

新種サドガエル —その誕生と進化の謎—

三浦 郁夫

近頃、ささやかなアンチエイジング対策として、日本一広大なキャンパス内を15分歩いて通勤している。7-8月になると、林の中の小川に隣接した遊歩道で、ときどきハンミョウが現れて道を遮る。その美しさにいつも目を奪われ、心惹かれる。この出会いが楽しみの一つであるが、その度に、ものごとの外観の美しさは、それ自体がすばらしい特質であると感じる。しかし、世の中、見た目がすべてを凌駕するとは限らない。“美しいバラには刺がある”し、“残り物には福がある”。むしろ、外見が賞賛の対象にならないものにこそ、実は卓越した長所が潜んでいることが案外多い。2012年12月7日は、佐渡島で発見されたサドガエル (*Rugosa susurra*) が正式に命名された記念すべき日である。分類学雑誌 *Zootaxa* に命名者・尾形光昭らの労作となる記載論文が掲載された¹⁾。このサドガエルは、我が国の主要3島に広く生息するツチガエル (*Rugosa rugosa*) から派生し、佐渡島で特殊に進化したカエルである(図1)。サドガエルを語るにはまず、ツチガエルを語らなければならない。このカエル、見かけはけっして美しいとは言えないが、実は生物学分野において、世界でもっとも有名な日本のカエルである。



図1. 水中に潜むサドガエル (撮影: 学校法人 新潟総合学院 伝統文化と環境福祉の専門学校)

ツチガエル

背中が土色、数ミリの縦長の突起(イボ)がたくさん並び、お腹はうす褐色の上にうす黒い斑点がある。体全体が様に地味な色であって、お世辞にも美しいとはいえない。繁殖期に雄がギュー、ギューと鳴いて雌を呼ぶが、この声もけっして心地よい響きではない。さらに、手で触ると鼻を突く特有のにおいがする。まずもって、人に好まれそうな要素がほとんどないのがツチガエルである。一般にはイボガエルとか、広島や鳥取ではクソガエルという究極の名前がつく。先日、東広島市の老人大学で講演した際、この呼び名の確証を得た。広島弁で言えば、「そうそう、こりゃあ、クソガエルよねえ〜」となる。たしかに、田の畦や畑にちょこんと鎮座していれば、馬糞か牛糞に見えなくもない。こういう理由からか、子供たちの成長に不可欠な、無邪気で残酷な遊びの対象になったのはこのカエルが一番多いと思う。さらに、見た目というのは、科学研究においても影響は甚大である。32年前になるが、弘前大学生物学科の斎藤和夫研究室ではカエルの染色体が調べられた。最初に手をつけられたのは緑色が鮮やかで美しいモリアオガエルやアマガエルであり、最後まで誰も調べなかったのがこのツチガエルであった。その残り物に手をつけたのは私の同級生、菊池宏明であるが、その結果、カエルでは非常に珍しく、性染色体(ZZ/ZW型)の形が進化していたのである。この特徴は、カエル全体の4%に過ぎないから、まさしく残り物には福があった。

しかも、ツチガエルの驚くべき特長は、日本全体の地域集団の構成にあった。現在、性染色体と性決定機構のちがいに基づくと、この種は5つの地域グループに大別される²⁾。そのうち、3つのグループはヒトと同様、XX/XY型の性決定機構をもつが、のこり2つはトリと同様、ZZ/ZW型である。1種内に異なる2つの性決定機構を備える生物は、世界広しと言えどもこのカエルだけである。性決定機構の多様性と進化の仕組みを調べる上で、これほど優れた生物はいない。学術的に飛び抜けて

著者紹介 広島大学大学院理学研究科両生類研究施設(准教授) E-mail: imiura@hiroshima-u.ac.jp

生物材料インデックス

貴重なカエルがこの日本の至る所でふつうに暮らしている。なんとも贅沢な話であるが、ここに見かけの悪さが幸いしたことは間違いない。しかも、佐渡島という小さな島に、このカエルから進化した新種が潜んでいるなどと、いったい誰が想像できたであろうか。

サドガエル

最初の情報と最悪のシナリオ

1999年、新潟大学理学部教員の関谷國男さんから連絡が入った。佐渡島にどうも奇妙なカエルが住んでいる。ツチガエルのようなけれども、そうでもない。よくわからないから、一度見てくれないか、というのである。彼が最初に気づいたのは1997年春のことらしい。私がツチガエルを研究していることを知って、連絡をくれたのだと思う。早速送ってもらった写真を見ると、背中模様や色は確かにツチガエルである。ところが、そのお腹はとても鮮やかな黄色であった。国内のツチガエルとはまるで違うが、すぐ私の頭にすぐ浮かんだのは、実は朝鮮半島のツチガエルであった。1996年、私は当施設先輩の大谷浩己さんと韓国を採集で訪れ、向こうのツチガエルを手にしてきた。そのお腹がまさに黄色だったのである。それゆえ、最悪のシナリオが頭をよぎった。佐渡島に密かに漂着した北朝鮮の工作船が偶然にも半島のツチガエルを運び、それが繁殖し定着したのではないか。もしそうならば、学術的価値はゼロとなる。

起源と進化

ツチガエルの分布は、日本の本州、四国、九州と近隣離島、そして、朝鮮半島と中国東北部に渡る。北朝鮮にも生息するらしい。かつて、そこに隣接したロシアでも報告があったが、以降確認されていない。ツチガエルはまさに環日本海の分布を示し、アメリカを加えれば、丁度6カ国協議のメンバー国となる。現在、中国東北部と朝鮮半島のツチガエルは、別種 *Rugosa emeljanovi* として扱われているので³⁾、厳密には、ツチガエル *Rugosa rugosa* と呼ばれるカエルは日本だけの分布となる。

さて佐渡島で見つかった「黄腹」は朝鮮半島の *R. emeljanovi* に由来するのか、それともツチガエルに由来するのか。ツチガエルならば、やはり対岸の新潟地方なのか。まず染色体を調べた。ツチガエルの染色体数は26本（13対）で、第7番目の形によって5つのグループを識別できる。調べた結果、「黄腹」は新潟とは異なり、関東（東日本）グループや *R. emeljanovi* と同一の形を示した。この型はいわゆる、元祖型であり、ツチガエル進化の初期集団の名残を示す。嫌なシナリオの一つが

残ったわけである。しかし、ミトコンドリアの遺伝子を調べたところ、関東グループと遺伝子配列がもっとも近く、*R. emeljanovi* とは相同性がもっとも低いことから、むしろ朝鮮半島とは遠縁であることがわかった。結論は、関東地方のツチガエル由来ということになる。対岸の新潟地方の頭を飛び越えて関東地方に由来するというのも意外に聞こえるが、実は、これまで私たちが提唱した仮説とうまく一致する。まさに願ってもない結果であった。

ツチガエルの進化過程は図2のようになる⁴⁾。日本にもっとも古くに侵入した集団の末裔は現在の関東（東日本）集団と推測される。その起源はまだ特定されていないが、中国対岸の浙江省や安徽省に生息する近縁種 *Rugosa tientaiensis* が候補である。その後、朝鮮半島から別の集団が移入してきた。これが現在の西日本集団となる。よって、当初、日本には東西2つの集団が存在した（図2A）。このとき、東日本集団は日本海側にも広く

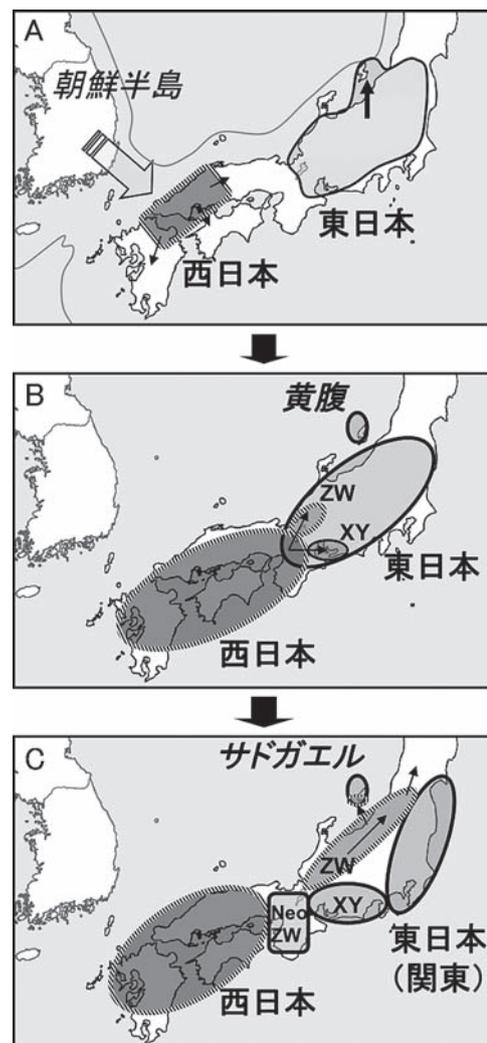


図2. ツチガエルの系統進化仮説

分布していたであろうと私たちは推測していた。そしてその時期に、今の佐渡島の領域へ一部が取り残され、島として本州から分離されて行ったにちがいない。その後、東西集団が日本中央部で交雑した結果、新たに2つの集団、ZWとXYを生み出し、それぞれが分布を広げて4つとなった(図2B)。とくにZW集団は日本海側で分布を北に広げた結果、佐渡と関東を分離した形になる。さらにXYの西側の集団は西日本と再交雑した結果、Neo-ZWへと進化し、現在の5つのグループを形成したわけである(図2C)。この筋書きに従うと、「黄腹」の由来が関東にあり、その後ZWによって分布が分断された理由がうまく説明できる。佐渡島に取り残された集団はその後、サドガエルへの進化を突っ走った。

新種の基準

佐渡島の「黄腹」は外部形態に明確な違いがある。黄色いお腹、全体的にすべすべした肌、鳴囊の欠如、そして、あごの下の黒斑の欠如(図3)。主要3島のツチガエルはこの点、青森から鹿児島までどの集団を取ってもお互いの区別はつかない。この外部形態の違いが新種として記載できると判断した大きな理由である。リンネの記載分類⁵⁾(1758年)以来、外部形態の違いというのは分類学ではもっとも重要な判断要素である。さらに、ミトコンドリア遺伝子の違いも明確である。もっとも近縁なツチガエルとの間で約4%の違いがある。これは他種のカエルではすでに別種の域に入る。種の定義にはいろいろな解釈があって、生物によって摘要される概念は異なる。その中で比較的支持されているのは、エルンスト・メイヤーの生物学的種概念(1942年)である⁶⁾。「種とは遺伝子プールであり、その中ではお互いに交配可能であるが、他とは交配ができない個体群の集まり」となる。お互いの交配を防ぐ仕組みには大きく2つあって、一つは生殖前隔離。たとえば、繁殖期や場所、行動や生

殖器の構造の違いなどである。もうひとつは、生殖後隔離であり、受精拒否、雑種致死、雑種不妊などがある。「黄腹」について、この仕組みを詳しく調べる必要があると判断した。しかし、後者の実験を野生ガエルで実践することは実はとてもむずかしい。人工交配の技術もさることながら、変態後の小さな子ガエル数百匹を飼育し成長させなければいけない。この実験が可能な技術と設備を有する施設は世界でただ一か所、広島大学に限られる。裏を返せば、このアプローチは他者の誰にも真似はできないことになる。

まず、鳴き声は大きく異なる。「黄腹」は佐渡島の中央部に生息し、南部には新潟から侵入したツチガエルが住んでいる。両者は鳴き声の違いによって、お互いを隔離しているのかもしれない。鳴き声は、カエルの種を分ける重要な判断材料の一つとなる。次に、ツチガエルと交配後の状態を調べるため、大谷さんが大掛かりな人為交配を行った。その結果、雑種はほぼすべて雄となり、ほんのわずかに未発達な卵巣をもつ雌が出現した。雄の精巣には精子の数が極端に少なく、交配しても、変態まで残る幼生はほとんどいなかった。以上の結果から、仮に交配したとしても、まず雑種が雄ばかりであるから、雑種同士が繁殖して独立の集団を形成することはない。いずれかの種に吸収される運命であることがわかった⁷⁾。

これらの研究結果を3篇の論文に3部作としてまとめ^{1,4,7)}、最後のサドガエルの記載論文が公開されたのが、昨年暮れの12月7日である。種名のラテン語susurraはwhisper(ささやく)を意味する。春から夏にかけて、佐渡島ではアマガエルとモリアオガエルの声が響き渡る。それを背景に鳴くサドガエルの声はまさに、「ささやく」に聞こえるという尾形の着想である。佐渡の風景を彷彿とさせるなんとも叙情的な名前ではないか。

新しく浮上した進化の謎

まずは、お腹の黄色が謎である。朝鮮半島や中国東北部の*R. emeljanovi*もお腹が黄色い。この黄色が意味する生物学的理由とは何なのだろうか。両者に共通する行動や生態の要因があって、その結果の収斂形質なのか。それともお互いに保存された祖先の残留形質なのか。卵から飼育した個体では、*R. emeljanovi*の黄色はほとんど出てこないが、サドガエルでは比較的再現される。この場合、餌はほうれん草とコオロギだけなので、黄色の要素がカロテノイドとした場合、餌依存の程度が両者で異なる可能性がある。しかし、この答えはまだわからない。

もうひとつは、佐渡島固有種という点にある。今後、脊椎動物で他の固有種が見つかる可能性は残されている



図3. サドガエルの形態学的特徴

生物材料インデックス

る。しかし、今のところ唯一の固有種である。これまで知られている佐渡島の生物は、対岸の本州とほとんど大差がなく、いわゆる新しく移入した種ばかりであった。島は20万年～80万年前に分離したと言われ、この年月は固有種を生み出すには十分な時間である。それにも関わらず、である。それゆえ、生物地理学的関心はきわめて薄かった。しかし、今回の発見によって、実は当初から生き残って独自に進化した固有種の存在が明らかになったのである。ここに、従来の固定概念は覆された。そこで新たな疑問であるが、ではなぜツチガエルだけが生き残ってサドガエルへと進化できたのか。当時、他にも多くの脊椎動物が島に取り残されたはずである。彼らはなぜ生き延びられなかったのであろうか。

ひとつ興味深い事実がある。佐渡島に生息する両生類は現在8種。そのうち3種に共通の特徴がある。新潟にはモリアオガエルとシュレーゲルアオガエルの2種が生息するが、佐渡ではモリアオのみ。同様に、ヤマアカガエルとニホンアカガエルのうち、佐渡ではヤマアカだけである。この2種同士はいずれも姉妹種であるが、佐渡に住む種はどちらかといえば、山地適応型である。有尾類ではクロサンショウウオが佐渡に住むが、新潟にはトウホクもいる。やはりクロの方が山地適応型である。このように、本州から移入したのであればそれぞれ2種類が揃って移動したはずであり、むしろ平地適応型の方が移動できた可能性は高い。しかし、残っているのは山地適応型である。なぜか。一つの推測ではあるが、佐渡島は分離後かなりの部分が何度か海水に浸かったことがあるのではないだろうか。だから、高地に逃れた種だけが生き残っているのかもしれない。では、サドガエルはどうか。そもそも原種のツチガエルは平地にも高地にも適応できる万能型である。以前、淡路島で採集した際、平地はすべてアマガエルとヌマガエルに占められていた。そこで、車で山をどんどん駆け上り、いよいよ溪流にたどり着いた所で初めてツチガエルの繁殖を確認したことがある。そこは本来、溪流に適応したカジカガエルしか見つからないような山の環境である。さらにツチガエルは、幼生で越冬できる唯一の国産種である。仮に環境変化の影響で成体が死滅したとしても、残った幼生がやがて変態して次の世代をつなぐという離れ業が可能である。このような特徴がツチガエルだけを佐渡島に残し、サドガエルへの進化を可能にしたのかもしれない。いず

れにせよ、この固有種としてのサドガエルの発見を契機に、佐渡島の地質学的歴史がこれまでとは異なる視点から見直され、調査され、そして、そこから新しい発見がもたらされることを期待したい。

おわりに

長い年月、ツチガエルを研究してきたが、まさかそこから進化した新種に巡り会うとは予想だにできなかった。地道に、そして愚直に仕事を続けていると、たまには神様もうれしい計らいをしてくれるものである。ただし、サドガエルの最初の情報を得てから新種記載まで、13年を要した。今の時代、これでは通用しない。特に若い大学教員ほど任期制が敷かれ、短いスパンで成果が求められる。しかも、人の役に立つ応用研究の方が賞賛される。この点、私は実に幸せな研究環境に置かれてきたと思うが、それならばと、現在、30年来の研究に取り組んでいる。できればその成果を世に出して、研究生生活に幕を下ろしたい。流行を追うのは楽ではあるが、どことなく空しく、何よりも退屈である。流行からは次の流行は生まれてこない。常に、世の中に別の視点を提供できる仕事が新しい流れを作っていくからである。そこに長い年月と苦難が伴うのは致し方ない。この部分をどれだけ許容できるか、それが大学や国の懐の深さを計る目安となり、将来を決定して行く大事な部分だと思う。サドガエルがそうであったように、わずかな希望と期待をそこに残したい。もちろん、生き残る方にも、独自の工夫と、したたかさと、そして何よりしぶとさが必要である。

文 献

- 1) Sekiya, K. *et al.*: *Zootaxa*, **3575**, 49 (2012).
- 2) Miura, I.: *Sexual development*, **1**(6), 323 (2007).
- 3) Fei, L. *et al.*: *An illustrated key to Chinese amphibians*, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chongqing (2005).
- 4) Sekiya, K. *et al.*: *Current Herpetology*, **29**(2), 69 (2010).
- 5) Linnaeus, C.: (in Latin) *Systema naturae per regna tria naturae :secundum classes, ordines, genera, species, cum characteribus, differentiis, synonymis, locis* (10th edition ed.), Laurentius Salvius, Stockholm (1758).
- 6) Mayer, E.: *Systematics and the origin of species*, Columbia University Press, New York (1942).
- 7) Ohtani, H. *et al.*: *Journal of Herpetology*, **46**(3), 325 (2012).