

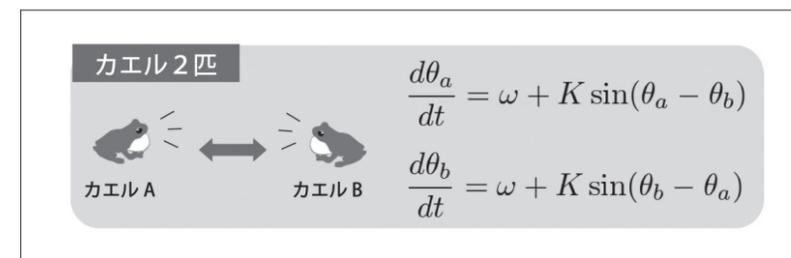
“カエルの合唱”の法則性を数理モデルを使って解明

—合原先生は、ニホンアマガエルの研究を実験だけではなく「数理モデルを使って動物行動の法則性を解明する」という非常にユニークなアプローチから行われています。まずは研究内容について教えて頂けますでしょうか？

合原 「ニホンアマガエルの合唱の法則性」という研究で、カエルがどのようなパターンで鳴くのか「数理モデル」を用いて法則性を研究したものです。

子供の頃からカエルは好きでしたが趣味としてしか思っておらず、専門は物理学を専攻していました。それがある時、カエルの鳴き声にパターンがあるのではないか・・・？とふと気づいて、自分の行っていた研究手法から分析していったのです。そして発見したのが「カエルは同時に鳴いているように聞こえたのだが、実は近くのカエル同士は鳴き声をずらして鳴いていた」という行動でした。

最初は「同時に鳴いていないか？」という仮説のもとで実験を進めたので、失敗したと思ったのですが、カエル同士が交互に鳴いていることが分かった時にふと振り返ってみたのです。「交互に鳴くためにもお互いにタイミングをあわせる必要がある、ということは何か法則があるのではないか？」ということでさらに調べていくと、野外でも近くのカエルが交互に鳴く法則性があることを解明できました。



カエルの逆相同期の数理モデル(位相振動子モデル)

多数の個体がりズムを揃えて振る舞うのを同期現象というのですが、どうやって同期現象が起きるのかを物理の手法を使って研究する、並行してカエルがどうやってコミュニケーションしているのかを実験的に調べ、背景にどうい機構があるのかを明らかにしていく、それを通してカエルが工夫していることを理解していくというのが、研究の全体像になります。

—“カエルの合唱”とも言いますが、実は声を揃えていたわけではなく、ずらしていたわけですね。そもそも、カエルは何か目的があって鳴いているのでしょうか？

合原 最も大きな意味合いは求愛のためです。カエルは夜行性の生物なので、暗闇の中でオスとメスが会う必要があります、そのためにオスは鳴くことでメスに存在を知らせています。つまり鳴くことでオスとメスが出会う機会を作っているのです。

—ということは、鳴くのはオスだけなのでしょうか？

合原 特殊な種類ではメスが鳴くカエルもありますが、基本的にオスだけです。そしてカエルの繁殖地

は水が豊富な田んぼや池など、ある程度場所が限定されるため、一カ所に多くの個体が集まります。するとオスの間でメスを獲得するための競争が起きるので、オスは自分の存在を主張するために鳴き声を使うわけです。ですオスとメスが出会ってペアになるとオスはもう鳴きません。また、ペアになったカエルを離すとオスは再び鳴き始めます。その鳴き声を調べていくと、カエルは鼓膜があるので他の個体の鳴き声を認識し、1つ1つの個体が近くにいる他のオスが鳴いている声を意識して鳴くタイミングをずらす行動をしていることが分かりました。

—このカエルの研究には、何か先行研究があったのでしょうか。それとも鳴き声の計測方法や数理モデルは、先生のオリジナルなのでしょうか？

合原 カエルの鳴き声という意味では先行研究がたくさんありますが、野外で鳴き声を高精度で計測したり、数理モデルを使って法則を調べたりというのはオリジナルです。

きっかけは京都大学の学部生の時に所属していた野生生物研究会というサークルでの旅行でした。

生物のかしこに学ぶ “カエルの合唱法則”を解明

科学の萌芽 06

筑波大学 システム情報系 助教

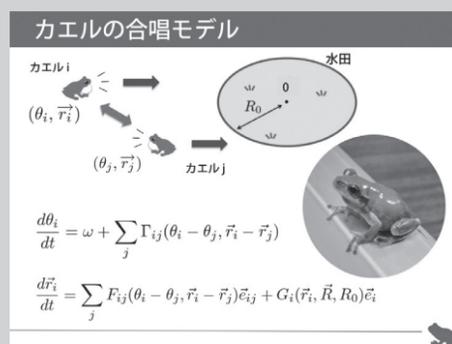
合原 一究 先生



合原 一究 先生のプロフィール

〈経歴〉

- 2006年 京都大学理学部理学科 卒業
- 2008年 京都大学大学院情報学研究科修士課程 修了
- 2011年 京都大学大学院理学研究科博士課程 修了
- 2008年 日本学術振興会 特別研究員DC1 (2011年まで)
- 2011年 理化学研究所 基礎科学特別研究員(2014年まで)
- 2014年 日本学術振興会 特別研究員PD(2016年まで)
- 2016年 筑波大学システム情報系 助教



カエルの合唱法則の数理モデル



聞き手：

- |       |          |        |
|-------|----------|--------|
| 佐藤 文俊 | 日本科学機器協会 | 広報副委員長 |
| 南 明則  | 同        | 〃      |
| 筒井 紫乃 | 同        | 広報委員   |
| 外嶋 友哉 | 同        | 〃      |
| 谷尾 俊昭 | 同        | 〃      |
| 藏満 邦弘 | 同        | 編集長    |
| 岡田 康弘 | 同        | 事務局長   |
| 梅垣 喜通 | 同        | 参事     |

(取材・撮影・編集協力：クリエイティブ・レイ(株) 安井久雄)

「科学の萌芽」とは

各分野で活躍する次世代の科学技術の担い手にご登壇いただき、成功までの軌跡や知られざるエピソードなど、サイエンスの“今”と“未来”が見えてくる企画です。

取材日：2018年5月14日  
日本科学機器協会 会議室

—そもそもカエルはどれくらいの種類がいるのですか？また、珍しいカエルを教えてください。

**合原** 日本では38種類が報告されています。世界だと約6500種類と言われていますが、発見されていないカエルも多数いると見られています。私が論文で発表したものでは、ニホンアマガエルの他、海外のカエルの研究でパナマのトゥンガラカエルの例があります。中南米に生息するカエルで、その名前のおり鳴き声が「トゥーン…ガラ」と言っているように聞こえます。つまり「トゥーン」と「ガラ」という2つの声をあわせて鳴いています。面白いのは「ガラ」を鳴く回数が個体によって違い、「ガラ」が多い鳴き方がメスに選ばれやすいのです。

さらに面白いのが、その鳴き声によってトゥンガラカエルをエサとして狙う別の生物、すなわち捕食者や寄生者まで寄ってきてしまいます。例えばコウモリ、トゥンガラカエルの血を好物とするケヨソイカという蚊です。つまりメスも引き寄せられるのですが、その鳴き声にはリスクもあるわけです。このうち蚊については我々も研究を進めています。

—トゥンガラカエルはパナマのカエルですから、現地で実験をされたのでしょうか？

**合原** そうです。実験はパナマの野外で行いましたが、まずカエルを捕まえるところから始め、それを蚊が入ってきやすい構造のケースに入れ、一定間隔で配置して観察

しました。それぞれのケースのそばには鳴いたことが目で分かるよう、鳴き声に反応して発光するセンサーを起きます。こうしないと、たくさんを調べるので、音ではどこにいるカエルが鳴いたのか判別出来ないので。ちなみにこの装置はホタルのように光るので、私たちは「カエルホタル」と呼んでいます。

このような手段で、それぞれの個体が一定時間に鳴いた回数、鳴き声の特性、蚊の数がどう変化していくかということ調べました。その際、録音した音声も解析して周波数などを割り出す作業を行い、どの個体が何回「トゥーン」「ガラ」と鳴いているか、それぞれのカエルにどれくらい蚊が集まったかを照らし合わせるわけです。

その結果、たくさん回数鳴いたオスほど、なおかつ「ガラ」の数が多いうほど、蚊に狙われやすいということが分かりました。鳴いてメスを引き寄せるというメリットに対して、デメリットの方を調べてみたということになります。

—これはカエルが出す二酸化炭素に気づいて、蚊が集まったということではないのでしょうか？

**合原** それもあるかもしれません。ただし、原因を識別するため、実際のカエルではなくスピーカーから鳴き声を出す方法でも調べられていて、その場合、鳴き声に蚊が集まってくるという結論が得られています。二酸化炭素も使っているかもしれませんが、音も利用しているのは間違いなさそうです。



中南米に生息するトゥンガラカエル

—効果的に鳴き声が出せないとメスを引き寄せられないが、鳴くと捕食者に狙われるというのではカエルも悩ましいですね。

**合原** 実は「鳴かないでメスと出会う」という手段をとるカエルもいることが知られています。鳴くというのは体力も使うし、先ほど話してきたように捕食者に狙われるリスクもある、というわけで「鳴いているカエルのそばにじっとして、メスが来たら横取りしてしまう」という行動もありえるのです。これはサテライト行動と言い、比較的体が小さな個体に見られる傾向があります。体が小さいとあまり体力もなく、鳴き声も魅力的でないの、そうした方法をとるのかもしれない。

—省エネタイプのかしいカエルがいるんですね。(笑)

カエルのお話を聞いて、身近にある新しい発見を感じます。先生はこうしたことを「数理モデルを使って動物行動の法則性を解明する」という独特のアプローチで行っていますが、その意味合いや可能性について教えてください。

生き物好きが集まり、たとえば沖縄県の西表島のジャングルなど野生生物が多い地域で寝泊まりしながら観察をするというサークルでした。私は、カエルやヘビを主に観察するチームでした。

カエルの鳴き声パターンに興味を持ったのは、珍しい種類のカエルやサンショウウオが生息している島根県隠岐島に行った時のことです。その島で水田地帯の夜道を歩いていると、私にはたくさんのカエルがタイミングを揃えて鳴いているように聞こえ、それをとても興味深く感じ、研究してみようと思ったのです。

それで身近にいるニホンアマガエルを採取して調べていきました。生物がタイミングを合わせて同じ事を行う同期現象は、例えばホタルなど他の生物でも見られることは分かっていたのですが、アプローチとして数式を使って研究する方法を思いつき、これをカエルで行ってみることにしました。

そうすると、近くの個体同士がわざわざずらして鳴いていることが分かったり、そのような法則を数理モデルを使って再現できたりと、興味深い現象が色々あることが分かったのです。「一緒に鳴いて

ない」ということは、最初の予想を裏切る結果だったので落胆しそうになりましたが、一転して多くの新しい発見があったことに気付いた時は、すごく感動しました。

**メスを獲得するための求愛は知恵をこらしたオスの行動**

—カエルは田んぼなどで集団生息していますよね。オスは他のオスの鳴き声を意識しながら、わざとずらして鳴いているのでしょうか？

**合原** そのことは私も疑問に思い「2匹のカエルが音を意識して交互に鳴いていることは分かりましたが、3匹になるとどうずらすのだろうか?」と思い調べてみました。すると3匹のカエルだと、3匹が順番に鳴いたり、3匹のうちの2ペアが交互に鳴いたり、また別のパターンが見つかりました。3匹が順番に鳴くためには、お互いの鳴くタイミングがわかっている必要があるの、カエルは“2つの音源は聞き分けられる”のではと考えられます。これは、たいへん面白い発見でした。

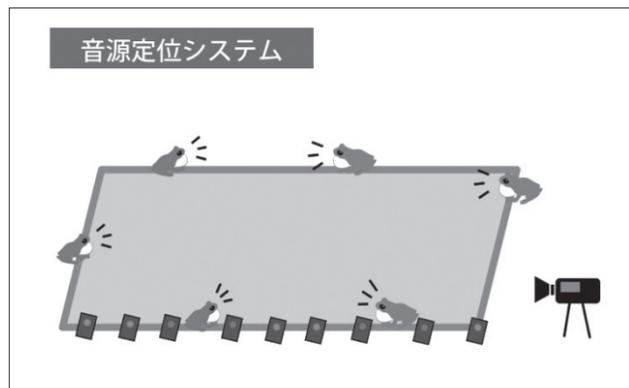
メスを獲得できる、いわゆるモテる

カエルの鳴き声を調べていくと、「短い間隔の鳴き声を選ばれやすい」とか「一番最初に鳴いたオスが選ばれやすい」といった先行研究も知られています。しかし、集団の中で自分の存在をいかにアピールするかというのは、まだまだ研究の余地があり、とても面白いテーマだと思っています。

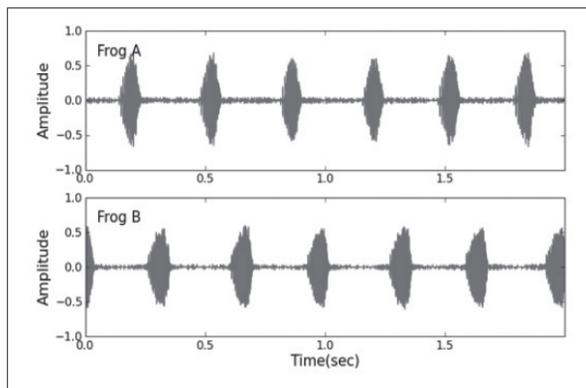
—私達の身近にいるカエルも鳴き方は色々違うのでしょうか？

**合原** そうですね。例えばニホンアマガエルと比べると、ウシガエルはより低い声で鳴きます。一般に低い周波数の音は減衰しづらいので、遠くまでコミュニケーション出来るかもしれません。

また、中国には超音波で鳴くカエルもいます。このカエルは滝壺に住んでいて、滝の騒音があってもコミュニケーションできるように、超音波を使っていると考えられています。このように、カエルの種類で鳴き声の高さは変わりますが、同じ種類のカエルであれば音の高さはそれほど変わりません。つまり、鳴き声は種に固有の特徴を持っていると考えられます。



カエルホタルを用いた計測方法



ニホンアマガエル2匹の音声データ、2匹が交互に鳴く様子がわかる



カエルの合唱法則に学ぶ通信方式

います。それにより、個々のセンサで無駄な通信をしないようになり、全体としてのロスがなくなる省エネルギー化も実現出来るかもしれません。

—生物の知恵を応用することで、私たちの情報通信システムがより便利になり、暮らしやすくなるということでしょうか。

**合原** 私自身の興味は、応用というよりも、生物の未知の行動を調べるような基礎研究にあります。ただ、そのような未知の行動を調べる過程で、優れた行動法則を数理モデルとして表現し、人間社会の役に立てるのも重要な研究だと考えています。生物の基礎研究を通して、私たちの社会の発展にも貢献できればうれしいです。

先ほど少しお話しましたが、中国の滝の近くに生息するカエルは超音波で鳴きます。なぜかという生息場所は滝が流れ落ちる轟音の地域で鳴いたとしても音がかき消されてしまうのです。そこで背景ノイズである滝の音と周波数をずらした超音波でコミュニケーションしているわけです。喉を膨らませているけど音が聞こえない、しかし超音波を拾うことが出来るマイクを持っていくと20キロヘルツ以上の周波数で人間の耳には聞こえない超音波を出していたというわけです。

このようにいろんな信号が混ざっている環境で自身の信号を差別化することで、うまくコミュニケーションしようというのは、生物らしいユニークな戦略だと思います。

の好みについて、はっきりとした結論を得るところまでは出来ていません。

### 生き物のかしこさに学ぶIoT技術

—カエルの色々な生態についてだけでも興味深いですが、こうした「カエルがずらして鳴く」というような生態を、IoT社会に応用できるそうですね？

**合原** 生物の生態を数理モデルに表して応用に結びつけるということなのですが、カエルの合唱法則を例に話をします。同じ場所にたくさんのカエルが生息していても、近くのカエル同士は鳴くタイミングをずらしていました。またサテライト行動のような、消費エネルギーの削減につながる戦略も知られています。

この仕組みは通信の効率化に応用出来るのではないかと、私たちは考えています。その一例が「無線センサネットワーク」です。

これはセンサと無線がついた端末がいくつもあり、パケットリレーのようにデータを隣の端末に送っていくことによって、広範囲のデータを収集出来る仕組みです。しかしこの時、近くのカエル同士が同時にデータを送ってしまうと送っている間は受信できないという制約から、データを失ってしまうことがあります。このような問題をパケット衝突と呼びます。

そこで、カエルが交互に鳴いて鳴き声の重複がないようにしていたように、近くのカエル同士が交互に通信することで、パケット衝突の問題が解決できるのではと考えて

あるいは、自分より魅力的でないオスを意識して交互に鳴いているのか？など、より深い行動原理の理解へと進んでいくことが期待できます。

—メスの方から研究した例はあるのでしょうか？

**合原** あります。オーストラリアの東部に生息するアカメアマガエルというカエルについて調べました。なぜこのカエルを選んだかという、生物の場合、比較的体の大きく強いオスがメスを獲得することが多いですが、アカメアマガエルは小さなオスの方がうまくメスを獲得しているという報告があったのです。体の小さなオスが出す鳴き声とメスのパートナー選択との関連性があるのではないかと考え、調べたわけですが。

そこで、まず私たちは野外環境でメスの位置とオスの鳴き声を同時に計測する方法を開発しました。具体的には、小型の発光装置をメスにのせて、カエルホテルの光と一緒に撮影したのです。そうすることで、メスがどのような鳴き方のオスに近づいていくかを調べるのに成功しました。ただし、この研究については実験回数が少なく、メス

**合原** 例えば、カエルが交互に鳴く逆相同期現象があることは分かっていたものの「その生物がどういう行動制御をした結果、この現象に行き着いているのか」はあまり分かっていない部分が多くあります。それを“数理モデルを使って調べる”ことで、動物が行動を制御する法則を解明しようとしています。つまり「ある個体がこういう風に鳴く、すると別の個体はその声を聞いて行動を制御してこういうパターンをとるのではないか」という仮説のもとづいて数式をたて、その数式を分析することで、実際の動物の行動を再現できるかを調べていきます。そのようにして、どういう行動制御のもとに実際の行動が生成されたのか、背景にあるメカニズムを含めて推定するのが狙いです。別の言い方をすると、データからだけでは分からない背後にあるメカニズムが見えてくることもあります。

カエルの鳴き方で言うと、例えば10匹の個体がいれば、実験データから数理モデルを推定できれば「どの個体がどの個体に影響をされて行動を制御しているのか」というところまで分かるかもしれません。そうすると、自分より魅力的なオスを意識して交互に鳴いているのか？



オーストラリアの調査地



オーストラリアに生息するアカメアマガエル



“生き物のかしこさ”はとても興味深いものです。その生態を定式化することで、生き物の戦略や気持ちがわかるかもしれません。

— そういった視点を持つと研究が楽しくなると思います。

— 最後に、中高生の理科離れが問題になっていますが、カエルのようなお話から始めると、興味を抱きやすいですね。

合原 そうかもしれません。私が専門の数理モデルなど、一見難しそうに捉えられがちですが、分かる非常に面白いものなのです。大学では力学や数理モデルを教えています。カエルのことや身近な生き物の例などから入るのは興味を持ちやすいと思います。カエルだけでなくホタルの発光現象など、身近な生き物の行動が数学や物理と関連しているなど、解説していくと面白みを感じやすいと思います。そうしたことから物理や科学の面白さを学生や子供たちに伝えていきたいです。

ユニークな視点と柔軟な発想で独自の研究を進める合原先生。今後益々のご活躍を期待しております。

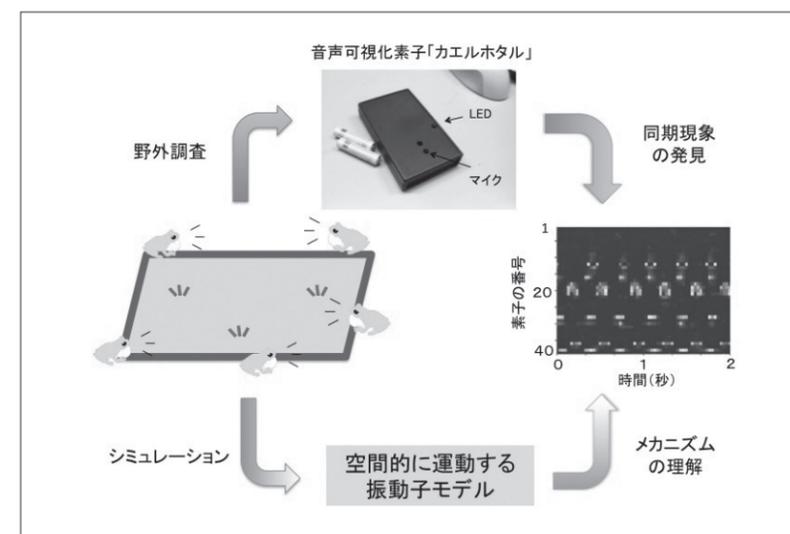
次号「科学の峰々」では慶應義塾大学 理工学部 物理学科 教授 中迫 雅由先生にお話しいただきます。

カエルが反応して鳴き始める」というものでした。これは何かというと、卵をかきまぜるリズムとカエルの鳴くリズムが一致していたから起こったことではないかと思っています。さらにその子はすごい発見をしていて「でも、近くで同じ卵をかきまぜる音をさせても鳴かない、遠くでさせた時にだけ鳴く」ということに気づいていたのです。これはおそらく、近くで音がする場合、先ほど言ったサテライトのモードにカエルがなっているのでは鳴かないのではないかと思います。「近くで別の個体が鳴いている、じゃあ自分は鳴かない」ということです。それくらい身近なことでも、じっと観察していると、すごく面白い現象が眠っているかもしれません。

— 今、学生に大学で講義や指導も行われている立場でいらっしゃいますが、学生に伝えたいことはありますか。

合原 身近なアマガエルひとつにしても、こんなに分かっていなかったことがあったのかということが私自身驚きでした。そういう意味で、ごく身近なことでも、何か面白い現象はないのかとアンテナを張っておくことは大切だと思います。

それに通じるようなエピソードで、私のアマガエルの研究がメディアで紹介してもらったのを見て、カエルに興味がある子どもを持つお母さんからメールをいただいたことがありました。そのお子さんが気づいたのが「卵をかきまぜる音を聞かせると



から数理モデルを推定するプロジェクトについては、京都大学の青柳富誌生教授のグループと進めています。また、海外だと先ほど話したパナマのトゥンガラガエル、オーストラリアのアカメアメガエルの研究は、現地の研究者に協力してもらい共同で研究しています。理論的なことだけでなく、カエルの生態や実験方法なども情報交換をしています。

— ところで研究はカエルを捕まえるところから始まるわけですか？

合原 そうです。僕の経験した範囲だと、しばらく飼育して鳴かせるよりも、元気よく鳴いているカエルを捕まえてすぐに実験したほうが鳴きやすいように感じました。そのため、ニホンアマガエルの室内実験の場合は、夕方ぐらいに田んぼに出かけて数匹捕まえる。その後、部屋に持ち帰って鳴かせるという実験を繰り返していました。大学生の頃は、そのような実験を5月から7月にかけて毎日行なっていました。

また、当時もカエルの鳴き声を録音して分析することを行っていたわけですが、今とは違い最長で120分の録音テープしか手元にはありませんでした。そのため、2時間おきにテープを交換して録音していました。今は長時間録音出来る機材が安く簡単に手に入るようになって、随分昔に比べると便利になりました。

身近なところにある現象を解く面白さ

こうしたことを調べていくと交互に鳴くのが一般的だけでも、生存環境によって鳴き方のパターンが様々に違う、すなわち生存の戦略が違う、ということもまた非常に面白いです。



コウモリのエコーロケーションの計測 円内は手のひらのコウモリ

先例のないアプローチで1つのことを究める!

— 先生はカエルの研究を行っていますが、もともと物理を専攻されていたのですよね。物理が好きになったきっかけなどはありますか。

合原 高校生のころ、物理の中でも「力学」が好きで、力が働く法則をあてはめていくと、その運動の先まで分かり、予測出来ることに魅力を感じました。一方で生物はというと、動物は好きでしたが、どちらかというと趣味という感じで高校まではあまり勉強はしてきませんでした。

ですが力学の法則に興味深く感じていたことは、今のカエルの研究のアプローチに共通していて、行動を定式化出来ればそれを当てはめ、拡張して予測が出来るわけです。このような共通点があったので、物理と今行っているカエルの研究は割とスムーズにリンクしました。

動物の行動を数理モデルで定式

化する例は、鳥や魚がどうやって大きな群を維持したまま移動していくのか、などについては研究がありました。しかしカエルになると数理モデルを使った先行研究はほとんどありませんでした。

— 実は2014年8・9月号「科学機器」で、お父様(合原一幸先生)にインタビューをさせていただきました。お父様は日本を代表する数学者でしたね。

合原 父も数理モデルを使っている現象を研究しているので、研究内容について議論させてもらうこともあります。特に、自分が大学生のころは、いろいろコメントをもらってとても勉強になりました。研究者としての交流は刺激的で、これからはお互いの研究内容について議論できればいいなと思っています。ちなみに、僕の名前は「一究」というのですが、父は「なんでもいから1つ究めてみなさい」という意味で、この名前にしたそうです。ただ、カエルを極めようとするとは思っていなかったようですが(笑)

— 生物学の分野の研究者や、海外の研究者との交流も多いのでしょうか？

合原 結構多いですね。鳴き声の計測を一緒に進めてきた奥乃博教授のグループとは10年以上共同研究をしていますし、無線センサーネットワークへの応用に関しては大阪大学の村田正幸教授のグループと研究を進めています。実験データ