
小型動物の行動追跡手法：蛍光トラッキングの紹介と有効性の検討

岡宮 久規・草野 保

192-0397 東京都八王子市南大沢1-1 首都大学東京大学院・理工・生命・動物生態学研究室

Evaluation of a tracking technique using fluorescent pigment for movement of wild life

By Hisanori Okamiya and Tamotsu Kusano

Animal Ecology Laboratory, Department of Biological Sciences, Graduate school of Sciences and Engineering, Tokyo Metropolitan University, Minami-osawa 1-1, Hachioji, Tokyo 192-0397, Japan

はじめに

野外における動物の移動を記録し、そのパターンや適応的意義を明らかにしようという研究は生態学における大きなテーマの一つである。「移動」という現象を研究テーマとして扱う場合、個体の移動経路をなるべく正確にかつ定量的に記録する必要がある。そのため現在までに様々な手法や記録装置が開発されてきた。最近では電子機器の小型化・高性能化により様々な記録センサーを直接動物に装着し計測を行うバイオリギングと呼ばれる手法が開発され利用されるようになってきた（日本バイオリギング研究会, 2009; 渡辺, 2014）。しかし、我々が研究対象とする両生爬虫類の多くは比較的小型であり、小型動物の移動を扱う上でバイオリギングには回収方法・機器サイズ・精度・コストなどの面で今のところまだ多くの課題がある。特に問題となるのはデータの回収方法であろう。コロニー繁殖する鳥類や哺乳類など一部の種では、繁殖個体を捕獲し装置を装着した後放逐すればその後コロニーに再度戻ってくる個体を再捕獲することは容易なので、比較的容易にデータの回収が可能である。そのような種以外ではデータの回収は極めて難しい。回収を少しでも確実なものにするためには位置情

報を記録するロガーに加えて、回収に用いるための発信機などの装置も必要となる。このような装置は軽いものでも数十gになる（Hallworth and Marra, 2015）。動物に発信機を装着する場合、その重量は動物の体重の10%以下が望ましいとされており（Richards et al., 1994）、これに従えば使用できるのは一部の種に限定される。最近になってより小型の装置が開発され始めているが（Hallworth and Marra, 2015）、幅広く実用化されるにはしばらく時間がかかりそうである。また、陸生動物の移動を比較的高い精度で追跡出来る手法として最近主流になりつつあるのがGPS受信機を動物の体に装着する手法であるが、前述の重量面の課題に加え一般に利用される機種の中では最も精度が高いとされる第三世代携帯型GPS受信機でも十数m前後の測位誤差が存在する（古澤他, 2011）。数mからせいぜい数百m圏内で移動する小型種において、目的によってはこの誤差は無視できない大きさであり、実際の研究事例も行動圏の広い大型哺乳類など一部の種に限られている。そしてバイオリギングの導入を困難にする大きな理由としてコスト面の課題を無視することはできない。この手の装置は一式揃えるとかなり高額になってしまい、それな

りの予算が付くようなプロジェクトでもない限りなかなか手を出しにくい状況にある。以上の点からパイオロギングは小型動物の移動追跡調査においてはまだまだ課題の多い手法といわざるを得ない。

小型動物の移動調査において現在最も頻繁に用いられている手法はラジオテレメトリーであろう(草野, 2005; 松井, 2003)。小型電波発信機を個体に背負わせ小型の受信アンテナで追跡して位置を特定する手法であるが、いくつかの問題点が指摘されている。もっとも大きな問題点は調査ごとに個体の現在位置を確認し、そのポイントデータとして移動経路が与えられるので移動経路の精度が調査回数に大きく依存してしまう点であろう。また追跡には多くの労力を要し、同時に調査可能な個体数も大きく制限される。その他探索頻度を上げるほど個体の自然な行動が阻害されるなどの問題も指摘されている(Eggert, 2002)。

これらの問題点を補い、安価にかつ比較的高い精度で動物の移動経路を記録する手法の一つとして蛍光顔料を使用した行動追跡法(以下、蛍光トラッキング)が知られている(Graeter et al., 2008など)。欧米を中心にいくつかの研究例があるものの、いまだに我が国では認知度は低く、筆者が確認する限り国内での研究例は存在しない。今回、この手法について在来種への適用を試み、一定の成功を収めることができた。特に我々が研究対象とする両生爬虫類のような地表徘徊性の小型動物の移動経路を追跡する上で有効な手法であることがわかった。いくつかの課題はあるものの安価にかつ高い精度での移動経路を得ることができ、工夫次第で様々な解析に用いることができることから応用価値は高いと考える。そこで今回、蛍光トラッキングについて手法の紹介を行うとともに、予備的な調査からわかった利点と課題、またその応用可能性について紹介したい。

蛍光トラッキング

蛍光トラッキングとは、蛍光顔料という特殊な顔料を使用する移動追跡手法である。蛍光顔料とは平均粒径 3~4 μm ほどの粉末で、大きな特徴として紫外線照射下で蛍光色を呈色する点がある。ブラックライトなどで照らすと非常に明るく発色し、暗い場所では数粒でもはっきりと視認することが出来る。赤、緑、白など多くのカラーバリエーションがあり、道路標識や玩具など様々な製品の塗装に用いられる他、アートの分野でも活用されており、ボディペイントなど人体に使用する例もある。

蛍光トラッキングは、この蛍光顔料を動物の体に塗布して放し、地面に残った顔料をたどることで移動経路を得る手法である。蛍光顔料を塗布された動物は地面や草本に蛍光顔料を付着させながら移動するので、移動経路に沿って蛍光顔料が残ることになる。一定時間後の夜間にその場所をブラックライトで照射すると軌跡が発光して浮かび上がるので移動経路を高い精度で追跡することが出来る。また条件によっては軌跡を最後まで追うことで追跡個体の再発見や休息場所を突き止めることも可能である(Eggert, 2002; Furman et al., 2011)。

蛍光顔料を野生生物の行動調査に用いる手法は古くから存在しており、主に個体識別用のマーキングとして用いられていたが(例えば Phinney and Mathews, 1969)、それを現在の移動追跡手法として用いるようになったのは70年代以降で、哺乳類研究の分野が始まりのようである(Frantz, 1972; Lemen and Freeman, 1985)。その後90年代に入ってから欧米を中心に両生爬虫類を対象とした研究にも多く用いられるようになった。全体として研究例は多いわけではないが、1999年から2000年代にかけて両生爬虫類を対象とした論文が多く出版されており、特にアメリカの両生爬虫類研究学会(SSAR)が発行する

表 1. 蛍光トラッキングが使われている文献とその概要.

分類群	狭義分類群	学名	主なテーマ	調査国	文献
両生類	サンショウウオウオ類	<i>Plethodon cinereus</i> , <i>Notoththalmus viridescens</i>	手法の有害性評価	アメリカ	Orlofske et al. (2009)
		<i>Plethodon cinereus</i>	生息地選択と捕食リスクの関係	アメリカ	Roberts and Liebgold (2008)
		<i>Notoththalmus viridescens</i>	繁殖後の分散様式, 生息地利用	アメリカ	Roe and Grayson (2008)
		<i>Plethodon cinereus</i>	手法の評価	アメリカ	Williams et al. (2014)
		<i>Lithobates clamitans melanotus</i>	環境利用	アメリカ	Birchfield and Deters (2005)
	カエル類	<i>Pelobates fuscus</i>	環境利用, 行動圏, 他手法との比較	フランス	Eggert (2002)
		<i>Atelopus zeteki</i>	移動長, 環境利用	パナマ	Lindquist et al. (2007)
		—	手法の紹介	アメリカ	Windmiller (1996)
		<i>Ambystoma opacum</i> , <i>Anaxyrus terrestris</i> , <i>Lithobates sphenoccephalus</i>	手法の評価	アメリカ	Graeter and Rothermel (2007)
		<i>Ambystoma opacum</i> , <i>Anaxyrus terrestris</i> , <i>Lithobates sphenoccephalus</i>	生息地選択, 移動長, 移動様式	アメリカ	Graeter et al. (2008)
爬虫類	トカゲ類	<i>Ambystoma maculatum</i> , <i>Lithobates sylvaticus</i>	手法の有害性評価	アメリカ	Rittenhouse et al. (2006)
		<i>Aspidoscelis sexlineata</i>	移動長, 環境利用, 手法の評価	アメリカ	Dodd (1992)
		<i>Xantusia riversiana</i>	手法の評価	アメリカ	Fellers and Drost (1989)
		<i>Phrynosoma cornutum</i>	移動長	アメリカ	Stark and Fox (2000)
		<i>Thamnophis</i> 属 3 種	手法の評価, 移動長, 移動様式	カナダ	Furman et al. (2011)
	へび類 カメ類	<i>Gopherus polyphemus</i>	環境利用, 移動様式	アメリカ	Blankenship et al. (1990)
		<i>Emydoidea blandingii</i>	孵化幼体の分散様式	アメリカ	Butler and Graham (1993)
		<i>Testudo graeca</i>	産卵場所の特定	スペイン	Keller (1993)
		<i>Glyptemys insculpta</i>	孵化幼体の分散様式	アメリカ	Tuttle and Carroll (2005)
		<i>Cadomys muscutimus</i>	環境利用	アルゼンチン	Corbalan and Debandi (2009)
哺乳類	げっ歯類	<i>Bandicota bengalensis</i>	行動圏	インド	Frantz (1972)
		<i>Neotoma albigula</i>	手法の環境への影響評価	アメリカ	Halfpenny (1992)
		<i>Spermophilus parryi</i>	個体群サイズ予測	カナダ	Hubbs et al. (2000)
		<i>Perognathus</i> 属 2 種, <i>Dipodomys ordii</i>	環境利用, 手法の紹介	アメリカ	Lemen and Freeman (1985)
		<i>Peromyscus gossypinus</i> <i>Peromyscus maniculatus</i>	環境利用 手法の有害性評価	アメリカ アメリカ	McCay (2000) Stapp et al. (1994)

Herpetological Review 誌にはテクニックに関する論文もたびたび掲載されている。研究対象はサンショウウオ類、カエル類、トカゲ類、ヘビ類、カメ類、げっ歯類など多くの分類群にわたり（表1）、いずれも有効な手法であることが強調されている。ここに挙げた以外でも、地表徘徊性で一定以上のサイズがあれば様々な分類群で適用可能だろう。

蛍光顔料を使用するにあたって一番気になる点はその毒性についてだろう。対象動物の生存を脅かす手法は当然用いるべきではないし、行動に影響が出てしまえば追跡手法として意味をなさない。蛍光顔料の毒性に関して評価した既存の調査研究では、悪影響は認められず安全な手法であると報告されている（両生類：Orlofske et al., 2009；Rittenhouse et al., 2006, 哺乳類：Stapp et al., 1994）。但し、蛍光顔料を塗布すると動物の外見が少なからず派手になるため、捕食リスクが高まる可能性が指摘されており、特に昼行性の種への適用には配慮が必要かもしれない（Mellor et al., 2004）。また、蛍光顔料は残留性が強いので環境への影響にも配慮が必要となる場合もあるだろう（Halfpenny, 1992）。

ここまで欧米での研究事例を対象に蛍光トラッキングについて紹介を行ってきた。しかし、先行研究だけでは実際の具体的な調査方法をイメージしづらく、どの程度顔料を塗ればよいのか、どの程度はっきりと軌跡が残るのかなど細かな点がわからない。また、筆者の探した範囲では日本国内でこの手法を用いた研究例は見つけることが出来ず、国内の環境で在来種にも使用可能か不明である。そこでこの手法の実用性を確認するべく、アズマヒキガエル (*Bufo japonicus formosus*) を対象に非繁殖期の行動圏や環境利用を調べる目的で蛍光トラッキングを用いた調査を行った。以下、調査方法と結果の一部を中心に、そこからわかった蛍光トラッキングの有効性と課題について紹介したい。

調査方法

蛍光顔料は日本蛍光化学株式会社製を使用した。色はレッド (NKP-8303)、オレンジ (NKP-8304)、ピンク (NKP-8307)、グリーン (NKP-8312)、イエロー (NKP-8315)、ホワイト (NKP-8329) の6色を試みた。蛍光色を確認したところ、レッドとピンクの識別が難しかったためレッドは実験から除外した。個体に塗布する手法であるが、先行研究では直接塗布する手法 (Fellers and Drost, 1989；Furman et al., 2011) とミネラルオイルに溶かしたものを塗布する手法 (Eggert, 2002；Williams et al., 2014) が主に用いられており、試験的に2つの手法を比較したところ、粉末のままだと体表に顔料が付着しにくかったため、ミネラルオイルに溶かす手法を採用した。ミネラルオイル (Johnson & Johnson 社、ジョンソンベビーオイル無香料) と顔料を約2:1の割合で混ぜ合わせたものを使用した。

調査は八王子市南大沢の首都大学東京南大沢キャンパス (35°37'10"N, 139°22'56"E) にて、2015年5月から6月にかけて計25日（軌跡の記録のみを行った日は含まない）行った。夜間に調査地を踏査し、アズマヒキガエルを探索した。原則として、発見した個体は性別の確認と頭胴長の計測を行い、PITタグ (トローバン ISO 型 ID-100) により個体識別を行った後、蛍光顔料を塗布し速やかに捕獲地点に放した。蛍光顔料は、後脚と腹部の一部に皮膚が見えなくなる程度までゴム製の刷毛を使ってやさしく塗布した (図1)。翌日以降の夜間に放した地点を訪れブラックライト (株式会社コンテック、PW-UV943H-04) を地上に照射し軌跡を追跡し、後述する方法により詳細に地図上に記録した。

結果

合計23個体 (雄7個体、雌16個体) から計41回軌跡を記録できた。但し、このうち6個

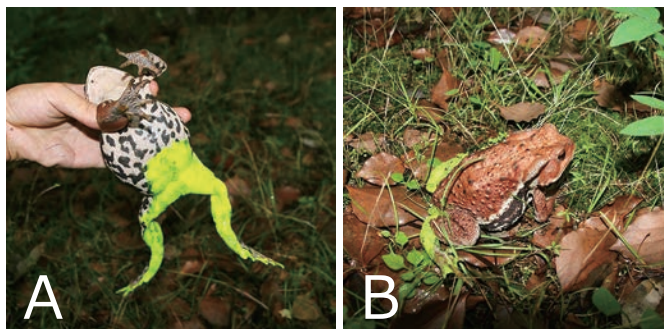


図1. 蛍光顔料の塗布例. A: 後脚と腹部の一部に適量塗布する. B: 放逐したところ. 個体が移動すると顔料が地面に付着し, 軌跡として残る.

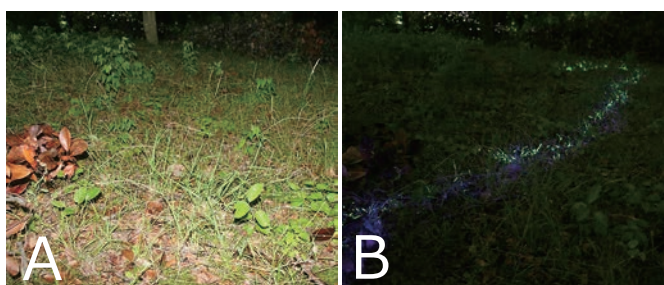


図2. 同一か所の軌跡を2通りの方法で撮影したもの. Aはフラッシュ撮影したもの. 地面に付着した顔料は微量のため, 通常のフラッシュ撮影ではほとんど視認することはできない. Bはブラックライトを照射しながら撮影したもの. 顔料が軌跡に沿って発光する様子がはっきりと確認できる.

体についてはPITタグの挿入を行わなかったため厳密な個体識別はされていないが, 性及び頭胴長から別個体として扱った. 個体の頭胴長の平均は雄で102.1 mm (範囲: 92-121), 雌で106.1 mm (範囲: 76-130)であった. 1晩で追跡できた軌跡長は最長41.9 m, 最短1.7 mだった (平均=16.6, SD=11.4). 軌跡を辿ることで個体の再発見が出来たケースは41回中17例で, 休息中の個体を発見できたものが4例, 活動中の個体を発見できたものが13例だった. それ以外は途中で軌跡を見失うか, 調査から数日後に軌跡の追跡を行ったため, 再発見には至らなかった.

蛍光トラッキングの有効性

実際の調査からわかった蛍光トラッキングの優れた点についてまとめる. 基本的に軌跡ははっきりと視認することが出来た. 地面の

細かな凹凸や草本に付着した顔料はわずかな量でも強く発光するので, 軌跡はライン状に浮かび上がる (図2). この手法を用いれば対象動物の詳細な移動をトレースすることが出来るので, 微環境利用など従来の手法では難しい精度の高いデータを必要とする解析に用いることが出来るだろう. 今回の調査において軌跡は最長41.9 mにわたって追跡が可能だった. これが限界というわけではなく, より長い距離でも追跡できると思われる. ナンプヒキガエル (*Bufo terrestris*) を使った先行研究では300 m以上の追跡に成功している (Graeter and Rothermel, 2007). また, ミネラルオイルの撥水性により, 雨天でも軌跡は流されることなく追跡することが出来た. ミネラルオイルに混ぜる手法を用いれば天候に左右されず調査が可能である (Eggert, 2002; Williams et al., 2014も参照).

1度の塗布で追跡出来るのは基本的に1晩で、昼間休息している間にほとんど顔料は取れてしまうようである。そのため連続して追跡する場合は再発見するたびに塗りなおす必要がある。後述するが、この時顔料の色を変えることで前の日の軌跡と区別することが出来る。今回の調査では計2日以上追跡出来た個体は5個体であり、もっとも長いもので8日が1個体、次いで7日が1個体、4日が1個体、2日が2個体であった。

今回調査を行った最小個体は76 mm、最大個体は130 mmだが、サイズに関わらず、調査を行うことが出来た。小型のヒキガエル科の一種 *Atelopus zeteki* を用いた先行研究では10 mm以下の個体にも使用しており (Lindquist et al., 2007), より小さい個体でも問題なく使用できるだろう。また昆虫を対象に個体識別のマーキングとして蛍光顔料を使用した研究が存在することから (Johansson, 1959; Sujii et al., 2000), 例えば地表徘徊性の昆虫などにも応用できるかもしれない。

その他大きな利点として、他の手法と比べて労力を少なく抑えることが出来る点が挙げられるだろう。基本的な作業は顔料を塗るだけなので、特殊な訓練は必要とせず、一人でも同時に複数個体を追跡することが可能である。今回の調査も基本的に一人で行ったが特に問題は生じなかった。そしてこの手法は非常に安価に行うことが出来る。今回使用した顔料は50 g入りで約800円、ミネラルオイルが300 mlで900円であり、ヒキガエルに使用する場合、塗布する量は1回につきせいぜい数 ml程度であり、費用は数十円で済む。

蛍光トラッキングの問題点

次に、調査を行う中で遭遇したこの手法の問題点についてまとめたい。軌跡は好条件下では40 m以上にわたって追跡出来た一方で、6-7 mほどで見失ったものが数例あった。今回調査を行った大学キャンパスは場所

によって街灯などの照明が多数設置されており、そのような明るい場所では蛍光の確認が難しかったことが大きな原因として挙げられる。またタイル地など起伏が少ない場所では顔料の付着が少なく見失いやすかった。夜間でも明るい場所や地面の起伏が極端に少ない場所ではこの手法を用いた調査は難しいだろう。また、狭い範囲を複雑に動き回ったり、同じ場所に戻ってきたりした場合、正確なルートを見極めるのが難しいケースがあった。残った顔料の濃さなどから推測できる場合も多いが、恣意的になる可能性がある。この点は時系列情報のない手法の短所といえるだろう。

近い場所で複数個体を追う場合や複数日にわたって追跡する場合、顔料の色を使い分けることで個体や日数を識別することが出来る (Furman et al., 2011; Fellers and Drost, 1989; Stark and Fox, 2000)。但しいくつか注意を要する点がある。今回の調査ではオレンジ、ピンク、グリーン、イエロー、ホワイトの5色を調査に用いた。色による見えやすさの違いはさほど感じなかったが、定量的に評価した研究によれば、違いがあるとの報告もある (Graeter and Rothermel, 2007)。色の違いによるアーティファクトを抑える意味でもなるべく視認しやすい色を使った方が良いだろう。また、顔料が微量だと、色を判別しにくいことがあった。特にグリーンとイエロー、レッドとオレンジの組み合わせが判別しづらかった (Fellers and Drost, 1989; Stark and Fox, 2000も参照)。判別しづらい色同士を組み合わせることはなるべく避けた方が良いだろう。その他の注意点としてキノコ類やヤスデの一種、人工物の破片などが蛍光発光することがあり、顔料と誤認しそうになったことが何度かあったので注意が必要である (Fellers and Drost, 1989; Butler and Graham, 1993も参照)。

蛍光顔料が個体に与える影響についてだが、こすり落とそうとするなど顔料を気に

する行動は見られなかった。放すとすぐに摂食活動を開始する個体もいたので、ヒキガエルにおいて顔料は大きなストレスにはならないと判断した。また数日間にわたって塗布を行った個体もいたが、調査終了時点で異常は認められず、少なくとも短期間で与える悪影響というものも確認されなかった。ただし複数日にわたって追跡するには再捕獲を繰り返す必要があり、爬虫類を対象にした先行研究では行動に影響が出たとの報告もあるので (Furman et al., 2011 ; Dodd, 1992), 対象種によっては注意が必要だろう。影響を少なく抑える方法として Roe and Grayson (2008) では再捕獲を行わずに休息中の個体にピペットを使って顔料を付着させる手法をとっている。

最後に、多くの研究でも指摘がされている問題点であるが、顔料の残留は考慮しなくてはならない (Halfpenny, 1992)。特にミネラルオイルを用いる手法は長期間にわたって地面に顔料が残留する (Eggert, 2002 ; Williams et al., 2014)。このため、同じ場所で繰り返し調査をするには限界がある。また、顔料自体は無害であるものの、あまりに多量の顔料が環境中に残留するような事態は避けるべきであろう。

軌跡の記録方法及解析方法

ここまで蛍光トラッキングの手法について紹介してきた。次に得られた軌跡をどのように記録して、どのような解析を行うことが出来るかについて記す。

軌跡の記録方法であるが、今回は2つの方法を紹介する。どちらの方法をとるかは割ける労力や、解析に必要な軌跡の精度などから総合的に判断するとよいだろう。

最も簡単な方法は、軌跡に沿って GPS 受信機を移動させることで記録する方法であろう (Graeter and Rothermel, 2007)。非常に省労力で記録可能な方法である。しかし、先述の通り GPS 受信機には数 m の誤差があるの

で、せっかく精度の高い軌跡が得られているのに記録の過程で情報量が下がってしまう。高い精度のまま軌跡を記録するのであれば、巻き尺と方位磁石を使った方法が良い (Furman et al., 2011)。移動経路は、直線の長さや屈曲点の角度の2つの情報から構成される。巻き尺と方位磁石を使ってこの2つを記録することで軌跡を得ることが出来る。

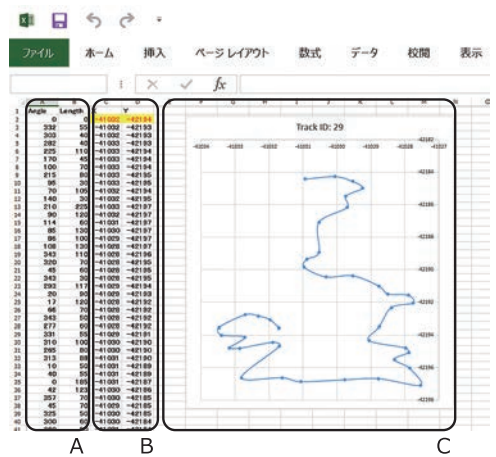


図3. データから軌跡を再現する。軌跡の直線長と屈曲点の角度から表計算ソフトを用いて軌跡を再現することが出来る。Aは実測データ、Bは実測データを基に算出した屈曲点の座標。Cは座標を用いて軌跡を描画したもの。

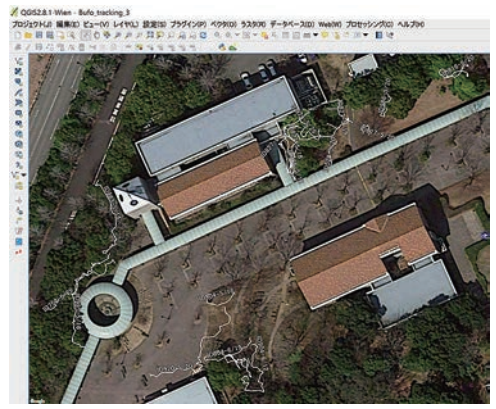


図4. GISソフトを用いて Google Map 上に複数個体の軌跡を投影したもの (Map data©2015 Google)。軌跡には個体番号と調査日を表示している。GISソフトを活用することで視覚的に軌跡を再現できるほか、地理情報と組み合わせて様々な解析に用いることが出来る。

今回の調査ではこの方法を採用した。ブラックライトで追跡した軌跡にカラープレーヤークョークで目印をつけて、昼間でも目視可能な状態にしたのち、昼間に再び調査地を訪れ、直線の長さや屈曲点の角度を記録した。記録したデータはこのまま解析に用いることもできるが、Excelなどの表計算ソフトを用いて視覚的に再現することもできる(図3)。また地理情報システム(GIS)と組み合わせることでより高度な解析を行うことが出来る。最近ではQGISなどフリーでオープンソースのソフトも利用できるようになったので活用すると良いだろう(<http://qgis.org/ja/site/>)。GPS受信機などで軌跡の開始地点の座標さえ記録すれば、GISソフトを用いて地図上に投影することができる(図4)。その際は、当然だが投影法には注意が必要だ。東京など関東地区では平面直角座標系の9系を使用すると良いだろう(朝日他, 2014)。

軌跡を用いてどのような解析を行うかであるが、先行研究では、行動圏の推定、移動距離の推定、環境利用、捕食リスクの評価など様々な研究に使われている(表1)。また、蛍光トラッキングで得られる軌跡は精度が高いので、バイオリギング分野で盛んな意思決定モデルの構築など数理モデリングにも活用できる。

結 び

私たちの見ていないところで野生生物たちがどのような目的のもと移動しているのか、生物の移動という現象は昔から多くの人々の関心を集めてきた。生物は移動のために移動するのではなく、そこには生存に関わる様々な生態的意味があるかもしれない。移動を明らかにすることは、生物たちの見ている世界に近づく一つの方法であろう。その一方で移動パターンだけを明らかにし、知的好奇心を満たそうという研究は、学問的ではないと批判されることも多い。しかし、最近では様々な

解析手法が登場し、より詳細に移動の持つ意味を扱うことが出来るようになり、移動に関するトピックスは生態学において大きな意味を持つようになってきた。かつての記述的な研究の枠を超えて、表現型の1つとして移動を包括的に理解しようという試みは、行動生態学、進化学、疫学など様々な分野で大きな貢献を果たす可能性があるという(依田, 2012)。両生爬虫類をはじめとする小型動物は、他の大型哺乳類や鳥類などと比較して、移動に関する研究はまだ少ない。それは裏を返せば新たな発見が数多く眠っているということでもある。蛍光トラッキングはアイデアや工夫次第で様々な調査に応用が可能だと考える。この小文を参考に蛍光トラッキングを活用した調査研究を行っていただき、新たな発見が生まれることを期待している。なお、今回の研究成果は別の機会に改めて報告する予定である。

蛍光顔料の入手先

日本で入手可能な蛍光顔料の販売先を挙げておく(2015年10月現在)。今回の調査で用いた蛍光顔料は日本蛍光化学株式会社製のものであり、下記の代理店を通じて購入することが出来る。この製品を選んだ理由としては製造が日本メーカーであり、使用に関する問い合わせを円滑に行うことが出来ると判断したためである。先行研究で主に用いられているのはフロリダ州オーランドのDay Glo Color社が製造しているものであり(Furman et al., 2011; Williams et al., 2014など)、これも下記の代理店を通じて購入出来るが個人向けの小売り対応はしていない。

- 日本蛍光化学株式会社
販売代理店：征興塗料
(<http://www.paint-works.net/>)
- Day Glo Color社 (<http://www.dayglo.com/>)
販売代理店：エア・ブラウン株式会社
(<http://www.arbrown.com/>)

謝 辞

本文の執筆にあたり、学名の校閲をしていただいた首都大学東京大学院理工学研究科動物生態学研究室の菅原弘貴氏、蛍光トラッキングに関する助言をいただいた村上勇樹氏、調査に協力していただいた橋本晃生氏、松本翔一氏、三浦智世氏、同研究科動物系統分類学研究室の久留島宏明氏、植物系統分類学研究室の中嶋玲菜氏、環境微生物学研究室の西原亜理沙氏に併せてお礼申し上げます。

引用文献

- 朝日孝輔・大友翔一・水谷貴行・山手規裕.
2014. [オープンデータ+QGIS] 統計・防災・環境情報がひと目でわかる地図の作り方. 技術評論社, 東京. 240 p.
- Birchfield, G. L. and J. E. Deters. 2005. Movement paths of displaced northern green frogs (*Rana clamitans melanota*). Southeastern Naturalist 4: 63-76.
- Blankenship, E. L., T. W. Bryan, and S. P. Jacobsen. 1990. A method for tracking tortoises using fluorescent powder. Herpetological Review 21: 88-89.
- Butler, B. O. and T. E. Graham. 1993. Tracking hatchling Blanding's turtles with fluorescent pigments. Herpetological Review 24: 21-22.
- Corbalan, V. and G. Debandi. 2009. Evaluating microhabitat selection by *Calomys muscivorus* (Rodentia: Cricetidae) in western Argentina using luminous powders. Mastozoologia Neotropical 16: 205-210.
- Dodd, C. K. 1992. Fluorescent powder is only partially successful in tracking movements of the six-lined racerunner (*Cnemidophorus sexlineatus*). Florida Field Naturalist 20: 8-14.
- Eggert, C. 2002. Use of fluorescent pigments and implantable transmitters to track a fossorial toad (*Pelobates fuscus*). Herpetological Journal 12: 69-74.
- Fellers, G. M. and C. A. Drost. 1989. Fluorescent powder—a method for tracking reptiles. Herpetological Review 20: 91-92.
- Frantz, S. C. 1972. Fluorescent pigments for studying movements and home ranges of small mammals. Journal of Mammalogy 53: 218-223.
- Furman, B. L. S., B. R. Scheffers, and C. A. Paszkowski. 2011. The use of fluorescent powdered pigments as a tracking technique for snakes. Herpetological Conservation and Biology 6: 473-478.
- 古澤拓郎・大西健夫・近藤康久. 2011. フィールドワーカーのためのGPS・GIS入門. 古今書院, 東京. 120 p.
- Graeter, G. J. and B. B. Rothermel. 2007. The effectiveness of fluorescent powdered pigments as a tracking technique for amphibians. Herpetological Review 38: 162-166.
- Graeter, G. J., B. B. Rothermel, and J. W. Gibbons. 2008. Habitat selection and movement of pond-breeding amphibians in experimentally fragmented pine forests. Journal of Wildlife Management 72: 473-482.
- Halfpenny, J. C. 1992. Environmental impacts of powder tracking using fluorescent pigments. Journal of Mammalogy 73: 680-682.
- Hallworth, M. T. and P. P. Marra. 2015. Miniaturized GPS Tags Identify Non-breeding Territories of a Small Breeding Migratory Songbird. Scientific Reports 5: 11069; doi: 10.1038/srep11069.
- Hubbs, A. H., T. Karels, and R. Boonstra. 2000. Indices of population size for burrowing mammals. The Journal of Wildlife Management 64: 296-301.
- Johansson, T. S. K. 1959. Tracking honey bees in cotton fields with fluorescent pigments. Journal of Economic Entomology 52: 572-577.
- Keller, C. 1993. Use of fluorescent pigment for tortoise nest location. Herpetological Review 24: 140-141.
- 草野保. 2005. 両棲類の生態研究—両生類の繁殖移動を例として—. p.16-27. 松井正文 (編) これからの両棲類学. 裳華房, 東京.
- Lemen, C. and P. V. Freeman. 1985. Tracking mammals with fluorescent pigments: a new technique. Journal of Mammalogy 66: 134-136.
- Lindquist, E. D., S. A. Sapoznick, E. J. G. Rodriguez, P. B. Johantgen, and J. M. Criswell. 2007. Nocturnal position in the Panamanian golden frog, *Atelopus zeteki* (Anura, Bufonidae), with notes on fluorescent pigment tracking. Phyllomedusa 6: 37-44.
- 松井正文. 2003. 両生類の行動圏. p.157-170. 佐藤正孝・新里達也 (編) 野生生物保全技術. 海游社, 東京.

- McCay, T. S. 2000. Use of woody debris by cotton mice (*Peromyscus gossypinus*) in a southeastern pine forest. *Journal of Mammalogy* 81: 527-535.
- Mellor, D. J., N. J. Beausoleil, and K. J. Stafford. 2004. Marking Amphibians, Reptiles and Marine Mammals: Animal Welfare, Practicalities and Public Perceptions in New Zealand. New Zealand Department of Conservation, Wellington. 55 p.
- 日本バイオロギング研究会 (編). 2009. バイオロギング—最新科学で解明する動物生態学. 京都通信社, 京都. 224 p.
- Orlowski, S. A., K. L. Grayson, and W. A. Hopkins. 2009. The effects of fluorescent tracking powder on oxygen consumption in salamanders using either cutaneous or bimodal respiration. *Copeia* 2009: 623-627.
- Phinney, D. E. and S. B. Matthews. 1969. Field test of fluorescent pigment. *Transactions of the American Fisheries Society* 96: 157-162.
- Richards, S. J., U. Sinsch, and R. A. Alford. 1994. Radio Tracking. p. 155-158. In: W. R. Heyer, M. A. Donnelly, R. W. McDiarmid, L-A. C. Hayek, and M. S. Foster (eds.), *Measuring and Monitoring Biological Diversity: Standard Methods for Amphibians*. Smithsonian Institution Press, Washington.
- Rittenhouse, T. A. G., T. T. Altnether, and R. D. Semlitsch. 2006. Fluorescent powder pigments as a harmless tracking method for ambystomatids and ranids. *Herpetological Review* 37: 188-191.
- Roberts, A. M. and E. B. Liebgold. 2008. The effects of perceived mortality risk on habitat selection in a terrestrial salamander. *Behavioral Ecology* 19: 621-626.
- Roe, A.W. and K. L. Grayson. 2008. Terrestrial movements and habitat use of juvenile and emigrating adult Eastern Red-Spotted Newts, *Notophthalmus viridescens*. *Journal of Herpetology* 42: 22-30.
- Stapp, P., J. K. Young, S. Vandewoude, and B. V. Horne. 1994. An evaluation of the pathological effects of fluorescent powder on deer mice (*Peromyscus maniculatus*). *Journal of Mammalogy* 75: 704-709.
- Stark, R. C. and S. F. Fox. 2000. Use of fluorescent powder to track horned lizards. *Herpetological Review* 31: 230-231.
- Sujii, E. R., M. A. Garcia, and E. M. G. Fontes. 2000. Movements of migration and dispersion of adult spittlebugs. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 35: 471-480.
- Tuttle, S. E. and D. M. Carroll. 2005. Movements and behavior of hatchling Wood Turtles (*Glyptemys insculpta*). *Northeastern Naturalist* 12: 331-348.
- 渡辺佑基. 2014. ペンギンが教えてくれた物理のはなし. 河出書房新社, 東京. 256 p.
- Williams, S. T., S. D. Powell, T. A. Gorman, and C. A. Haas. 2014. Pioneering the utility of a mineral oil mixture for fluorescent powder tracking of salamanders. *Herpetological Review* 45: 20-22.
- Windmiller, B. 1996. Tracking techniques useful for field studies of anuran orientation and movement. *Herpetological Review* 27: 13-15.
- 依田憲. 2012. 移動・どこに住むか. p. 49-70. 日本生態学会 (編) 行動生態学. 共立出版, 東京.