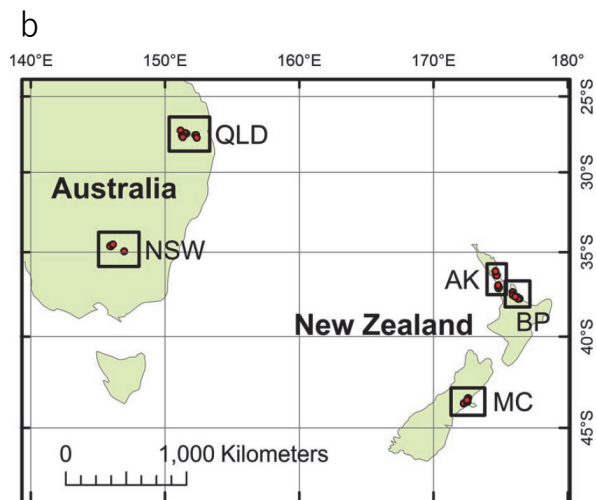
ルを作れば75%の精度で出生地を判別できることを示しました。

3. 我々の取り組み

冒頭に紹介しましたように日本には色々な種類の農業害虫が飛来してきます。また国内で発生した個体群が盛んに分散しています。これら移動・分散の実態をより正確に把握し、発生予察に役立てることで、害虫の適切な管理による農作物の保護を実践することが重要です。これまで長距離移動性害虫の研究では、様々なモニタリング手法を用いて発生調査を行い飛来のタイミングなどを明らかにし、飛来があった地点から気流を解析したり、虫の遺伝子を分析したり、殺虫剤に対する感受性の検定を行ったり、中国での発生情報を収集したりして移動・分散実態に迫ってきました。上の2つの節で見たように同位体解析は長距離移動性害虫の研究に新しい解析軸を提供します。中国大陸は日本に飛来する多くの昆虫の飛来源であり、地質学的に日本列島より古いので、ストロンチウムの解析が利用できるかもしれません。さらに複数の元素の安定同位体比を適切に組み合わせ、既存の解析法と合わせて総合的に考察すれば、



Holder et al., doi:10.1371/journal.pone.0092384.g003 (CC BY)



Holder et al., doi:10.1371/journal.pone.0092384.g001 (CC BY)

図1 a. オオタバコガのストロンチウム安定同位体比 b. オオタバコガのサンプリング場所

トラップで捕獲した虫を個体ごとに飛来個体なのか国内で発生した個体なのかを区別できるかもしれません。例えばシーズンの初期に捕獲した虫は越冬したものなのか、飛来したものなのかを区別できればその後の防除対策に役立ちます。同位体解析を使って飛来源をより絞り込めるようになれば、飛来予測手法の改良が可能となるでしょう。こうした観点から、我々のグループは長距離移動性のヤガ類であるアワヨトウとツマジロクサヨトウの同位体解析に取り組んでいます。国内では地球研と、海外では飛来源である中国の研究機関と共同研究を進めており、同位体解析によって長距離移動性昆虫の移動・分散実態の新しいイメージが得られるようになることを期待しています。

文献

Hobson K, Wassenaar L & Taylor O (1999) Stable isotopes (δD and $\delta^{13}C$) are geographic indicators of natal origins of monarch butterflies in eastern North America. *Oecologia* 120: 397–404.
<https://doi.org/10.1007/s004420050872>

Hobson (2018) Inferring origins of migrating insects using isoscapes: a case study using the true armyworm, *Mythimna unipuncta*, in North America. *Ecological Entomology* 43: 332–341.

<https://doi.org/10.1111/een.12505>

Holder P, Armstrong K, Hale R, Millet M-A, Frew R, Clough T, Baker J (2014) Isotopes and trace elements as natal origin markers of *Helicoverpa armigera* – an experimental model for Biosecurity Pests. *PLoS ONE* 9 (3): e92384.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092384>

著者情報



大塚 彰（農業・食品産業技術総合研究機構）長距離移動性害虫のモニタリングや飛来実態解明、飛来予測技術の開発をテーマとし、中国、韓国、ベトナムとの共同研究を推進している。

（2021年3月31日掲載）