

研究エッセイ

このコーナーではフィールド科学センターの教員が行っている研究のエッセイを掲載します。北海道大学のフィールドで行われている研究を知ってください。

学部4年生の研究室分属の際に藻類の系統分類学講座にお世話になってから、もう20年近く海藻類を材料として研究を行っています。自分が分類学の研究室にいたこともあります。学生時には海藻研究といえば分類学の研究が多かったような印象があります。学位をとった2011年頃には海藻類でも次世代シーケンサーを利用した全ゲノム解析の論文が出始めていましたが、自分の研究材料(スジアオノリ)のゲノムを読むことは夢のようなことで、技術的にも金銭的にも想像もできないことでした。しかし、技術の進歩は目覚ましいもので、今では比較的安価に次世代シーケンサーを利用できるようになり、スジアオノリのゲノム情報も共同研究をしている先生方のおかげで手に入れることができました。いつかは海藻でも陸上植物のように遺伝子の機能解析ができれば、と思ってきましたが、そんな夢のような話の土台となるゲノム情報を海藻でも手に入れられる時代になったようです。残るは形質転換系だ、と考えていたところで今度はCRISPR-Cas9によるゲノム編集の波がやって来ました。一過性の形質転換は出来ていたものの機能欠損変異体を作る方法がなかったので、これ幸いとアオノリで試してみたところ、あっけないくらいにあっさりと成功しアオノリでも任意の遺伝子を壊した変異体を作ることが可能になりました。

ゲノム情報と逆遺伝学的な手法が僅かな時間の間に手に入るような時代になり、モデル生物という言葉も意味をなさなくなる時代になるのかも知れません。もちろん所謂モデル生物で蓄積された多種多様なデータといったものは一朝一夕で手に入れられるものではありませんが、自分の興味のある生物、現象をゲノム情報や実験手法がないからと諦めなくても良い時代になってきたということでしょう。海藻類でも新しい技術を利用した多様なアプローチから新規性のある研究がたくさん出てくることを期待しています。自分はと言えば、いまはアオノリの雌雄配偶子が接合(受精)する際の相互認識と細胞融合に関わる分子メカニズムの理解を目標として、ゲノム情報を利用したプロテオーム解析、トランスクリプトーム解析、ゲノム編集実験をあわせて研究を進めています。広く、波もある海洋の中で海藻類の配偶子はどのようにパートナーを探し出し、受精を行っているのでしょうか？またこれらの遺伝子は陸上の植物とどの程度保存されていて、どの程度海藻類に特異的なものがあるのでしょうか？これまでに陸上植物で受精の際に機能する遺伝子がアオノリでも受精の際に重要な役割を果たしていることが分かってきました。次はアオノリから植物系統で保存的な配偶子間の相互認識と細胞融合に関わる遺伝子が発見できればと考えています。

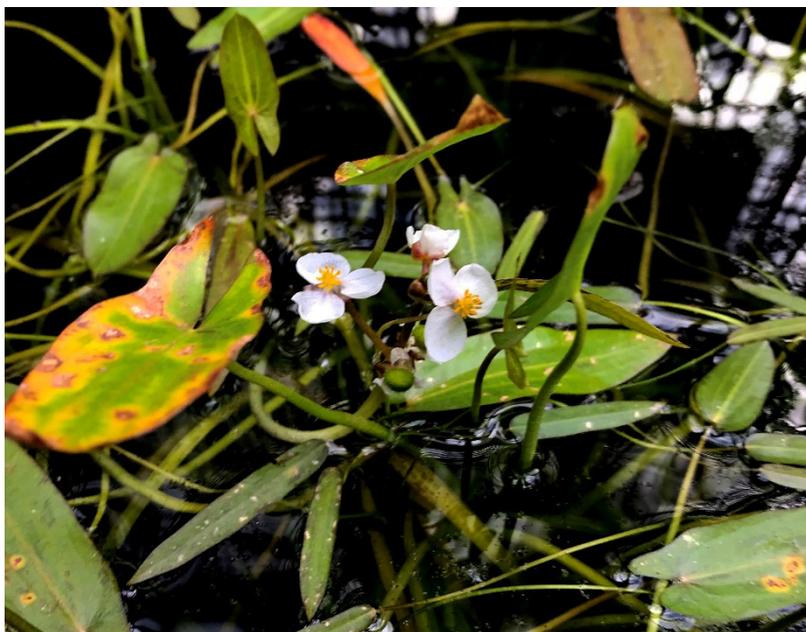


スジアオノリの接合子と室蘭・電信浜に生育するアオノリ的一种

【国内希少種カラフトグワイ】

大学の植物園は、植物分類学、植物生態学をはじめとする研究と教育のための施設であるとともに、絶滅危惧植物の保全に関して科学的知見の集積、保護・増殖の実践、社会教育の場でもあります。本センター植物園は全国約 120 の植物園が加盟する日本植物園協会の保全拠点園でもあり、日本の寒冷地方や高山の絶滅危惧植物を保全する研究と活動を行っています。ここではカラフトグワイ(オモダカ科)の例を紹介します。

カラフトグワイはクワイ(慈姑)に近縁の水草です。クワイは塊茎が食用になり、横浜育ちの私には中華街の肉包の具のイメージがありますが、カラフトグワイの塊茎は小豆大で食用にはなりません。カラフトグワイはユーラシア大陸の亜寒帯に広く分布しますが、日本では北海道と岩手県の数か所の湖のみで確認されます。北海道のある湖では近年その個体数が激減するとともに、株も小型になり開花・結実がほとんど見られません。その主な要因は、近年増加する台風で土砂が流入・堆積したことによる環境悪化と、外来種ウチダザリガニによる食害と考えられます。カラフトグワイは 2019 年に「種の保存法」により「国内希少種」に指定されており、センター植物園は「国内希少種」を保全する環境省事業に採択され、この湖の地元協議会や環境団体と協力して保全を行っています。



センター植物園で開花したカラフトグワイの保全株

絶滅危惧種の保全のアプローチは、生息域内保全と生息域外保全に区分されます。生息域内保全とは、生育地や生態系を守り、改善することで、その種の集団を自然の生育環境において維持し、回復することをいいます。一方、生息域外保全とは、自然の生育地ではなく人間の管理下で個体を保護・増殖するものです。植物園におけるカラフトグワイ保全の課題は、種の存続可能性に影響すると考えられる遺伝的多様性を守ることに配慮して自生地から保全株を導入して栽培・増殖することです。このために、自生地に残る集団にできるだけ負荷をかけないよう、塊茎を複数つけた株から1つの塊茎だけを採取し、栽培を行いました。そうして整備した保全株を、環境回復が試みられている自生地に将来植え戻すことで、残存している集団を補強して開花・結実する状態を回復することを目指します。

植え戻しの実施には、自生地集団の本来の遺伝的特性を損なわないことが重要です。そこで、保全株の整備と植え戻しにおける遺伝的管理の指針を得るために、カラフトグワイの遺伝解析を行いました。その結果わかったことは、自生地集団はほとんど開花・結実しないものの塊茎で無性的に増殖したクローンばかり



遺伝的特性により保全株を隔離して栽培する水槽・灌漑設備

にはなっていないこと、古くからセンター植物園や他の組織で栽培される株は確かにその湖から採集されたもので残存集団と過去には互いに交配していたこと、そしてセンター植物園の保全株の一部は、自生地の集団から失われた遺伝的な変異をもつこと、などです。センター植物園のカラフトグワイは、自生地集団の遺伝的な補強を考えるうえで重要な保全株といえます。

保全のための植え戻しの実施には、遺伝的な問題だけでなく、ウイルスの持ち込みや植え戻し作業自体の影響などを慎重に考え、その可否を判断することが重要です。そのうえで、もしカラフトグワイの植え戻しが実施され、自生地の湖で多くの花が咲き実を結べば、国内希少種ではまだ実施例がほとんどない植え戻しの貴重なケーススタディになると期待されます。

【世界最大のネットワーク型フィールド進化研究—都市化に対する植物の適応進化—】

20 世紀後半、急速な人口増加が地球規模で生じており、それとともに世界の都市化の傾向が強まっていった。そして 2007 年、都市に生活している人口が地球全体の半分以上を超え、2050 年には、3 分の 2 が都市に集中することになると予測されている。このような急速な都市の拡大は、気温や湿度、積雪などのさまざまな環境条件を改変し、生物多様性についても影響を与えている。そして最近では、このような急速な都市化が、生物の遺伝的多様性や進化にさえも大きなインパクトを与えることが知られるようになってきている。都市化が生物進化にどのような影響を与えるのか。この問いについて答えることは、ますます都市化が進むであろう地球の将来について予測する上で重要な足掛かりになる。

では、どのようにこの問題に取り組むのか。これまでは、一つあるいは少数の都市において、郊外部と都市部における遺伝構成や形質について比較することが多かった。しかし、それでは一般的な答えに辿り着くにはまだまだ道が遠い。ここで一つ重要なポイントをあげてみよう。それは、「都市」とは、地球上のあらゆる場所で繰り返し繰り返し行われている「大規模実験」としてとらえられることができるということだ。つまり、超反復を有する自然実験である。もし、それらのさまざまな都市で、同じ対象生物について同じ方法でデータを取得すれば、都市化は生物進化をどのように駆動するのかという問いに対する普遍的な理解が得られるかもしれない。この問題設定のもと、進化生態学上、過去に類を見ない、大規模グローバル・ネットワークによるフィールド進化研究が誕生した。そして、筆者も参画し、札幌周辺を含む、5 大陸 160 都市地域において、180 名以上の研究者が参加して調査が行われた。蛇足となるが、毎木調査をはじめとする生態系の各種フィールド観測では、ネットワーク型の調査研究がこれまでにいくつも推進されてきている。進化生態学でそのようなネットワーク型の大規模プロジェクトがこれまでなかったのは、研究対象となる生物や現象が(進化的理論的には一般性があっても)きわめてユニークで個別の場合が多いためであろう。都市進化というテーマだからこそ実現したとも言えるかもしれない。

さて、本研究の対象生物はシロツメクサである。世界中のあらゆる都市に繁茂する(多くは外来種として)コスモポリタンであるため、対象としてうってつけた。さらに、特徴的な遺伝形質を持つ。シアン化水素と有毒ガスを生成するシアノジェネシスという形質であり、シアン化水素を生成できる/できないについて、メンデル遺伝に基づいた多型を示す。この形質は植食者に対する被食防衛に関わっており、さらには、湿度などの非生物要因による影響も受けるようだ。そこで、このグローバル・ネットワークでは、シロツメクサのシアノジェネシスに関する多型について、160の都市地域において都市～郊外トランセクトを設置して調査をおこない、その多型の頻度分布に都市～郊外のクラインがあるのかどうか、そしてそれが世界中の普遍的パターンなのかどうかについて明らかにしようとしてきた。

その結果、39%の都市において、郊外にいくほどシアノジェネシスを有する遺伝子型頻度が上昇していくという、「都市からの距離に対する正のクライン」が検出された。地球全体でのクライン分布には、地域性や空間パターンはまったく認められなかった。また、8%はその逆の負のクラインとなり、残り 53%は明確なクラインが認められなかった。約半数の都市でクラインが検出されたことから、適応進化が生じている可能性がまず考えられるが、その一方で、遺伝的浮動がきいている可能性も排除できない。実は、遺伝構造上、



シロツメクサにおける食害とミツバチ訪花。
シロツメクサはミツバチにとって世界最大の蜜源である。

遺伝的浮動の貢献度が高くなると、非シアノジェネシスの型が多くなるため、都市部のほうで浮動が強くなっているために先のクラインが検出された可能性がある。あるいは、都市部と郊外部での遺伝子流動の違いによる可能性もあるだろう。そこで、これらの対立仮説を検討するために全ゲノムリシーケンスを行い、中立領域における塩基多様度を都市～郊外間で比較し、都市～郊外間での遺伝的分化度を調べた。詳細はここでは省くが、いずれの遺伝分析の結果からも、浮動や遺伝子流動によってクラインが説明できる可能性は支持されず、適応進化によるものであると結論づけられる。さらに興味深いことに、都市～郊外間での遺伝的分化度はきわめて低く、高い遺伝子流動の存在が示唆された。つまり、それにも関わらずクラインが認められるということは、世界中の都市で、強い自然選択による適応進化が駆動されているということである。本研究成果は、2022 年 3 月 18 日付で公開されているので、ぜひご覧いただければ幸いである。

このネットワーク研究によって、都市が生物進化を駆動することは、地球上で普遍的に起きているということが分かった。その一方、いったいどのような環境の変化が進化を促進するののかはいまだ謎に包まれている。冒頭で少し記したように、都市化によって、多くの物理環境が同時に改変される。そのため、トランセクト・アプローチによる比較では、(部分的に示唆されることはあっても)クライン生成に寄与する環境因子を特定することが難しい。この問題に対して、当研究室の石黒智基君が先駆的な新しいチャレンジを開始した。その内容については 2021 年度修士論文としてまとめている。論文として出版された暁には、再び紹介できればと思う。

(森林圏ステーション 南管理部 内海 俊介)



石黒君のシロツメクサ・フィールドワークの一コマ。百年記念塔の前で一休み。

北方生物圏フィールド科学センターへの要望

【長期生態学研究にセンターは不可欠】

大学院地球環境科学研究院 露崎 史朗(センター外運営委員)

火山噴火後の植生遷移の経年追跡調査で、有珠山では洞爺臨湖実験所に、(渡島)駒ヶ岳では白尻水産実験所に、ほぼ毎年、ご厄介になっている。天気の良い日の火山調査は、気分がいい(写真 1)。サロベツ泥炭採掘跡地の植生回復調査でも、サンプル処理等が必要な際には、天塩研究林にお世話になっている。センター施設を利用して嬉しいのは、サンプルの処理や保管が可能なことである。ホテルなどで、時には泥だらけの得体のしれないモノを手にして、うろろろしていると、あちこちから怪訝な視線の矢を射られるようなことは施設ではない。サンプル処理や凍結保存が、採取後すぐに必要な時に、センター施設が近くにあることを前提に研究計画を立てたこともある。

自身の研究の重要な手法の一つは永久固定調査区を用いた長期観測である。有珠山では 1983 年から、駒ヶ岳では 1996 年から、サロベツでは 2003 年から、いずれも現在まで、ほぼ毎年で調査を行っている(写真 2)。果たして、有珠山の植生は、もっと時間がたつと、樽前火山噴火後の遷移ともいえる苫小牧研究林の森林のようになるのであろうか。これらに加え、ずっと同じ場所を観察していると、変わった植物に出会うこともある。これが経年調査を止められない理由かもしれない。有珠山の 2000 年噴火跡地では、北限は福島県とされており北海道初報告となるトサノゼニゴケと、北海道では地熱のあるところに生えるコヒロハハナヤスリが確認された。駒ヶ岳の荒地でモウセンゴケの定着は、自分の目で改めて確認できた。モウセンゴケに代表される食虫植物は、多くの図鑑では「高層湿原」に生息とされている。確かに高層湿原は貧栄養土壌の典型ではあるが、モウセンゴケの定着には貧栄養な高層湿原が条件ではなく、貧栄養土壌であることを確信できた。

これらの長期観測で得られた発見は、ひとえにセンター地方施設があることにより円滑な調査が行えたことに大きく依存している。北海道(北大)の地の利を生かした研究教育ネットワーク体制構築には、センターの位置づけが大きな鍵となることは疑いない。本ニュースレターには 7 年前に書かせて頂いているのだが、そこには「センター全体での教育・研究を俯瞰し、組織全体が行動するには、これらを包括した情報」の整備が必要、と記していた。情報整備は、終わりのない作業でもあるが、今後、重要性は増すであろう。同時に、野外活動を中心とした研究教育では、ウィズコロナやポストコロナへの座学とは異なる対応も必要となろう。むしろ、これを逆手にとったポストコロナ的な研究手法や野外実習の到来を期待しつつ、今後も教育でも研究でも積極的に施設を利用させて頂きたい。



写真 1 天気も自分もご機嫌なときの駒ヶ岳。
(2021 年 5 月 21 日)



写真 2 1977-78 年に噴火した有珠山。
[左] 1986 年 8 月 7 日 [右] 2017 年 7 月 26 日

編集後記

大変、お待たせしてしまいました。それでも尚、すべての原稿が集めることができず、編集委員長として申し訳ない気持ちでいっぱいです。特に、本 27 号に原稿を執筆いただいた皆様におかれましては、原稿の締め切りから発刊まで長い時間がかかってしまい、大変、失礼いたしました。

さて、3 年ほど続いていた新型コロナ感染症の出口が見えてきました。新年度からは、ようやく今まで通りにフィールド調査、研究、教育活動等ができそうです。各フィールドにおかれましてはコロナの終息感が漂っていると思います。皆様の益々のご活躍をお祈りいたします。(J. Y.)