

気候変動に伴う生態系影響と適応

東北大学生命科学研究科教授 中静 透

はじめに

2014年に発表された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第5次評価報告書（AR5）では、AR4に引き続き「気候システムの温暖化には疑う余地はない」という、確信度の高い記述がなされている¹⁾。実際に、1880年から2012年の間に世界の平均気温は0.85℃上昇しており、今世紀末までにさらに、可能な限りの緩和策をしても0.3～1.7℃、緩和策をしない場合には2.6～4.8℃の上昇が予測されている。日本でも、最近100年間に平均気温が1.15℃上昇していると報告されている²⁾。この温度変化は南北方向では約200km、標高でいえば約200mに相当する温度差である。温度だけでなく、降水量や積雪、さらには集中豪雨や台風などの極端現象についても、さまざまな変化がすでに観測され、予測もされている。

こうした、すでに生じている気候条件の変化に対して、生態系の変化も世界各地で報告されている。IPCC AR5 第2作業部会（WG2）の報告でも、「すべての大陸と海洋で気候変動による自然及び人間システムへの影響が引き起こされている」と述べられており、主要なリスクの中に、海洋・沿岸、陸域・陸水などの生態系や生物多様性、およびそれらからもたらされる生態系サービスの低下が挙げられている。確かに気候変動の影響は、生物や生態系の反応に敏感に現れると考えられるが、一方で生物の反応は複雑であり、必ずしも確実に気候変動の影響と特定されるケースは多くない。また、日本では気候変動の影響に関する研究自体が豊富とはいえず、予測の確度も低い。

この小論では、日本の生態系のうち、特に森林を中心とした陸域生態系に

的を絞り、気候変動の影響と適応策について述べる。気候変動が生態系に与える影響とそのメカニズムを概観し、その特徴について整理する。また、それを考慮した適応策の方向性について論じてみたい。

生態系影響とそのメカニズム

すでにさまざまな影響が報告・予測されているが、それらを大別すると、1) 分布の移動と種の絶滅、2) 生物季節の変化、3) 生物間相互作用の変化、4) 生態系の機能およびサービスの変化の四つに区分できるであろう。具体的な例は、この本の他の章に詳しいので、ここではその概要を包括的に述べる。

1) 分布の移動と種の絶滅

気候変動が生態系や生物多様性に与える影響として最もよく知られているのは、生物の分布変化であろう。この場合、飛翔能力のある昆虫や鳥類は移動能力が大きく、温暖化によって分布を北に拡大しているものが知られている。昆虫は越冬の温度条件が分布を決めている場合も多く、最低気温の上昇

に伴ってその分布域が北上しているといわれる。鳥類でも、気温の上昇によって越冬地がより北方へ移動したことが知られているほか、越冬地での温暖化が個体数増加を招いているという推定もある。

移動速度が遅いと考えられている植物についても、散布された種子の定着によって新しい生息域を獲得すると同時に、個体の死亡によって旧来の生息地を失うことで移動が起こる。茨城県の筑波山では常緑樹のアカガシが標高の高い地域に分布を広

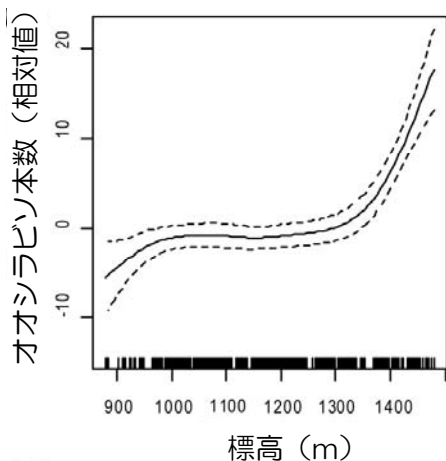


図1 八甲田山におけるオオシラビソの本数変化と標高。過去と現在の空中写真を用いてオオシラビソの本数を標高別に計測したもの。Shimazaki et al. 2011を一部改変。

げる一方で、頂上でもほとんど分布の下限に近いブナでは枯死する個体が目立っている³⁾。同様に、青森県の八甲田山では、亜高山の針葉樹であるオオシラビソが分布下限で個体数を減らし、上限付近で増加させていることが分かっている（図1）⁴⁾。こうした植物の分布環境を統計的に解析し、温暖化予測シナリオに応じて将来の分布適域（分布する環境として適している地域）を推定する手法も進んできた。それによれば、温暖化によって、ブナ林や亜高山帯林の分布適域は大きく減少する一方で常緑樹の分布可能地域が拡大すると予測されている³⁾。

分布域の変化が最も深刻な事態に至ると、種が絶滅することになる。高山植物については非常に深刻な状況が予測されている。もともと、日本の高山植物は氷期に広い分布域を持っていた植物が、温暖化に伴い、山頂部分にわずかに残った遺存種が多い。わずかな個体群が特殊な環境の場所に生き残ったもので、シベリアなどの個体群と比べると遺伝的な多様性も低い。また、日本の高山はまれに見る多雪環境や強風という条件で樹木が育たないため、山頂の標高は高くないものの高山植生が形成されている場合が多い⁵⁾。実際に、ヨーロッパや北アメリカと比べると、日本の高山帯は同緯度でも標高の低い場所に残っており⁶⁾、より脆弱であることが予想される。今後の気候変



写真1 山地湿原と積雪。山地湿原では、消雪とともに湿原の植物が生育を開始していくため、消雪の時期が変化することによって、植生が大きく変化する。積雪期間が短縮し、乾燥が進むと樹木が湿原に侵入していく

動で、積雪量あるいは積雪期間が減少することが予想されており、これまで低標高にもかかわらず残っていた高山植物や植生にとっては相当数の種の絶滅を含む厳しい状況が懸念されている。

同様に、高層湿原や山地湿原なども近年縮小傾向にある⁷⁾。高山植物と同様、気温とともに積雪が重要な役割を果たしていると考えられるため、その影響予測には積雪に関する予測を考慮する必要がある。この生態系にも貴重な生物が多数含まれているので、保全を考える上で重要性は高い（写真 1）。

一方、シカの分布拡大も気候変動の影響で説明されることがある。これまであまり見ることもなかった多雪地や高山帯にもシカの分布が広がっている⁸⁾。さまざまな地域で高山植物に対するシカの食害が問題となっているほか、原生林でも皮剥ぎや林床植物の食害が問題になっている。しかし、江戸時代にはほぼ日本全体にシカが生息していたことが分かっており、現在の分布拡大現象は再進出と呼ぶべき問題である。基本的には最近数十年間で急速に個体数が増えていることが大きな原因となっているが、この動きを気候変動が加速させている可能性がある。

2) 生物季節の変化

気候条件が変化することによって、開花や繁殖などの生物季節が変化する現象もすでにいくつかの種で報告されている。開花や開葉、紅葉などに温暖化の影響が報告されている。また、動物でも、鳥の産卵時期が変化している例などが報告されている。開花は積算温度などで制御されている場合が多いが、中には冬季の低温を経験しないと開花しない種もあり、こうした気象刺激が変化することによって、生物季節が乱される場合がある。また、温度ではなく、日長のように気候変動の影響を受けない要因によって生物季節が制御されている場合もあるし、よくメカニズムが分かっていない生物も多い。さらには、植物の生理が日長で決まっているのに対して、その植物を資源とする昆虫は気温で制御されている場合などがあり、開花しても送粉昆虫がいなかったり、植物を食べる害虫がこれまでとは異なった時期に発生したりといった影響が生じている⁹⁾。気候変動によって変化する刺激と変化しない刺激の組み合わせにより、こうした生物季節の変化がこれまで共生してきた生物間にも齟齬^{そご}をきたす可能性がある。

3) 生物間相互作用の変化

分布の変化や生物季節の変化は、その種だけでなく、その種が相互作用を持っている他の種にも影響を及ぼす。ある植物の花粉を運ぶ昆虫や種子を運ぶ鳥類が、温暖化によって先に生息域を移動させてしまうのに対して、植物の移動が遅れるようなケースがあれば、植物の繁殖に影響が出る。また、前述のような共生、寄生する生物相互間の生物季節のズレが生態系レベルでの影響につながるケースもあるだろう。

樹木の病気を媒介する昆虫が温暖化の影響を受けることにより、病気が北方へ分布を拡大する例もある。松枯れの場合はマツノザイセンチュウを運ぶマツノマダラカミキリの、ナラ枯れの場合も病菌を媒介するカシノナガキクイムシの生活史によって、病気の分布北限が決まっているといわれている。これらの病気を媒介する昆虫の分布北限よりも北あるいは高標高域にもマツ類やナラ類が生育しており、現時点ではこれらの病気から逃れることができているが、温暖化が進めばその限りではなくなる。その他にも、害虫の分布範囲が温度条件の制約を受けている場合は多いと考えられており、温暖化によるさまざまな影響が懸念されている⁹⁾。

このように、気候変動は生物間相互作用の変化を引き起こし、現在の食物網や共生関係とは異なった生物間ネットワークの形成につながる可能性がある。どのようなネットワークになるのか予測は難しい。また、現在の生態系は長い時間を経て比較的安定なものになっているが、形成されてから時間を経っていない新しい生態系はより不安定である可能性が高いだろう。

4) 生態系の機能およびサービスの変化

気候変動の影響は、単に生物や生態系そのものの変化だけでなく、それを通じてその機能や生態系サービスにも及ぶ。北方の森林では、地下部に貯蔵された有機物量が相対的に大きい。現在は、低温条件がこうした有機物の分解を妨げているが、温暖化によって分解が進むことにより、森林が二酸化炭素の放出源になる可能性も指摘されている²⁾。そのことによって、さらに温暖化が促進される可能性も懸念されている。炭素だけでなく、温暖化によって土壌栄養塩の無機化速度なども変化するため、森林や流域全体での栄養塩収支も変化すると予想されており、河川の水質などへの影響もあるだろう。

害虫や病気の分布範囲が変化することは、農作物や人工林でも起こり得ることであり、利用できる生態系資源としてもマイナスの影響を受ける可能性がある。森林での病気の拡大は、森林が持つ土壌保全や洪水制御などの生態系サービスの劣化にもつながる。また、送粉昆虫が分布をシフトさせれば、作物や果実に必要な送粉サービスが受けられなくなる可能性がある。

温暖化による森林組成の変化がスムーズに起こればよいのだが、何らかの理由で一時的に森林が荒廃することは十分考えられる。例えば、ブナ林と亜高山帯林の境界付近では、亜高山帯林が衰退して温度的にはブナ林の適域になったとしても、ササ類などの林床植生が繁茂してブナ林の更新を妨げ、スムーズな樹種交代が起こらない可能性もある。そのような場合には、森林がすぐに成立しない場合もあるだろう。また、台風の巨大化などによる森林被害の増加も懸念される。樹木は一般に長い寿命を持つので、仮に気候条件が変化してもすぐに森林が変化するということはないかもしれないが、巨大化した台風によって森林が攪乱を受け、それがきっかけとなって種の交代が急速に進む可能性も考えた方がいいだろう。この予測の確信度は高くないが、こうした森林の荒廃によって生態系サービスの劣化が起こるリスクがある。

竹林の分布拡大も温暖化の影響を受ける。最近数十年間で、西日本を中心にモウソウチクやマダケの利用が衰退し、管理が行われなかったために竹林が拡大を続け¹⁰⁾、森林の衰退や土壌侵食などで問題視されている。これまで、こうしたタケ類は東北地方に北限があり、東日本では西日本ほどの拡大速度は見られなかったが、今後の温暖化で拡大する可能性があり、さまざまな影響を及ぼすことが懸念されている。

逆に、生物種の分布移動が起こっても生態系の機能やサービスには大きな変化をもたらさない可能性もある。森林の構成種が変化しても、現存量や生産速度に大きな変化がなければ、土壌保全や洪水防止などの生態系機能には大きな変化は起こらないという場合もあるだろう。

温暖化が与える影響の特徴

気候変動が起こっても生物の順化や適応（進化）に十分な時間があれば、生態系への影響は少ない。地球の歴史の中で気候変動は何度も起こってきた

が、生物はそれらに対して適応し、生物間相互作用の中で生態系を形作ってきた。しかし、現在起こっている気候変動はそのスピードが非常に速く、これまでの生物の進化スピードでは対応できない可能性がある。気候変動以外にも他の人間活動によって、生物や生態系が改変されてきているため、変化に対して反応する力も劣化しているだろう。

気候変動が生態系や生物多様性に与える影響には、いくつかの特徴がある。まず、影響の予測に関する不確実性が高いという点である。気候変動予測そのものにも不確実性があるが、生物・生態系に関してはそれが特に大きい。生物の反応は、単一の気象条件だけでなく、複数の気象刺激によって影響を受けるため、例えば、温度条件の変化だけでは確実な予測が難しい場合がある。また、生物の分布を決める要因の中には、数年に一度の低温というような極端な気象条件が重要なものが少なくない。

また、食物網や共生関係など複雑な生物間相互作用のために、ある生物の変化がカスケード的に他の生物に及び、予測の不確実性が大きくなる。ある場合には、温暖化によって、これまでの送粉や種子散布などの共生パートナー

複数安定状態の転換点

シカの採食が引き起こす森林衰退

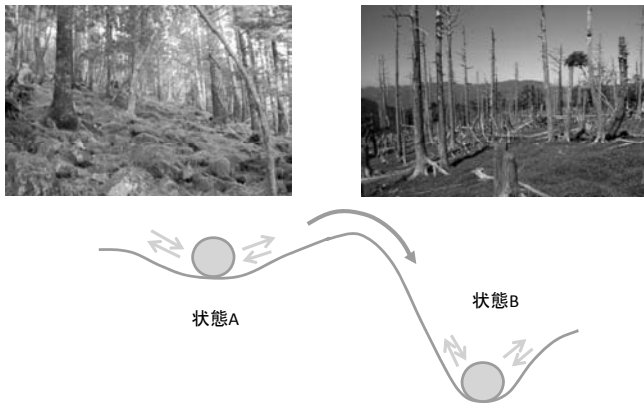


図2 レジームシフトの例。状態Aで安定していた生態系が、条件の変化によって別の状態Bで安定する。森林として数千年間続いてきた植生が、シカの食害や台風被害などによって、ササ草原として安定してしまう例。

を失い、新しいパートナーと共生せざるを得ないというケースも出てくるだろう。天敵と餌生物の組み合わせも、これまでとは異なったものになる可能性がある。温暖化の結果として、そうしたこれまでにない生物組成の生態系が生まれる可能性もある。また、侵略的侵入種の分布が北上して被害を広げる、というようなケースもあるだろう。

生態系の変化は常に連続的な形で起こるとは限らない。レジームシフトと呼ばれる、ある閾値（ティッピングポイント）を超えた場合に不可逆な変化となったり、元に戻りにくくなったりする変化がある（図2）。北方林の炭素収支は、ある温度条件を超えると土壤中の二酸化炭素が放出側に変化し、森林全体としても吸収から放出へ加速度的にシフトする現象が懸念されている。湖沼の生物群集についても、栄養塩や温度の条件がティッピングポイントを超えると、その条件が戻ったとしても、すぐに元には戻らないケースが報告されている¹¹⁾。

種の絶滅は不可逆な現象であり、一度絶滅した種を復活させることはできない。群集を構成するキーストーン種が絶滅するような場合には、生態系全体がまったく別のものに変化してしまう可能性も否定できない。

気候変動の影響は、他の人間活動の影響によって増幅されることが少なくない。自然の状態であれば、それぞれの生物の持つ生活史に従って分布をシフトさせることが可能であるが、多くの場合、こうしたルートを人間の土地利用が阻んでいる。また、河川など淡水生態系では人工構造物によって分断化が進んでいるし、外来生物も分布を拡大しているため、温暖化によるマイナスの影響がより大きくなっている。こうした複合効果の影響を考慮する必要がある。

どんな適応策が可能か？

自然生態系や生物多様性に目を向けた場合、温暖化の適応策として有効性の高い方法は少なく、その多くが消極的な対策とならざるを得ない。その基本的な考え方として最も重要な点は、先に述べたように、温暖化以外の要因を取り除き、温暖化の影響を最小化することであろう。例えば、分布移動の障害となるような土地利用を避けたり、分布移動を促進するような自然再生を計画したりという対策が重要である。注意したいのは、温暖

化適応策として行われる構造物の建設や造成などが、生態系の劣化を招いたり、生態系の適応を遅らせたりする場合もあることである。また、できるだけ生物の自然な分布変化を促し、自然状態ではあり得ない移動や生態系の再生を行う場合には、慎重であるべきだろう。安易な生物の移動は、新しい地域での別な問題を引き起こす可能性がある。もともとの分布域周辺にレフュージア（退避地）となり得る場所が存在するのであれば、そうした環境を利用できるよう、情報も整備しておく必要がある。基本的には、現在の保護地域を拡充し、生態系ネットワークを形成することがレジリエンス（抵抗力）を高めることになる。

高山植物などは、もし予測通りの気候変動が起これば、かなりの数の種が絶滅の危機に陥る。この時、種の絶滅を避けるための手順をあらかじめ、想定しておくことも重要である。可能な限り現地保全を目指すのは当然としても、現地外保全や最終手段としての種子、DNA での保存に至るまでの段階的な手順を十分考えておく必要がある。

レジームシフトに関しては、どのようなケースで起こり得るのか、あるいはティッピングポイントを見極められるかという点について、まだ十分な情報がない。可能性を持つ現象の洗い出しを急ぐとともに、メカニズムと可能な対策の解明を急ぐ必要があるだろう。

最近では、温暖化の緩和策と適応策を統合化する動きもある。特に森林生態系の保全は、炭素蓄積を保つとともに生態系や生物多様性の適応策にもつながる可能性があり、統合化につながる有効な手法開発の可能性がある。途上国向けに考えられている REDD+（森林の減少・劣化による二酸化炭素排出量を削減する活動）なども、類似の奨励策を国内向けに設計することも可能であるとする。

また、生態系を保全することが他の気候変動影響に対する適応策になり得る可能性もある。例えば、海岸の干潟や湿地の保全と構造物をうまく組み合わせることで、高波などの防災策となり得る。森林生態系を保全・拡充することが CO₂ の吸収と同時に生活空間における温度そのものを下げる効果がある。こうした生態系を利用した適応（Ecosystem-based adaptation）なども、適応策として積極的に考えるべきであろう¹²⁾。

おわりに

生態系に対する気候変動の影響予測は、他の分野より遅れている傾向がある。それは、生態系や生物多様性の持つ不確実性が大きく、有効なモデルの開発が難しいという点が効いているが、一方では、生態系に対する気候変動の具体的な影響を評価し、適応策を練るためには、現在の気候モデルの解像度が粗すぎるという点も見逃せない。最近の気候変動の予測モデルは、適応策を意識して次第に解像度は高くなってきているので、開発された解像度の高いモデルを利用した影響予測と空間情報化を急ぐ必要があるだろう。いずれにしても、気候変動はすでに始まっており、できるだけ確信度の高い予測を基に、無駄のできるだけ少ない適応策を考えていくべきである。

〔引用文献〕

- 1) IPCC AR5 WG2
- 2) 文部科学省・気象庁・環境省 (2013) 「気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート. 日本の気候変動とその影響 (2012 年度版)」
- 3) 中尾勝洋ら (2009) 日本における常緑カシ類 2 種の個体および優占林の分布を規定する気候条件. 森林立地学会誌 森林立地 51, 27 ~ 37.
- 4) Shimazaki et al. (2011) Environmental dependence of population dynamics and height growth of a subalpine conifer across its vertical distribution: an approach using high-resolution aerial photographs. *Global Change Biology* 17, 3431-3438.
- 5) 増沢武弘 (2009) 「高山植物学」. 共立出版.
- 6) Körner, C. (2003) "Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystems", Springer.
- 7) 安田正次ら (2007) オルソ化航空写真の年代間比較による山地湿原の植生変化の検出, 地理学評論, 80, 842-856.
- 8) 奥村忠誠ら (2009) ニホンジカ (*Cervus nippon*) の分布拡大に影響を与える要因. 環境学会誌, 22(6) 379-390.
- 9) 桐谷圭治・湯川淳一 (編) (2010) 地球温暖化と昆虫. 全国農村教育協会.
- 10) 染矢 貴ら (2010) 自然環境情報 GIS と国土数値情報を用いた日本全域の竹林分布と環境要因の推定. 景観生態学 15, 41-54.
- 11) Leadley, P. et al. (2010) Biodiversity Scenarios: Projections of 21st Century Change in Biodiversity, and Associated Ecosystem Services: a Technical Report for the Global Biodiversity Outlook 3. CBD Technical Series 50.
- 12) IUCN (2009) "Ecosystem-based Adaptation: A natural response to climate change" .