

バランス・オブ・ネイチャーと身近な生物進化の驚きの関係

内海 俊介

バランス・オブ・ネイチャー

—自然とは本来的に見事に調和が保たれているものである(そして、人間がその調和を乱している)—。地球環境問題、災害、極端気象などを前にして、自然に対するこのような考え方を多くの現代人が共有しているかもしれません。この考え方は、人の文化史においてとても古くからあるものです。古代ギリシャのヘロドトスは、食うものと食われるものの数についての考察から、「完璧な自然の調和」を着想しました。以降、ローマのキケロ、チャールズ・ダーウィン、さらには「沈黙の春」で名高いレイチェル・カーソンに、ディズニーのライオン・キング、ジブリのアニメーションなど、脈々と受け継がれていると言えます。この考え方にある「自然の調和」が、英語で Balance of Nature (バランス・オブ・ネイチャー) と呼ばれています。

自然の調和、バランスという言葉の意味は、かつて西欧では「完璧な恒常性」を指していました。しかし、とても曖昧な語であるため、さまざまな文脈でさまざまな意味で使われます。よく見ると、まったく正反対の2つのイメージで使われることが分かります。一つには、脆弱で繊細な調和のもとにある自然(だから、積極的に介入し、守らなければならない)、もう一つには、人の力の及ばない力強い回復作用をもつ自然(だから、何もしなければ元に戻るのもよしなくてよい)。

古くは生態学者もこの考え方を共有していました。しかし現在では、このナイーブなイメージが誤りであることを私たちはすでに知っています。自然に内在する「完璧な恒常性」など存在しないのです。もちろん、複雑な自然界では、多様な生物種や環境の作用と反作用が絡み合い、さまざまな生態系の機能が制御されています。しかし重要なことは、それらはきわめて条件依存的で、ダイナミックに変化する世界であるということです。バランス・オブ・ネイチャーは、そのように再定義されなければなりません。今回の講座では、多様な生物が織りなす、条件依存的な自然生態系のダイナミズムについて、私たちが新たに明らかにしてきた知見をご紹介します。

生物の進化

ここで鍵となるのが生物の進化です。進化という言葉は、何万年もかけて新しい種が誕生するような現象をイメージさせるかもしれませんが、それは間違いではありませんが、進化とはもっとありふれた身近な現象なのです。それは、生物個体群において遺伝する性質が世代を経るにつれて変化することとして定義されます。より厳密に、進化とは個体群内の遺伝子頻度の変化とも言います。実は、生物の進化は、数世代、1ヶ月から数十年というほどの時間スケールでとてもすばやく起こることが、現在では数多く確かめられています。このようなすばやい進化のことを迅速な進化と呼びます。

迅速な進化が頻繁に起こっていることを納得するには、さまざまな人間活動が生物の進化に与える影響について見てみるのが良いでしょう。たとえば、農薬に対する昆虫の抵抗性の進化は古くから知られます。最近では、バチルスという細菌の遺伝子を新規に導入した遺伝子改変作物（GM作物／Bt作物）にさえ、昆虫類が急速に適応進化をしている可能性が高いことが報告されています。また、古典的な事例としてもっとも有名なのは、19世紀後半におけるオオシモフリエダシャクの工業暗化です。

他にもたとえば、漁業はさまざまな魚種の進化の原動力となっています。漁業においては、大型個体への選択的な漁獲がしばしば大規模に行われます。乱獲による個体数への影響が取りざたされますが、魚に対する淘汰圧としても強く働いています。そしてそのような淘汰圧に対する適応進化の結果として小型化するという現象が報告されています。それだけでなく、同時に、成熟までのスピードが変化することも明らかにされています。あるいは陸域でも、ハンティングが大型哺乳類の角の形態の進化を駆動したという例もあります。

都市化に対するシロツメクサの進化

ここで、札幌で、私たちのまさに足元でおこっていると考えられる進化の話を紹介します。誰もが知っている植物の一つにシロツメクサがあります。牧草や緑化植物としてよく使われますが、花冠をつくって遊ぶ、四つ葉のクローバーを探す、それ以外にほとんど注意を払われることはないかもしれません。このシロツメクサ、実は青酸ガスという毒物を作るという面白い性質を持っています。これはナメクジや小動物から食べられるのを防ぐのに役立つ防御物質だと考えられます。私たちは、札幌などを中心に、青酸ガスの生産個体について調べました。すると、身を守る大事な性質のはずですが、野外では青酸ガスを作ることができない個体はかなり多く存在することがわかりました。道庁周辺や北大など札幌の中心部では、ほとんどの個体が青酸ガスをつくることはできません。しかし、郊外へ行くほど、青酸ガスをつくる個体の頻度が多くなることが分かったのです。青酸ガスの生産には主に2つの遺伝子の働きが関与しています。青酸ガスが作れないという個体は、この遺伝子に変異があるということです。したがって、都市中心から郊外にむかう青酸ガスを作る個体の頻度の変化は、シロツメクサ集団内でのこの遺伝子の変異の割合によって説明されます。言い換えれば、都市中心では、青酸ガスを作らないことが有利で、郊外に行くほどガスを作ることが有利であるために、それぞれで異なる進化が今まさにおきているということです。



図1. 進化するシロツメクサ

樹木の根粒共生—進化—昆虫多様性への波及

次に紹介するのは、カバノキ科のケヤマハンノキ（以下、ハンノキ）をめぐる物語です。

この樹種は日本全国に広く分布し、水辺を好みます。ハンノキは、その根に特殊なバクテリアをすまわせており、それによって、空気中の窒素を直接栄養として取り込むという珍奇な能力を持っています（根粒共生といい、シロツメクサにも同じ能力があります）。一般に植物は土の中の水に溶けている窒素を根から吸収することで栄養を獲得できますが、空気中に大量にありあまる窒素を吸収することはできません。しかし、ハンノキはこのバクテリアとの共生によって、それができるのです。

私たちは、北海道北部の広大な森林において、特殊なバクテリアとハンノキの共生の謎にせまるべく、次世代シーケンサーという装置を用いた遺伝的多様性の網羅的な調査を行っています。すると最近、とても面白いことがわかってきました。まず、土の中には驚くほど遺伝的に多様なバクテリア・グループが存在することが分かりました。しかも、それがハンノキの根元に集中している局在しているのです。また、場所によってそのバクテリア・グループの構成は異なっていました。しかし、それにもかかわらず1本1本のハンノキの木は、複数のバクテリア・グループと実際に共生関係を築いていましたが、どの木もほとんど特定のバクテリアのみと共生をしていました。さらに驚くべきことに、それぞれの場所に特有のバクテリア・グループから特定のバクテリア・グループのみをうまく抽出して共生させるというプロセスに、ハンノキの遺伝子の変異が大きく関与していることが分かってきたのです。もう少し分かりやすく説明します。共生関係とはいつも利益を与え合うパートナーによって形作られているわけではなく、つねにズルをするような寄生的なものがあらわれます。したがって、ハンノキは、巧妙にそれをフィルタリングする能力を兼ね備えていると考えられます。つまり、異なる場所において、それぞれに特有なバクテリア相からもっとも利益的なパートナーを選び、寄生的なものは排除する、もっとも効率的なフィルタリング能力をもつという局所的な適応進化が生じていると考えられるのです。

さらに私たちは、これらの樹上に生息する昆虫を2年間採集し、昆虫の多様性についても調査を行いました。これらのデータを解析した結果、ゲノム変異が大きなケヤマハンノキの間ほど、異なる昆虫種の組成の集合が形成されていることが明らかとなりました。この関係がどれほど強いのか、そして、野外のそのほかの要因との相対的重要性がいかほどかを明らかにするために、地理的な距離や調査時期の違い、さらには河川経路を介した距離や周辺樹種構成という景観的要素についても考慮した複雑な解析もやってみました。すると、これもまた驚くべきことに、昆虫群集の種組成の違いについて60%~80%もが、ハ



図2. ケヤマハンノキの繁茂する北海道の河畔林（上）と根粒共生（下）

シロノキのゲノム変異によってのみ説明されたのです。さらに、種の組合せの年変動にさえ、ハンノキのゲノム変異は影響していました。土の中の細菌との間での進化を反映した個々の樹木のゲノムは、樹上にくらす多様な生物種の集合を理解する大きな鍵であることが分かったのです。

生態系における進化のフィードバック

最後に紹介するのは、植食性昆虫の寄主植物に対する摂食行動の「今ここにある」迅速な進化を中心としたダイナミックな世界です。ヤナギリハムシ（以下ハムシ）という昆虫は、成虫も幼虫もヤナギ科の植物を食べてヤナギの上で一生を過ごす植食性昆虫です。このハムシには、出葉してすぐのヤナギの新葉のみを選び好みして食べる成虫（スペシャリスト型）とそうした選り好みせず成熟葉も食べる成虫（ジェネラリスト型）という種内の遺伝的変異があります。

このスペシャリスト型・ジェネラリスト型の進化は、周りにいる他の昆虫たち（イモムシやアブラムシ）の違いによって起こります。イモムシが多い程、ヤナギの新葉が多くなりスペシャリスト型が進化し、アブラムシが多い程、質の良い新葉ができずにジェネラリスト型が進化するのです。このようなジェネラリスト→スペシャリストという進化、あるいはジェネラリスト→スペシャリストという進化は、さまざまな場所でおこっています。たとえば、石狩川流域の15地点でこの進化を観測したところ、1年のうちにこの進化が起きている場所がありました。

そして、この進化は、周りの昆虫たちにも影響を与えています。スペシャリスト/ジェネラリスト型という摂食行動の違いは、樹木の上で食べる部位の違いにつながります。それは、いくつかのメカニズムを通じて、その樹上にくらすアブラムシやイモムシの多寡に影響を及ぼすことが分かっています。つまり、ハムシの進化とまわりの昆虫の多様性の間には、フィードバックする関係があり、それがグルグルまわりながら双方の多様性、すなわちハムシの遺伝的な多

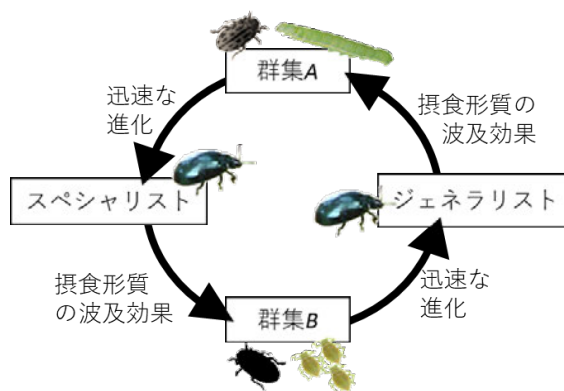


図 3. ハムシ進化をめぐるフィードバック

様性と、昆虫の種の多様性が維持されるようなのです。このようなフィードバックの例は他の生物群でも実際に少し報告事例があり、私たちの目にはぱっとはわからないところで、あるいは何も変わっていないと思われるところでも、めまぐるしく自然がグルグル回っていることが示唆されます。その一方で、先にあげた石狩川流域の進化観測では、進化がおきていない場所も見つかりました。このフィードバックがまわりやすい環境条件、まわりにいく環境条件というものもあるようです。それを明らかにすることもまた自然の理解において重要でしょう。