

研究課題 「市民科学によるオープンデータを用いたグローバルな生物多様性の評価」 実施報告書

鈴木紀之（高知大学）

プロジェクトの背景

生物多様性への関心はグローバルに広がっている。わが国においても、2010年に名古屋で開催された国際会議（COP10）以降、一般市民や産業界をまきこんだ議論が活発である。その背景には、言うまでもなく、世界規模での生物多様性の劣化がある。

近年では、市民科学の広まりにより、生物多様性の研究は新たなステージへと発展している。市民科学とは、大学や博物館などの研究機関に所属する職業研究者だけでなく、一般市民（アマチュア科学者）が研究に参画する活動を指す。近年では特に、GPSが搭載されたスマホやデジカメの爆発的な普及により、さまざまな場所で撮影された生き物の写真が地理データとともに集積されてきた。その結果、市民科学の手によって、かつてない精度で生き物の生活史（季節や時間）や分布の情報が得られるようになり、市民が科学に貢献できるプラットフォームとして期待されている。

しかし、このような市民による生物調査のデータが生物多様性に関する最先端の研究に利用されることはほとんどない。そのため、市民は調査において明確な科学的貢献を意図しておらず、「市民科学」という本来の目的とは矛盾している。実際に、参加型の調査では市民のモチベーションの低下が問題となっており、生物のデータを収集する一部のサイトでは十分なデータが集まらずに機能していない。

そこで本研究では、市民参加型の生物調査を集計している国内外のウェブサイトのデータベースを駆使し、生物多様性の価値を定量的に評価することで、

市民参加型の生物調査に科学的な価値をもたらすことを目的とする。具体的には、ある生物の「種内に含まれる多様性」が、その種の繁栄にどのように貢献しているか検証した。多様性の高い種は、環境の変動にうまく適応したり、さまざまな資源（エサなど）を分け合いながら効率よく利用することができる。その結果として、多様性の高い種は、より多くの環境を利用し、より広い範囲に分布を拡大している可能性がある。本研究ではこの仮説を検証するため、特定の分類群ごとに「多様性のある種」と「多様性の低い種」に分けて、「分布の広さ」や「絶滅リスク」などを比較した。

多様性が集団におよぼすメリット：理論的な背景

「生物多様性は環境や人々の生活にとって良いことである」と信じている人は少なくない。さらに一般的には、組織や集団の中で多様性があったほうがよいと考えている人も多いだろう。近年では、「ダイバーシティ」という言葉がよく登場し、性別・国籍・人種などの多様性がチームワークにとって重要であることが指摘されている。しかし、生物多様性が本当に良いことなのか、だとしたら何にとって良いことなのか、どのようなメカニズムなのか、正確に説明できる生物学者は多くない。

たとえば、外来種は「人為的な生物多様性の追加」と捉えることができる。環境の中に、新たな種が加わるからである。しかし、外来種は在来の生態系のバランスを破壊し、結果として生物多様性を劣化させてしまうことがよく知られている。つまり、多様性を増やしたことが集団にとってマイナスになることを意味している。

生態学では、主に群集や生態系のしくみを扱う分野において、「種類の多さは群集の安定性や生態系の機能に貢献する」ことが示唆されている。その一方、本研究プロジェクトでは、「ある集団の中における個体ごとの違い」、すなわち「個性」の多様性に着目した。たとえ同じ種類の同じ地域の集団であっても、遺伝的な単一ではなく、したがって表現型（行動、形、大きさ、生理状態

など) に多様性がある。このような個体レベルでの変異が、集団全体にとってどのような利点があるのか検討していく。

多様性と集団のメリットの関係を明らかにするためには、まず多様性が維持されているメカニズムを理解する必要がある。一般に、「自然淘汰による進化」は、もっとも環境に適した遺伝型を後世に伝えていくメカニズムなので、やがては最適な遺伝型が集団全体に広がることになる。したがって、多様性は消失する。一方、自然淘汰とは対照的な進化のメカニズムである「遺伝的浮動 (genetic drift)」は、少なくとも短期的には最適でない遺伝型も集団中に維持しうる。ただし、長期的には「ほんの少しでも」有利な遺伝型がそうでない遺伝型を排除することになり、集団内の多様性が安定的に維持されることはない。

集団内の多様性、すなわち個性が安定的に維持されるためには、「負の頻度依存淘汰 (negative frequency dependent selection)」と呼ばれるメカニズムが必要である。これは、集団の中で少数派となる遺伝型ほど有利になる (適応度が高くなる) 現象である。

たとえば、捕食者から逃れるための隠蔽的な模様の場合、他の個体があまり採用していない模様、すなわち、少数派のタイプのほうが、捕食者から見つかりにくく、結果として生存できる可能性が高くなる。なぜなら、捕食者は探索像 (searching image) を形成し、よく見かけるタイプの模様をその後も集中して探索するようになるからである。

また、アオモンイトトンボでは、配偶行動に関連した負の頻度依存淘汰が知られている。アオモンイトトンボは、オスの体色は青色だが、メスには青色と赤色の2タイプが知られている。地域によって青色と赤色の頻度は異なっている。オスは、先天的にどちらのタイプのメスに好みがあるわけではない。そうではなく、初めに求愛をしたほうのタイプを次からも選択的に求愛することが明らかになっている。この仕組みでは、集団の中で頻度の多いタイプのほうが選択的に求愛されやすくなる。このとき、メスの立場としては、産卵のためには1回だけオスと交尾をすれば十分なので、オスの過剰な求愛は繁殖行動にとってコスト (時間の損失などの負担) になる。つまり、集団の中で多数派とな

っているタイプはオスからより過剰な求愛を受けることになり、対照的に少数派のタイプはオスからの過剰な求愛を避け、採餌や産卵をはじめとした繁殖活動に集中できることになる。結果として、少数派のタイプが有利になり、集団の中で多様性が維持されることになる。

以上が、負の頻度依存淘汰によって遺伝型が維持されるメカニズムの説明である。隠蔽色やアオモンイトトンボの体色のように、遺伝多型

(polymorphism)の研究では古くから色彩多型(color polymorphism)が対象になってきた。目で見て理解しやすく、研究が発展しやすかったからである。本プロジェクトでも、さまざまな動物・昆虫の色彩多型に着目し、解析を進めた。

それでは、負の頻度依存淘汰によって維持されている多様性は、集団にとってどのようなメリットにつながるのだろうか。ここで重要な視点は、多様性のある集団と、多様性のない集団の比較である。思考実験として、集団aでは赤色が70%、青色が30%、集団bでは赤色が100%、青色が0%で含まれているとする。集団aが多様性のある集団、集団bが多様性のない集団、ということになる。集団aでは、赤色が多数派、青色が少数派である。負の頻度依存淘汰によって色彩多型が維持されている場合、少数派である青色が有利になって、多数派である赤色が不利になる。しかし、集団aの赤色(70%)と集団bの赤色(100%)を比較してみると、前者の頻度のほうが低いことになる。したがって、有利さを比較すると、集団aの青色>集団aの赤色>集団bの赤色、の順になる。すなわち、集団aの赤色は集団aの中では多数派になるが、それでも集団bの赤色よりは有利であるといえる。言い換えると、負の頻度依存淘汰で多型が維持されていれば、少数派だけでなく、多数派のタイプも多様性の利益を享受できることになる。結果として、多様性のある集団は、多様性のない集団と比べて、集団の増殖率が高くなることが期待される。

多様性が維持され、集団の増殖率が高くなれば、集団は安定的に世代をくり返すだろう。また、結果として分布を拡大し、さまざまな生息環境に進出するだろう。以上のように、少数派が有利となり維持されている集団内の個性は、

集団の生産性を高め、分布の広さや生息環境の多様さといった集団の生態的特徴にも波及することが期待される。本研究プロジェクトでは、研究の背景で述べた市民科学データを駆使し、この仮説を検証する。

研究の方法

市民参加型の生物調査を取りまとめるサイトとして、「iNaturalist」がある。これらのサイトは英語で運営されており、今のところアメリカとイギリスからの参加者が多いものの、世界中の市民からのデータが増え続けている。これらのサイトでは、撮影または採集された生物の写真とその日時と場所が登録されている。また、公的機関としては「Global Biodiversity Information Facility

(GBIF)」が博物館の標本や科学調査のデータなどを元にして生物の記録を集積している。さらに、希少種（絶滅に瀕している種類）に限れば、国際自然保護連合（IUCN）による「Red List」も網羅的である。これらのデータベースはウェブで公開されており、自由に科学研究に利用できる。そのため、これらのデータを一括して抽出し、それぞれの種類の分布や出現時期を把握した。

特に、色彩多型についてのデータが豊富なイトトンボの仲間、脊椎動物（哺乳類、鳥類、爬虫類、両生類、魚類）を対象としてデータの抽出と解析を行なった。また、レッドリストを参照に、色彩多型のある種類とない種類で絶滅リスクの程度を比較した。レッドリストでは、Threatened（絶滅危惧種）、Endangered（危機種）、Vulnerable（危急種）、Least concern（低懸念種）といったカテゴリーに分かれている。これらのカテゴリーに属する種類の割合を統計的に比較した。

また、私が先行研究で行なったモンキチョウを対象にした結果も比較として用いた。この解析では、市民科学による分布データではなく、専門の図鑑に掲載されているそれぞれの種類の分布地図をGIS（地理情報システム）上にポリゴンで記載し、分布範囲を計算した。また、生息環境の複雑さの指標として、分布域に含まれるケッペン気候区の数のカウントした。色彩多型については、

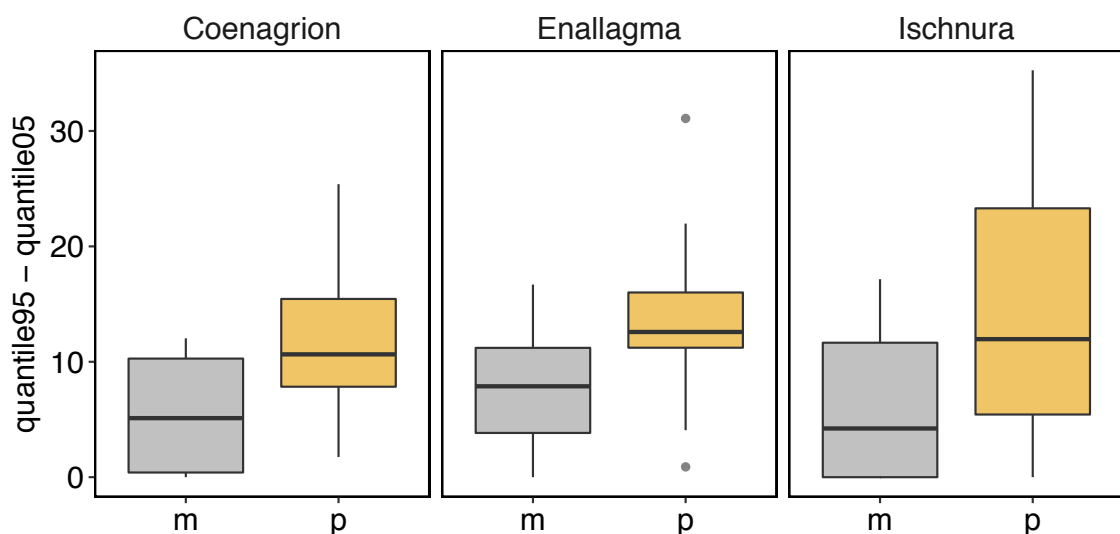
図鑑に掲載されている標本写真から判断した。地域ごとの色彩の違い（地理的変異）ではなく、地域内の色彩の多様性のみをピックアップし、「多型のある種」とした。

データの処理、統計解析、グラフ化にはRを用いた。

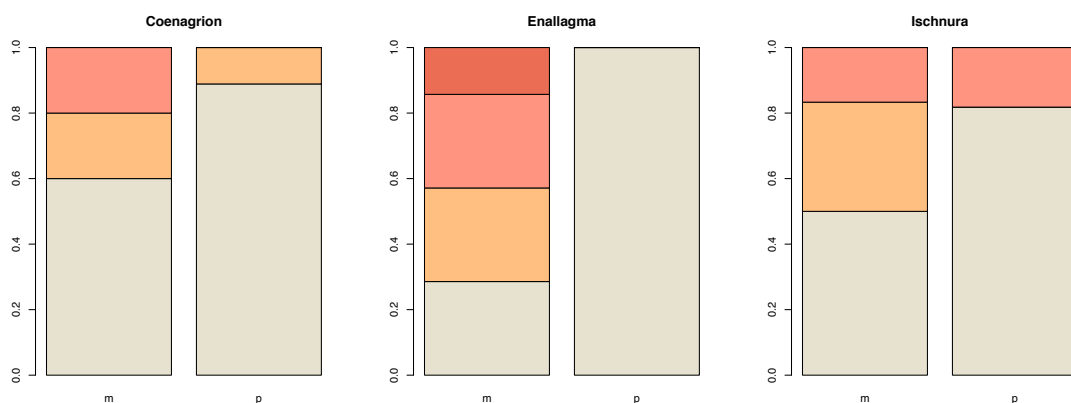
結果

イトトンボの仲間では、対象とした3つの属（genus）において、すべて「多様性のある種のほうが多様性のない種よりも分布域が広い」という傾向が見られた。これらのパターンは、脊椎動物（鳥類、哺乳類、両生類、爬虫類）でも一貫して観察された。これは、私によるチョウ類を対象にした先行研究の結果とも一致している。そのため、生態学的に普遍的な傾向であることが示唆された。

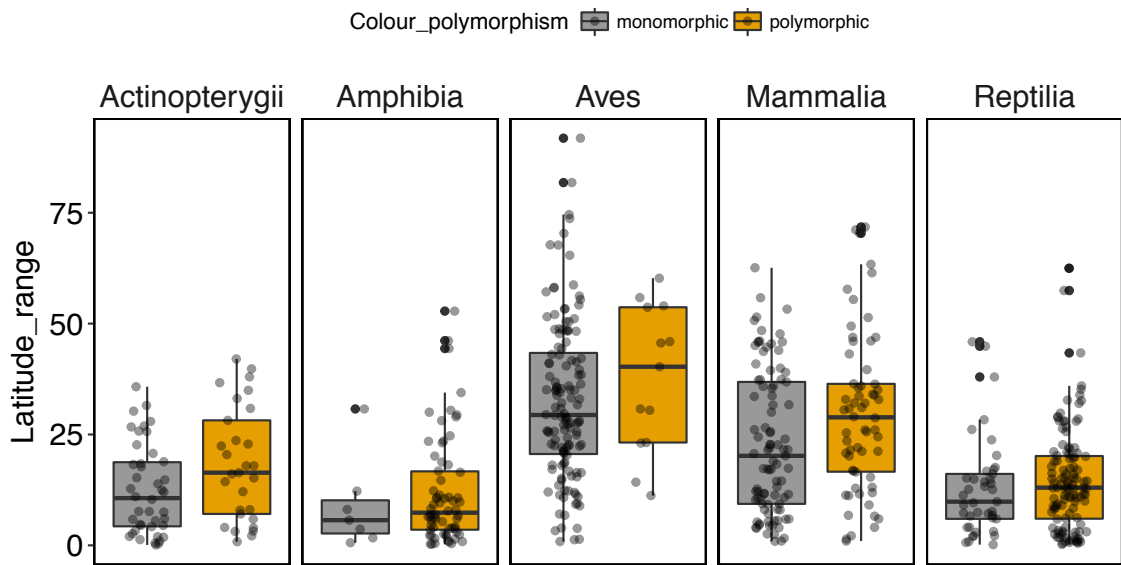
また、イトトンボの仲間ではレッドリストに掲載されている種類が多かったので、多様性のある種と多様性のない種で絶滅リスク（レッドリストのカテゴリー）を比較した。その結果、絶滅リスクの高い種はほとんど多様性のない（成虫の体色に個体変異がない）単型種であったのに対し、多型種のほとんどは絶滅リスクのないいわゆる「普通種」であることが分かった。



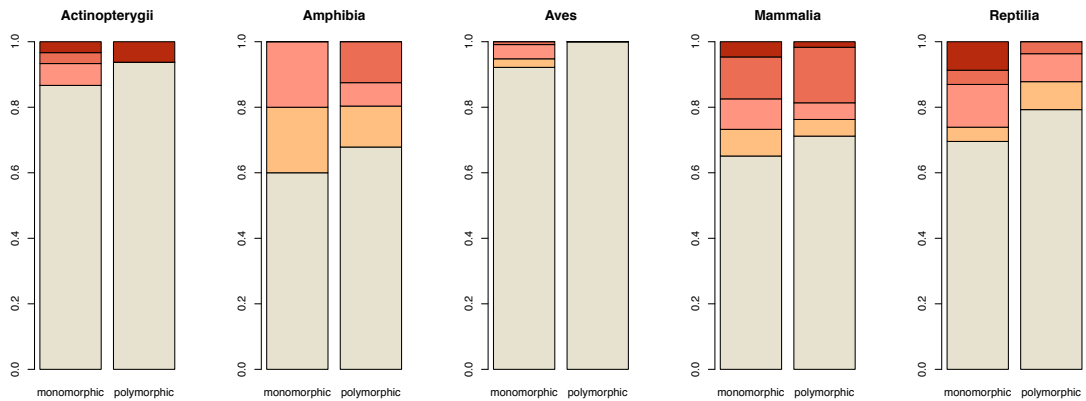
イトトンボ類における色彩多型の有無と分布の広さの関係。 *Coenagrion* 属、*Enallagma* 属、*Ischnura* 属に分けて解析した。いずれも m が単型種（多様性なし）、p が多型種（多様性あり）を示す。どの属においても、多型種のほうが単型種よりも統計的に有意に分布が広がった。鈴木・高橋未発表データ（以下同様）。



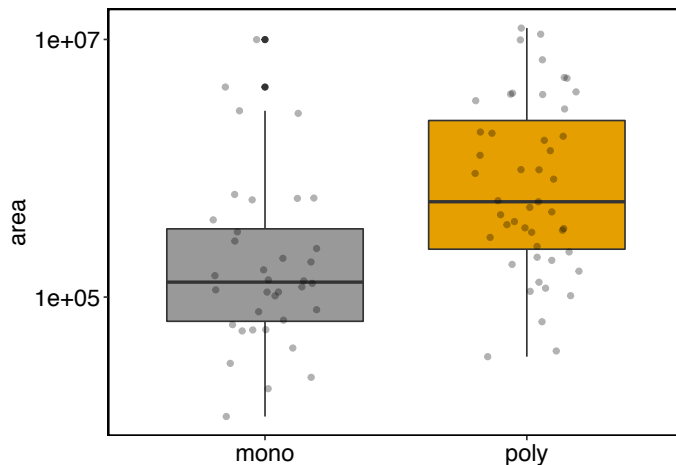
イトトンボ類における色彩多型の有無と絶滅リスクの関係。 *Coenagrion* 属、*Enallagma* 属、*Ischnura* 属に分けて解析した。いずれも m が単型種（多様性なし）、p が多型種（多様性あり）を示す。色が赤いほど絶滅リスクが高いことを示す。薄い茶色は Least Concern（現状では絶滅のおそれのない種）を示す。どの属においても、単型種には絶滅リスクの高い種が多く含まれており、対比的に多型種ではほとんど絶滅リスクのない種だった。



脊椎動物（魚類、両生類、鳥類、哺乳類、爬虫類）における色彩多型の有無と分布の広さの関係。箱ひげ図と実際のデータ点がドットで示してある。分布の広さの指標として、緯度の幅（最大値と最小値の差）を用いた。いずれのグループにおいても、



脊椎動物（魚類、両生類、鳥類、哺乳類、爬虫類）における色彩多型の有無と絶滅リスクの関係。色が赤いほど絶滅リスクが高いことを示す。薄い茶色は Least Concern（現状では絶滅のおそれのない種）を示す。どの属においても、単型種には絶滅リスクの高い種が多く含まれる傾向があった。



モンキチョウ属 *Colias* における色彩多型の有無と分布の広さの関係。mono が単型種（多様性なし）、poly が多型種（多様性あり）を示す。分布面積は対数で表示してある（単位は km²）。多型種のほうが単型種よりも統計的に有意に分布が広がった。

考察

一連の解析から、ほとんどすべての分類群において、色彩多型のある種類はない種類よりも分布の範囲が広く、絶滅リスクが低いことが分かった。これらのデータは一般市民が提供した分布や時期に関する情報を元に集計されたものであり、市民科学の取り組みが生物多様性科学に貢献していることを意味している。職業研究者が自らデータを取得し、解析し、発表するという従来の研究アプローチとは異なり、市民科学データが集積されたサイトを活用することで、かつてないほど精度の高いデータを解析することができた。

市民科学によるデータを用いる際に注意すべき点は、データの質や精度である。生物の分布データの場合、もっとも問題になるのが種名の同定である。

（標本ではなく）写真しか情報が残っていない場合、正確に生物を同定するのは難しい場合も多い。しかし、この問題点を以下の2つの方法で克服した。まず1つ目は、専門家によるチェックである。iNaturalist では、一般市民により投稿された画像や情報に関して、専門家が事後的に確認することにより、「お

墨付き」を与える仕組みになっている。これによって、同定の信頼性は大幅に向上している。2つ目は、今回の解析では、分布情報の生データではなく、要約した情報量を用いた。具体的には、それぞれの種の分布地点の緯度の最大値と最小値の差を計算し、その種が生息できる緯度の範囲を分布域の指標にした。

ただし、上記のような対処をしても、種の分布面積を有効に評価しにくい場合がある。たとえば、温帯に分布する種が、稀に寒帯で記録されることもある。このようなとき、同定ミスなのか、偶然に飛来して記録されたものなのか、なかなか判断が難しい。いずれにせよ、ごく稀に記録されたデータ地点はその種の通常の生息状況を反映しているとは言いにくいし、緯度範囲の解析では少数の外れ値のデータが大きな影響を与えてしまうことになる。したがって、このようなバイアスを考慮するために、緯度範囲の標準偏差や四分位点を種間で比較した（イトトンボなど）。このような手法は他の研究でも応用できし、市民科学データの不確実性に対処するときの有効な手段となるだろう。

本研究で解析したイトトンボや脊椎動物での結果は、先行研究によるモンキチョウの結果を支持するものであった。すなわち、くり返しになるが、多型のある種はない種よりも分布範囲が広く、さまざまな気候環境に生息していることが分かった。モンキチョウの分布データは、専門家が作成した分布地図をもとに地理情報システム（フリーソフトの QGIS）で解析したものである。このようなデータセットと市民科学に由来するデータセットで同じような傾向が出たことから、生態学における市民科学データの有効性が示唆される。

本研究の成果は、日本国内にとどまらず、海外で得られたデータにアクセスし、グローバルな解析もできることを示した。ただし、十分な生物情報があるのは北米やヨーロッパなど一部の国々、そしてトンボや脊椎動物といった一部の目立つ分類群に限定されている。今後は、地域・分類群ともに生物情報が拡大し、生態学的ビッグデータを扱える時代となることが期待される。