

自然林と人工林における気候温暖化の影響と適応策

森林総合研究所北海道支所地域研究監 田中 信行

1. はじめに

地球表面の温度は、過去 132 年間に 0.85°C の上昇が観測され、今後 100 年間でさらに $0.3\sim 4.8^{\circ}\text{C}$ の上昇が予測されている (IPCC 2013)。気候温暖化は、植物の季節性や成長、動植物の分布など自然の様々な面に大きな影響を与える (IPCC 2014)。森林は、日本の国土の 67% の面積を占め、水源涵養、炭素の貯留、林産物の供給、観光などの生態系サービスを通して国民の生存基盤を形成している。森林には、植栽によって成立する人工林と、樹木自らの繁殖 (天然更新) で成立する自然林がある。温暖化の影響は、人工林では成長や病虫害の変化に、自然林では天然更新を通して構成種の優占度や組成の変化に現れると考えられる。このような変化によって悪影響が出ないように行う対策 (適応策) は、自然林と人工林で大きく異なる。

2. 自然林への影響予測と適応策

自然林は、野生生物の生息地としての機能が人工林よりも高い。現在進行する温暖化に対して、生態系や生物多様性を保全する対策 (適応策) が、自然林管理の今世紀の重要な課題である。地球は長い歴史の中で気候変動を繰り返してきており、生物はそれに適応しながら分布域を変化させ、同時に進化してきた。現在進行する温暖化により、世界の動植物の 20~30% の種で絶滅リスクが高くなると予測されている (IPCC 2007)。植物分布は、固定したものではなく、現在進行する温暖化の影響を受けてゆっくりと変化して

いる。西欧州の植物 171 種の分布が過去 100 年間に 10 年で平均 29m 上昇したことや (Lenoir et al. 2008)、世界の 1700 種以上の生物の分布が 10 年で平均 6.1km 北上したこと (Parmesan and Yohe 2003) が報告されている。

効果的な適応策の実行のためには、温暖化に対して脆弱な部分の特定が必要である。近年、分布予測モデルを用いて、種や生態系の将来の潜在生育域(分布が可能な環境をもつ地域)が予測され、温暖化に伴う脆弱な種・生態系と地域が推定されている(松井ほか 2009、田中ほか 2009)。分布予測モデルとは、種・生態系の天然分布と気候要因など環境要因の関係を統計解析する手法で、正確に分布を予測するモデルが作れば、分布を規定する環境要因と閾値が明らかになり、将来の気候条件をモデルに組み込むことにより将来の潜在生育域が予測できる。温暖化に伴い潜在生育域から外れる分布域は、脆弱な地域と推定される。一方、温暖化に伴い潜在生育域は北方や高標高に移動するので、新たな潜在生育域への生物の侵入が可能になる。固着して生育する植物が移動するためには、種子を散布し新たな生育地に定着することの繰り返しが必要である。植物の移動速度は種によって異なるが、樹木の移動速度は遅く、温暖化に伴う潜在生育域の移動には追いつけず、潜在生育域であるにもかかわらず分布しない地域(不在生育域)が将来広がると予想される。

日本には亜熱帯から高山帯(寒帯)まで幅広い気候帯があり、生育する 6000 種以上の植物は異なる分布域を持っている。温暖化に伴い、冷温帯、亜高山帯(寒温帯)、高山帯の種の潜在生育域は縮小し、亜熱帯と暖温帯の

種の潜在生育域は拡大すると予測されている。日本国内に南限のある冷温帯から高山帯の多くの種では、温暖化に伴い、南限地域では絶滅し北限地域では分布拡大が遅い可能性がある。亜熱帯・暖温帯の種では、潜在生育域が拡大するが、やはり潜在生育域の拡大には追いつけない場合が多いと予想される。

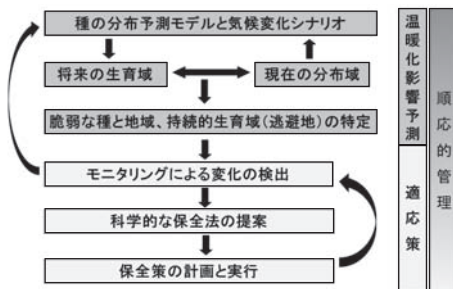


図 1 自然生態系における温暖化の影響予測と適応策の関係

分布南限などの脆弱な地域、分布北限などの分布拡大域では、温暖化の影響が現れやすいと予想される。しかし、適応策を実施するためには、予測だけでなく、実際に起こっている事実を把握するために現地調査を定期的に行うモニタリングが必要である。温暖化影響予測とモニタリングの結果に基づき、緊急性のある事案を選別し、適切な保全策を実施することが賢い適応策と考えられる（図 1）。

ブナの場合

ブナは、北海道南部から九州にかけての冷涼で湿潤な地域に広く分布する落葉広葉樹で、日本の代表的自然林であるブナ林を形成する。日本のブナ林は、世界的に見ても面積が広いことや自然度が高いことが特徴で、白神山地はブナ林の価値に基づき世界遺産に指定されている。温暖化のブナへの影響予測と適応策に関する研究（Nakao et al. 2013）を紹介する。

ブナ個体の分布を気候要因から予測するモデルを構築し、温室効果ガス排

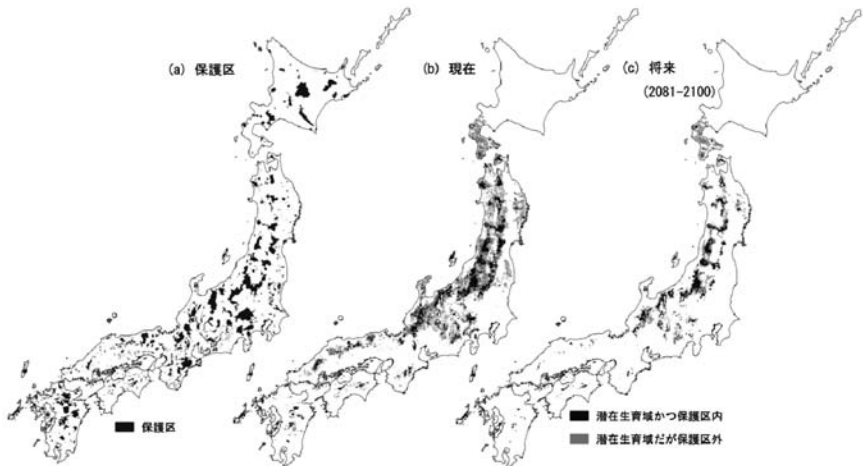


図 2 現在および将来のブナの潜在生育域と保護区の比較
a) 保護区、b) 現在気候下における潜在生育域、
c) 2081～2100年の気候下における潜在生育域

100年間のブナの移動は小さいので、潜在生育域はブナの分布域の範囲で予測されており、現在・将来とも分布北限以北に拡大しない予測になっている。保護区には、国立公園、国定公園、地方自治体指定の保護区を含む。（Nakao et al. 2013）

出シナリオ A1B に基づき異なる大気循環モデル (GCM) で予測された 20 個の将来気候条件を組み込むことでブナの潜在生育域がそれぞれ予測された。20 個の気候条件における年平均気温の平均は、現在気候に比べ 3.2°C 上昇している。ブナの潜在生育域は、現在の気候条件下で 2 万 2567 km^2 であるが、2081～2100 年に予測される気候条件下では 2 万 5517 km^2 に縮小すると予測された (図 2)。温暖化に伴う潜在生育域の変化には地域差があり、西日本や本州太平洋側ではほとんど消失するが、本州の日本海側から東北地方・北海道南部では縮小するものの各地に残存すると予測された。現在の気候条件でも、潜在生育域内のブナ林では稚樹・若木があり世代交代 (更新) が順調な事例が多いが、潜在生育域の辺縁部に成立するブナ林では稚樹・若木が少なく更新が難しい事例が多い (図 3)。



図 3 天然更新が良い日本海側のブナ林 (上) とそうでない太平洋側低山のブナ林 (下)。積雪はブナにとって好適な環境条件の一つである

ブナは遷移後期樹種の特徴 (遅い成長、高い結実樹齢など) を持つため、ブナの消失を加速させる最大の要因は森林伐採である。従って、ブナの分布域を保護区に入れて伐採を防止することが、ブナ林の保護になる。そこで、予測した潜在生育域と保護区を重ね合わせて比較した結果、保護区に含まれる潜在生育域は、現在が 2 万 2122 km^2 であるのに対し、温暖化後は 1 万 2309 km^2 に減少すると予測された (図 2)。温暖化後も引き続き潜在生育域である地域 (持続的潜在生育域) の中で、保護区に入っていない地域が 1 万 3208 km^2 あることが明らかになった。

以上の結果から、温暖化に対

するブナの保護策(適応策)は、地域によって異なる手法が必要と考えられる。本州日本海側・東北・北海道南部では、保護区に入っていない持続的潜在生育域を保護区に追加することが有効である。一方、潜在生育域がほとんど消失する西日本・本州太平洋側では、保護区の追加にほとんど効果がなく、ブナを守るためにはより積極的な保護策が必要である。この地域のブナは、本州日本海側から北海道南部に分布するブナと遺伝形質が異なる(Tomaru et al. 1998)。遺伝的多様性を保護する点からも、この地域のブナを積極的な作業によって保護する意義がある。また、地域の人々から存続が望まれているブナ林もある。積極的保護策には、ブナの更新の妨げとなる競合植物の刈り払い、近年増加しているシカの食害から稚樹を保護する防護柵の設置、地元の種子から育成したブナの若木の植栽などが含まれる。

一方、自然の推移に任せてブナが他の樹種に置き換わることを見守ることも、主要な選択肢の一つである。ブナ林の管理では、温暖化影響の問題だけでなく、シカなど野生動物の制御、希少動植物の保護、過去の伐採地の再生など多様な問題も考慮しなければならない。したがって、ブナ林の諸問題を解決して適切に管理するためには、国や自治体が管理する保護区の管理計画に、温暖化の適応策を他の諸問題の対策と調和させて組み込んでいく必要がある。

3. 人工林への影響予測と適応策

人工林は、植栽や雑草木の刈り払いなどの作業によって育成されたスギ、ヒノキ、カラマツなど有用樹種からなる森林である。人為的に種間競争は排除されるので、温暖化の影響で問題となるのは森林の病虫害と成長である。温暖化が人工林に及ぼす影響として、土壌条件の良い場所で成長量が増加することが期待されるが、高温によるスギの成長低下、病虫害の発生地域の拡大など、悪影響も少なくないと考えられている(原沢・西岡 2003)。今後の人工林管理(施業)では、温暖化に適応する管理が必要である。

病虫害

人工林の病虫害には多様なものがあるが、マツ材線虫病、スギカミキリ、

トドマツオオアブラムシ、ヤツバキクイムシなどで温暖化の影響予測が行われている（温暖化影響総合予測プロジェクトチーム 2008、森林総合研究所 2014）。

特に、マツ材線虫病は、日本の森林病虫害の中で最も深刻であり、現在も被害域が拡大している。この樹病は、外来微生物のマツ材線虫と在来昆虫のマツノマダラカミキリが組み合わさって健全なマツを加害することによりマツが枯死するものである。マツ材線虫病によるマツ枯れは、冷涼な気候条件では発生しにくいことから、温暖化が被害を拡大させると推定される。現在の気温を基準に月平均気温が1℃ずつ上昇した場合において、マツ枯れリスクの高い地域（危険域）、低い地域（自然抑制域）およびその移行域が土地利用を考慮して予測された（温暖化影響総合予測プロジェクトチーム 2008）。1～2℃の上昇によって、現在被害が及んでいない青森県の平野部にまで危険域が拡大し、2℃を超えると岩手県北部のアカマツ林業地帯やマツタケ生産地に危険域が拡大する（図4）。

2005年夏の青森－秋田県境付近でのマツ材線虫病発生を受け、青森県では日本海沿岸部の南北6kmにわたって集中的な監視を行い、さらにその南

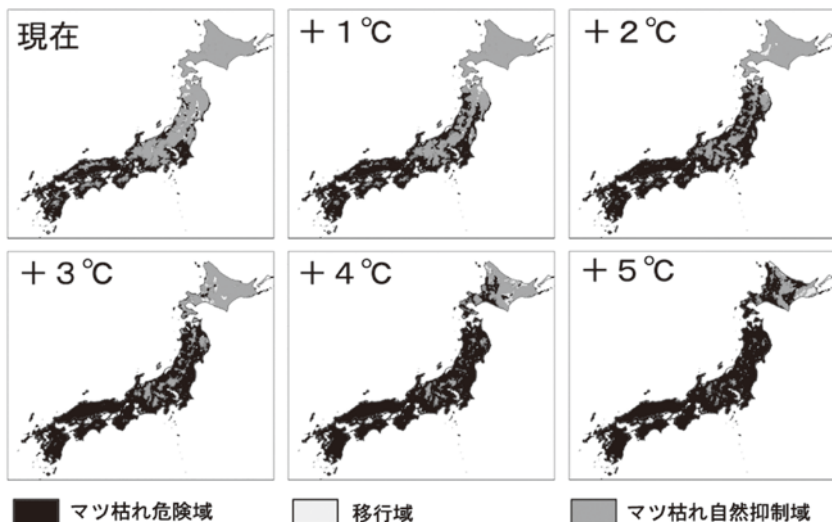


図4 現在と温暖化後のマツ枯れ危険域の予測
（温暖化影響総合予測プロジェクトチーム 2008）

北両端部各 2km にわたってマツ生立木を伐採して感染可能な木が存在しない「防除帯」が設置された。また、マツ枯れが発生した場合は、素早く枯死したマツの伐倒処理が行われている。このような対策は、温暖化の適応策といえる。しかし長期的には、温暖化に伴いマツ枯れの危険域は北に拡大し、現状の方法による完璧な防除は難しいので、現在のマツ林を耐病性マツや他樹種に置き換えることが、根本的な適応策になると考えられる。

成長

日本で最も広く植えられているスギは、年間を通して水分の要求度が高く、これまでも比較的乾燥する北関東や瀬戸内地域でスギ高齢木の梢端枯れなど衰退現象が確認されている（図 5）。スギの生理プロセス（蒸散）と環境条件（降水量と土壌の保水性）に基づき、温暖化に対するスギの脆弱な地域が特定されている（松本ほか 2006）。現在の気候条件下では、土壌保水力の小さい地域や蒸散降水比¹が高く気候的にスギ林の生育にとって不適な地域の分布は、現在スギの衰退が見られる地域と概ね対応していた。温暖化後は、関東平野や青森県北部などで蒸散降水比が高い地域が拡大し、この地域のスギが衰退する可能性が指摘された。

育林樹種に対する温暖化影響予測には、生理プロセスモデル以外に成長量を環境条件から予



図 5 九州の健全なスギ（上）と関東の衰退するスギ（下）の樹冠。九州のスギの方が葉の密度が高く樹冠が円錐形をしている

1 樹木の葉から蒸発する水量と降水量の比で、値が高いほど樹木が乾燥状態におかれることを意味する。

測する統計モデルも有用と考えられるが、まだ研究は進んでいない。一方、スギ以外の育林樹種のヒノキやカラマツでは、温暖化影響予測はほとんど行われていないので、今後の研究の発展が期待される。

人工林は材の収穫までに50～100年の時間がかかるので、将来の気候条件を考慮して育林樹種を選択する必要がある。例えば、温暖化に伴い、現在カラマツ林やスギ林の場所が将来ヒノキの適地に変化する場合は、次回の植林時にはヒノキも植栽樹種の候補となる。人工林の病虫害や成長と気候条件の関係が明らかになれば、温暖化に伴う育林樹種の適地の変化が予測できる。各育林樹種について、現在と将来の気候条件における育林適地マップが作成できれば、各場所でどの樹種を選択するかという判断に役立つ。

4. おわりに

日本の平均気温は、過去100年間に1.06℃上昇した（気象庁2005）。温暖化の生態系への影響がすでに現れているが、われわれが知らないだけ、というのが現状と考えられる。森林生態系は、変化がゆっくりしていること、環境要因と多様な生物が織り成す複雑なシステムであるため、温暖化だけの影響を見分けられないことがその原因である。しかし、近年進歩した分布予測モデルは、温暖化影響を見分けるためにも有用である。モデルを用いた影響予測と変化を把握するモニタリングを同時に推進することにより、得られた情報を参考に適切な適応策を実行していくことが、健全な森林の維持に必要である。一方、森林はCO₂の吸収・排出・貯留の機能を有しており、吸収・貯留を通して温暖化を緩和する役割が期待されている。今後、森林における適応と緩和を調和させる対策が必要である。

〔引用文献〕

- 原沢英夫・西岡秀三（2003）地球温暖化と日本－自然・人への影響予測－第3次報告。古今書院、pp.411.
- IPCC（2007）Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC.
- IPCC（2013）Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC.

- IPCC (2014) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC.
- Lenoir, J., Gegout, J., Marquet, P., de Ruffray, P. and Brisse, H. (2008) A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 320: 1768-1771.
- 気象庁 (2005) 異常気象レポート 2005 : 近年における世界の異常気象と気候変動～その実態と見通し～ (VII). 気象庁.
- 松井哲哉・田中信行・八木橋勉・小南裕志・津山幾太郎・高橋潔 (2009) 温暖化にともなうブナ林の適域の変化予測と影響評価. *地球環境*, 14:165-174.
- 松本陽介・重永英年・三浦寛・長倉淳子・埜田宏 (2006) 温暖化に対するスギ人工林の脆弱性マップ. *地球環境*, 11(1): 43-48.
- Nakao, K., Higa, M., Tsuyama, I., Matsui, T. and Tanaka, N. (2013) Spatial conservation planning under climate change: using species distribution modeling to assess priority for adaptive management of *Fagus crenata* in Japan. *Journal for Nature Conservation*, 21: 406-413.
- 温暖化影響総合予測プロジェクトチーム (2008) 地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－, 環境省地球環境研究総合推進費 S-4 報告書, pp.95.
http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=13617&hou_id=11176
- Parmesan, C. and Yohe, G. (2003) A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421: 37-42.
- 森林総合研究所 (2014) 温暖化により被害の拡大が危惧される森林病害虫. 森林総合研究所, pp. 10.
- 田中信行・中園悦子・津山幾太郎・松井哲哉 (2009) 温暖化の日本産針葉樹 10 種の潜在生育域への影響予測. *地球環境*, 14(2) : 153-164.
- Tomaru, N., Takahashi, M., Tsumura, Y., Takahashi, M. and Ohba, K. (1998) Intraspecific variation and phylogeographic patterns of *Fagus crenata* (Fagaceae) mitochondrial DNA. *American Journal of Botany*, 85: 629-636.