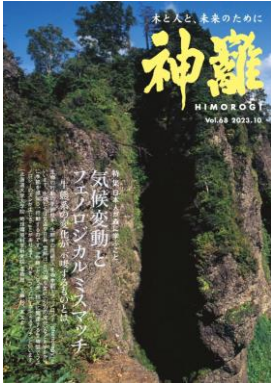

■第68号(2023.10 発行) 特集:日本人が森に学ぶこと。

気候変動とフェノロジカルミスマッチ—生態系の変化が示唆するものとは

北海道大学大学院 地球環境科学研究所 准教授 工藤 岳(談)



-
1. 生物たちは、季節を感知して行動する。
 2. 生物たちの「生存戦略」。
 3. 気候の変化がフェノロジーのズレを引き起こす。
 4. ミスマッチは世界中で起きている。
 5. 気候変動の速すぎるスピード。
 6. お花畑が消え、ササが凌駕する。
 7. 変化を見逃さない体制づくりを。
 8. 生態系全体を俯瞰する視点が重要。

昨年発表された国連環境計画の「フロンティア報告書 2022」で、「迫り来る重大な環境問題」のひとつに挙げられた「フェノロジカルミスマッチ」。相互に作用する生物の間で、季節性の行動パターン(フェノロジー)にズレが生じることを指します。いま、生態系の中で何が起きているのか、その背景には何があるのか、様々な事例とともに考察します。

■1. 生物たちは、季節を感知して行動する。

サクラの開花やツバメの飛来、木々の紅葉や落葉——。私たちは古くから、生物たちの様々な行動に季節の変化を感じてきました。サクラの開花日についての記録は9世紀の古文書にまで遡ることができますし、冬ごもりしていた虫が土の中から出てくる「啓蟄」は二十四節気

のひとつになっています。生物たちの行動が、長い間、同じ時期に繰り返されてきたことがわかります。

こうした生物の行動の季節性を、生態学の用語で「生物季節＝フェノロジー：phenology」といいます。生物たちは人間のようにカレンダーを持っていませんから、気温や日長、雪解け、月の満ち欠け（引力の変化）などを手がかりに季節を感知し、行動するのです。

■2. 生物たちの「生存戦略」。

生物たちの行動に季節性があるのには、理由があります。

ツバメは春になると熱帯地域から温帯地域に渡って営巣し、子育てをします。ヒナのエサには高タンパクのものが望ましく、ガなどの幼虫はうってつけの食料です。子育て中はより多くのエサが必要になりますが、熱帯地域は1年を通して気候が大きく変わらないため、昆虫の発生数にも大きな変動はありません。それに対して、温帯地域の春は昆虫が一斉に孵化し、豊富なエサが確保できる時期。この環境を求めて、ツバメたちは渡ってくるのです。

一方、ツバメのエサとなる昆虫が春に孵化するのは、幼虫のエサとなる落葉広葉樹の葉が春に芽吹くからであり、落葉広葉樹の開葉は、冬が終わって気温が上がり、十分な水分と日光を得られるタイミングで始まります。ツバメの渡りと営巣、昆虫の孵化、樹木の開葉は、それぞれのフェノロジーであると同時に、互いに関連することで食物連鎖のネットワークを構成していることがわかると思います。

また、植物が花を咲かせる時期と、花粉を運ぶ昆虫（ポリネーターといいますが）が活動する時期が同調することで、植物は受粉ができ、昆虫は蜜や花粉などの食料を得られる、双利的な関係を築いています。

あるいは、「光」という資源を分け合う例もあります。北方の落葉広葉樹林では、雪が解けてから開葉までが、1年の中で唯一、林の中がとても明るくなる時期です。春咲きの林床植物は、その短い期間の光を利用して急速に成長します。雪が解けると一斉に芽生え、花を咲かせて実を結びます。初夏に上部の樹木が開葉し、林冠部が閉ざされて光資源がなくなると、林床植物の地上部分は枯れ、翌年の春まで休眠状態に入ります。

このように、生物たちは、絶妙なタイミングで繁殖・成長し、異なる生物と活動時期を同調させることで食物連鎖や双利的関係、共生関係など様々なネットワークをつくっています。個々の生物のフェノロジーは、環境に適応して子孫を存続させるために、長い年月をかけて獲得した生存戦略のひとつです。

■3. 気候の変化がフェノロジーのズレを引き起こす。

ところが、相互に関連する生物間でフェノロジーのズレが生じることがあります。これを、「フェノロジカルミスマッチ」といいます。

具体的な事例として、北海道の落葉広葉樹林に生育するエゾエンゴサクとマルハナバチの関係を見てみましょう。

北方林の林床植物であるエゾエンゴサクはケシ科の多年草で、球根の状態越冬し、雪解けとともに地上に現れ、いち早く花を咲かせる「春植物」です。マルハナバチは低地から高山帯まで広く生息し、様々な植物の花粉を運ぶ重要な役割を担っています。マルハナバチの女王バチは夏の終わりに生まれ、地中で越冬し、春に目覚めて巣をつくります。

エゾエンゴサクの球根は冬の間に成長を始め、地表に近いところで出芽のタイミングを待っています。一方、マルハナバチの女王バチは、地表より少し深い地中で冬眠しています。エゾエンゴサクの芽生えとマルハナバチの出現は、ともに待機している場所の温度上昇がシグナルとなります。エゾエンゴサクが先に成長を始め、丁度開花が始まった頃にマルハナバチが現れます。両者のフェノロジーは高い同調性があり、受粉と食料調達という双利的な関係を築いていました。

ところが近年、両者の活動時期にズレが生じる場合が増えてきました。背景にあるのは積雪量の減少に伴う雪解けの早さです。地表付近の温度は、雪解けとともに春の日差しを受けて急速に上昇します。そのため雪解けが早まるとエゾエンゴサクの芽生えも早まる傾向にあり、気温が高いときには芽生えからわずか数日で開花することもあります。一方、マルハナバチが越冬している少し深い地中の温度は、雪が解けてもすぐには上昇しません。私たちが約20年にわたって収集したデータを解析すると、マルハナバチは日平均地温が6度に達した頃に出現することが分かりました。興味深いことに、雪解け時期の変動に対する出現時期の応答は、エゾエンゴサクの開花時期と比べて緩やかなものでした。その結果、雪解けが特別早い年には、女王バチが冬眠から目覚めた時にはすでにエゾエンゴサクの開花がピークを過ぎていた、という事態が起こります。フェノロジカルミスマッチです。

マルハナバチがエゾエンゴサクの花と出会えないことはデメリットではありますが、エゾエンゴサク以外の植物からも蜜や花粉を集められるので、生活を維持していくことはできます。一方で、エゾエンゴサクの開花期間は非常に短い上に、受粉をほぼマルハナバチに依存しているので、ミスマッチが起きた年には結実率が大きく下がります。種子ができないと次世代へ子孫が残せないのです。こうしたミスマッチが数年続くと集団の存続が危うくなります。

■4. ミスマッチは世界中で起きている。

フェノロジカルミスマッチの事例は、世界各地で、陸地だけでなく海でも報告されています。ヒタキ科の渡り鳥であるマダラヒタキは、ツバメと同じく営巣のためにアフリカ大陸からヨーロッパに渡ってきます。ところが木々の開葉もガの孵化も早まっているために、育雛期に十分なエサを得ることができず、ヒナを育てる成功率が激減しました(この事例が、フェノロジカルミスマッチが目撃されるきっかけとなりました)。ヨーロッパではナラの開葉時期が早まる傾向にありますが、ナラの葉をエサとするフユシャクガの孵化時期はさらに早まっており、開葉前に孵化した幼虫が飢餓状態になる危険性が高まっています。また、日本近海では、海鳥ウトウの営巣時期と、エサとなるカタクチイワシが海流に乗ってやってくる時期にズレが生じ、ウトウの繁殖がうまくいかなくなっているという報告もあります。

フェノロジカルミスマッチの影響は、当該生物だけにとどまりません。生態系は様々な生物のネットワークによって成り立っているからです。たとえば、樹木の開葉と昆虫の孵化との間でミスマッチが起きると、幼虫による食害が減って樹木にとってはプラス、食料を得られない昆虫にとってはマイナスです。しかし、それによって昆虫の数が減ると、昆虫をエサにする鳥の数も減る。そのことが、やがては樹木の種子散布にマイナスの影響を与えます。ひとつのミスマッチは、プラスとマイナスを逆転させながら生態系全体に、波及的に影響を広げていく危険性があるのです。

我々人間も、生態系の変容と無関係ではられません。たとえば、花粉を運ぶ昆虫がいなくなれば農業生産に深刻な影響を及ぼすでしょう。漁獲量や魚種の変化は、すでに各地で起きています。これまであたりまえのように享受してきた生態系サービスを受けられなくなる可能性がある——国連が、フェノロジカルミスマッチを「迫り来る重大な環境問題」とする理由も、そこにあります。

■5. 気候変動の速すぎるスピード。

こうしたミスマッチの原因として考えられるのが、近年の気候変動(温暖化)です。産業革命で人間の活動が活発になった1850年代以降、地球の平均気温は上昇を続けており、1988年に設立されたIPCC(気候変動に関する政府間パネル)ではその影響と対策について国際的な話し合いが続けられています。

気温の上昇幅自体はもちろん重要ですが、注視すべきは変化のスピードです。地球は長い歴史の中で温暖な時期と冷涼な時期を繰り返しており、現在より気温の高い時期は何度もありました。しかし、そこに至るまでには数万年という長い時間経過があり、生物が気候変化に適応する余地がありました。近年の気温上昇速度はその数十倍の、地球がかつて経験したことのないスピードで進行する急激なものです。平均気温の上昇だけでなく、気温の変動も激しくなる傾向にあり、集中豪雨や洪水、干ばつといった異常気象も頻発しています(それらを総括する意味で、「地球温暖化」というより「気候変動」という言葉を使うことが理に適っています)。それらの環境変化が、生物の適応力を超えてしまう恐れがある——それが、いま起きている気候変動です。

■6. お花畑が消え、ササが凌駕する。

私の主な研究対象である高山生態系は、少しの環境変化にも敏感に応答するため、「自然の実験系」とも言われています。そこで近年、明らかな変化が起きています。

もともと高山植生は、わずかな標高や地形の違いが作り出す温度や積雪状況の違いなど、微妙な環境の差異によって植物群落のタイプが変わるという特徴を持っています。それぞれの植物が、低温、短い生育期間、乾燥や強風といった厳しい生息環境に適応すべく進化した結果、植生構造がモザイク状に配置された、非常に多様性の高い系をつくっていました。

ところが、近年の雪解けの早さ、気温の上昇、それによる土壤の乾燥化などによって、湿った

ところを好む植物が衰退し、代わりに乾燥ストレスに強いササをはじめとするイネ科植物の分布域が拡大し、植生そのものが単調化してきています。

高山植物というと、色とりどりのお花畑のイメージがあると思いますが、それが単調なイネ科の草原にとってかわる、という現象が各地で起きています。大雪山(たいせつさん)系の五色ヶ原では、わずか5年ほどの間にエゾノハクサンイチゲのお花畑が消失しました。ササの拡大については尾瀬ヶ原や北アルプスでも同様の報告があり、また、世界各地の高山帯やツンドラ地帯でもイネ科植物が急増しています。生態系の変化は静かに、しかし着実に進行しています。

■7. 変化を見逃さない体制づくりを。

喫緊の課題は、温室効果ガスをこれ以上増やさず、気温の上昇を加速させないことです。しかし、具体的な取り組みがなかなか進まないうちに温暖化が進行し、生態系への影響が拡大しているのが実情です。人間の生産活動に由来すると考えられる変化に関しては、手遅れにならないうちにその影響を緩和する対策をとるべきでしょう。ただ、絶滅の心配がある種を取り出して動物園や植物園で保護する、というような方法では、生態系そのものを保護したり維持したりすることにはつながりません。生物群集の多様性と生物間のネットワークをできるだけ損なわないように注意することが必要です。

気候変動の影響の現れ方はローカルな側面が強く、予測をするにも、対策を立てるにも、その地域の生態系に起こりつつある変化をいち早く検出することが重要です。そのためには、できるだけ多くの地域で、できるだけ長期にわたってモニタリングできる体制が欠かせません。調査研究に市民が参加するシチズンサイエンスが拡がりつつありますが、生態系のモニタリングでも、研究者だけでなく一般の人たちの協力を得られるようにすべきだと思います。環境省生物多様性センターが2003年に立ち上げた「モニタリングサイト1000」という環境生態系監視システムでは、日本全国の様々な自然環境に合計100カ所以上のモニタリングサイト(調査地)を設け、100年スケールでの環境データ集積を目指しています。集められたデータは、変化のメカニズムの解明や将来の影響予測の貴重な資料となります。調査には多くの市民ボランティアが参加してくれていますが、こうした活動は、より詳細なデータ収集を可能にすると同時に、気候変動の影響がどのように及んでいるのかを一般の人々に理解してもらうためにも有効だと思います。

こうしたデータを基に生態系の変化を引き起こすメカニズムを解明し、将来起こりうる影響を予測することが、有効な対策につながります。気候変動は現在進行形であり、その影響は速度も方向性も刻々と変わっていることを念頭に、変化に応じた手段を模索していくことが必要です。

■8. 生態系全体を俯瞰する視点が重要。

気候変動の危険性を伝えるニュースは少なくありませんが、ともすると、豪雨や干ばつによる

「被害」のような人間に直接関係のある現象だけを取り上げたり、ホッキョクグマやサンゴなど象徴的な生物をクローズアップしたりしがちです。しかし実際には、気候変動は地球上のすべての生物と地域に影響を及ぼします。点ではなく生物間のネットワークを、人間との関係だけではなく、生態系そのものを、俯瞰する視点が重要になると思います。

もちろん、森林も例外ではありません。八甲田山ではブナ林やオオシラビソ林の、富士山ではカラマツ林の分布域が上昇していることが報告されており、山岳生態系にも変化が起きていることがわかっています。ツンドラではそれまでなかった樹木が侵入し、既存の植物が減少しています。森林は陸上生態系を構成する非常に重要な要素なので、そのフェノロジーの変化は生態系全体に莫大な影響を与える可能性があります。林業のスタイルも必然的に変わっていくかもしれません。多様な生物間ネットワークを維持するという意味で、多様な森林をつくる重要性も増すのではないのでしょうか。

フェノロジーをはじめとする生物の営みは、長い時間をかけて進化し、獲得してきた個々の生物の生存戦略です。それが、人間の活動という、地球の歴史からすればほんの一瞬のできごとのために損なわれるとすれば、手をこまねいているわけにはいかないと思います。生態系に対する人間の理解は、まだまだ十分ではありません。フェノロジカルミスマッチのように、気候変動がこれだけ大きな問題になってようやく気づいた生物間のつながりも多くあります。加えて、私たちは体験したことのない激しい気候変動の中において、まだその影響を正確に予測することができずにいます。だからこそ、取り返しのつかない状況になる前に、いま目の前にある生態系の仕組みを見つめ、人間との関係を築き直すことが求められていると思います。

[工藤 岳]

北海道大学大学院 地球環境科学研究院 准教授。

1962 年東京生まれ。東京農工大学農学部林学科卒業、北海道大学大学院環境科学研究科博士課程修了。博士(環境科学)。北海道大学大学院地球環境科学研究科助手を経て現職。北海道・大雪山系の高山植物の生態を中心に 30 年以上にわたるフィールド調査を通してその動態を明らかにしてきた。気候変動の高山生態系への影響についても国際的な調査を行なうなど継続的な研究を行なっている。主な著書に『日本の高山植物』(光文社)、『生物学者、地球に行く』(小林真氏とともに責任編集、文一総合出版)、『大雪山のお花畑が語ること』(京都大学学術出版会)、『高山植物の自然史』(編著、北海道大学図書刊行会)など。