

2. 植物の分布を規定する気候要因の特定 および気候変化に伴う生育地の移動予測

田中 信行*¹・松井 哲哉*²・津山 幾太郎*³・小南 裕志*⁴

1. はじめに

海洋に囲まれた島国の日本は降水量が多く、自然植生はほとんどが森林である。日本の森林帯は5つに区分され、寒冷な方から寒帯(高山帯)、亜寒帯(亜高山帯)、冷温帯、暖温帯、亜熱帯に区分され、その境界は生育期の積算温度(暖かさの指数)で分けることができる(Kira 1977)。日本には、約6000種の高等植物(維管束植物)が自生する。各植物種の分布を見ると、暖かさの指数では説明できない分布が少なくなく、暖かさの指数以外の要因の影響が指摘されている。たとえば、シイやカシなど照葉樹の北限は、冬の寒さの極値によって規定されることが指摘されている(酒井 1995; 大澤 1993)。また、日本海側の多雪地域にだけ分布する植物(チシマザサ、ユキツバキ、ハイイヌガヤなど)や雪の少ない太平洋側だけに分布する植物(イヌブナ、スズタケなど)が知られており、積雪が生育や分布に影響すると考えられている(大澤ほか 1997)。生育期の降水量は、日本全国で比較的多いため、それが影響している事例は少ないが、ブナ林の分布予測から本州内陸部や北限域(北海道)では重要であることが指摘されている(田中ほか 2006; Yagihashi *et al.* 2007)。このように、野生植物は種により気候の異なる側面に反応していると考えられる。

植物種は独自の分布域をもっていて、その分布域はマクロに見れば気候条件と対応する場合が多いが、地域をミクロに見れば、地形や地質、過去の人為などの影響が現れている。たとえば、溪畔に特異的に分布す

るカツラやハルニレなどは、気候条件だけでなく、土壌水分条件の適したところにのみ出現する。したがって、これらの条件が階層的に影響して植物の分布が決まると考えられる。

本論では、我々が分布予測を行ったブナ林とチシマザサを例に、植物の分布を規定する要因と温暖化影響について紹介したい。ブナは高さ20mを超える高木樹種、チシマザサは2m程度に成長するササであるが、ともに多雪の冷温帯において優占し、多くの場所で分布域が重なる。両種とも冷涼な気温と積雪を好む代表種である。なお、本研究は、環境省環境研究総合推進費(S-4, S-8)の支援を受けた。

2. ブナ林の分布規定要因と温暖化影響予測

欧米を中心に、気候変化の生物の生息可能な地域(潜在生息域・生育域)への影響を予測する研究が進められている(Iverson and Prasad 1998; Huntley *et al.* 1995; Leathwick *et al.* 1996)。植物種の分布を予測する統計モデル(分布予測モデル)を開発することにより、現在及び将来の気候条件における種の生育が可能な地域(潜在生育域)を予測できる。モデルの内容を検討することにより、分布を規定する要因の重要度や閾値を明らかにすることもできる。

ブナ林は、日本の冷温帯を代表する天然林で、世界遺産の白神山地ブナ林がよく知られており、水源涵養機能や野生生物の生息地として重要である。ブナは北海道南部の黒松内から鹿児島県高隈山まで分布し、その面積は日本の天然林総面積の17%にあたる23000 km²である。

温暖化のブナ林への影響を予測するために、ブナ林の分布確率を環境要因から予測する分布予測モデルを構築し、ブナ林の成立に適する地域(適域)を特定し、気候変化が適域へ与える影響を予測した(田中ほ

*¹ 森林総合研究所植物生態研究領域。
ntanaka@ffpri.affrc.go.jp

*² 森林総合研究所北海道支所。

*³ 森林総合研究所植物生態研究領域。

*⁴ 森林総合研究所関西支所。

© 2012 日本気象学会

か 2006). 分布予測モデルには統計モデルの1つである分類樹モデルを用いた.

地形の急峻な日本などでは、植物や森林タイプの分布への気候変化の影響を予測するには、少なくとも1~10kmの空間解像度で解析を行うことが必要と考える. 現在と将来の気候データには、3次メッシュ(約1km)の解像度のデータを準備した. 現在の気候データには、3次メッシュ気候値(気象庁1996)を使用した. 将来の気候データには、2つの気候変化シナリオを3次メッシュ解像度にダウンスケールしたデータセットを使用した. 気候変化シナリオは、温室効果ガス排出シナリオIS92a(なりゆきシナリオ)に基づくCCSR/NIESシナリオ(2091-2100年)(Emori *et al.* 1999; Yokozawa *et al.* 2003)と、排出シナリオSRES-A2(多元化社会シナリオ)に基づくRCM20シナリオ(2081-2100年)(気象庁2004)である. これらの気候変化シナリオは、空間内挿により2次メッシュ(約10km)にダウンスケールされた(Yokozawa *et al.* 2003). さらに、各シナリオにおける現在と将来の気候値について、同一2次メッシュセルにおける差比(気温は差、降水量は比)を計算し、この差比データを3次メッシュ気候値の月平均値に相加算して、3次メッシュ気候値の気候特性を反映させた将来の気候データを作成した(田中ほか2006).

モデルの説明変数には、植物の生育にとって重要な気候条件を指標する次の4変数を計算した. すなわち、生育期の熱量の指標として吉良竜夫の温量指数(暖かさの指数, WI), 冬季の低温の極値の指標として最寒月の日最低気温の月平均(最寒月最低気温, TMC), 生育期の水分供給の指標として5~9月の降水量(夏期降水量, PRS), 冬季の乾燥や積雪の指標として12~3月の降水量(冬期降水量, PRW)である. WIは、5°C以上の月平均気温を年間で積算することにより求められる. これらの変数を、気候データから3次メッシュセルごとに計算した. 応答変数にはブナ林の存在データを用いた. これは、環境庁の第3回自然環境保全基礎調査に基づく3次メッシュ植生データ(Mesh Vegetation Database: MVDB)から抽出した.

ブナ林の潜在生育域を3つの分類樹モデルを作って予測した. 説明変数として4気候変数だけを用いたモデル(CLIMATE), 4気候変数に位置情報として緯度・経度を説明変数に加えたモデル(SPATIAL), 4気候変数に5土地変数(地形, 表層地質, 土壌, 斜

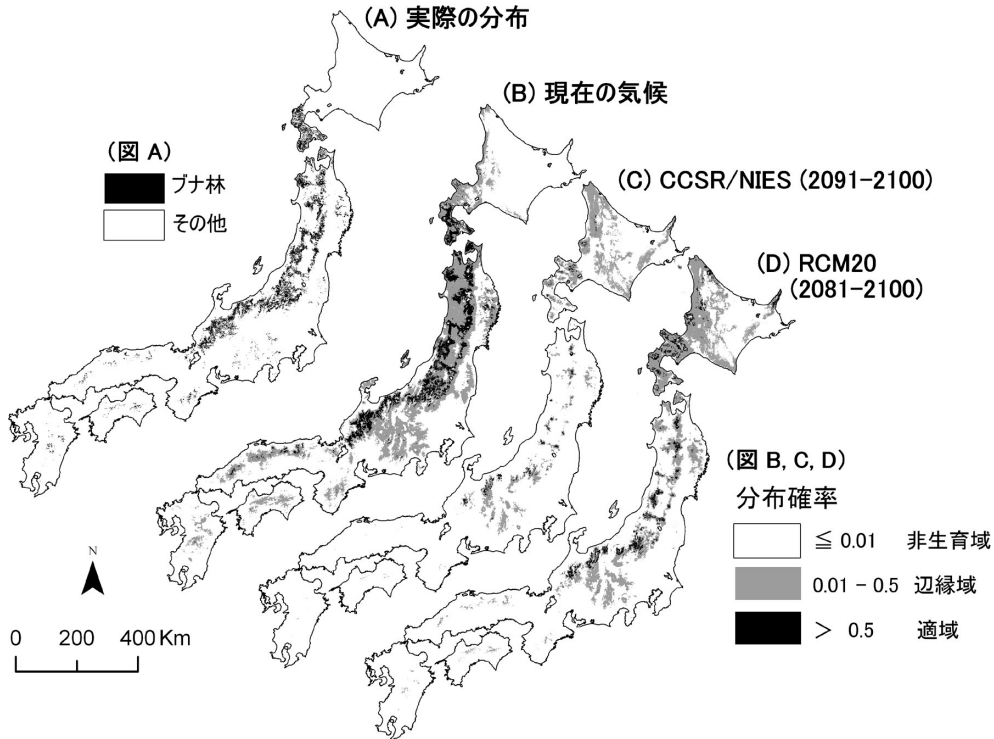
面方位, 傾斜度)を説明変数に加えたモデル(ENVI)である. SPATIALモデルとCLIMATEモデルを比べると、予測精度に大きな違いはなかった. 分布を規定する要因の影響の大きさを示す分離貢献度(Deviance Weighted Score: DWS)は緯度, 経度とも低く、この2つの位置変数は地域的な要因としてモデルに現れる程度であった(Matsui *et al.* 2004a). この結果は、4気候変数でブナ林の実際の分布がほとんど説明できるということを意味する. また、ブナ林は気候的に分布可能なほとんどの範囲に広がっていることを示唆する.

CLIMATEモデルから計算したDWSの値によると、分布規定要因としての重要度はPRWが最も大きく(DWS合計の39.7%), 以下、WI(同32.8%), TMC(同20.6%), PRS(同6.9%)の順であることが示された(Matsui *et al.* 2004a). 分布確率が0.67のブナ林に適した立地は、本州の日本海側と北海道南部に分布し、その気候条件は冬期・夏期ともに多い降水量($PRW > 564\text{mm}$, $PRS > 731\text{mm}$), 中庸な温度($48.9 < WI < 77.2^\circ\text{C} \cdot \text{月}$, $TMC > -12.3^\circ\text{C}$)が特徴であった.

CLIMATEモデルが示す分布確率の低い地域の気候条件から、分布を制限する要因とその閾値が明らかになった. 分布確率の低い北海道の大半は冬期の寒冷と乾燥($TMC < -12.5^\circ\text{C}$, $PRW < 494\text{mm}$)が、本州内陸部や東北の阿武隈高地や北上山地では冬期と夏期の乾燥($PRW < 331\text{mm}$, $PRS < 795\text{mm}$)が、本州の宮城県以南の太平洋沿岸域と四国・九州では夏期の高温と冬期の乾燥($WI > 89.6^\circ\text{C} \cdot \text{月}$, $PRW < 494\text{mm}$)が、本州の新潟県以南の日本海沿岸域では夏期の高温($WI > 95.2^\circ\text{C} \cdot \text{月}$)が、ブナ林の成立を阻害する要因となっていた. この結果は、ブナ林の分布を制限する気候変数と閾値が地域間で異なることを示している.

ENVIモデルから計算したDWSは、PRWが最も大きく(DWS合計の36.6%), 以下、WI(同31.4%), TMC(同20.0%)の順で、PRSのDWSは4気候変数の中では最低で(同4.6%), CLIMATEモデルとほぼ同じ値であった(Matsui *et al.* 2004b). 土地変数のDWSはどれも低かった(同4.9%以下). この結果は、空間解像度約1kmによるブナ林の分布全域の予測という条件では、3気候変数がブナ林の分布に最も影響することを意味する.

ENVIモデルに基づき、現在の気候および2気候変



第1図 プナ林の分布. (A)実際の分布, (B)現在の気候における分布確率, (C)気候変化シナリオ CCSR/NIES (2091-2100年)と(D)RCM20 (2081-2100年)における分布確率と生育域区分(田中ほか(2006)の図を一部改変).

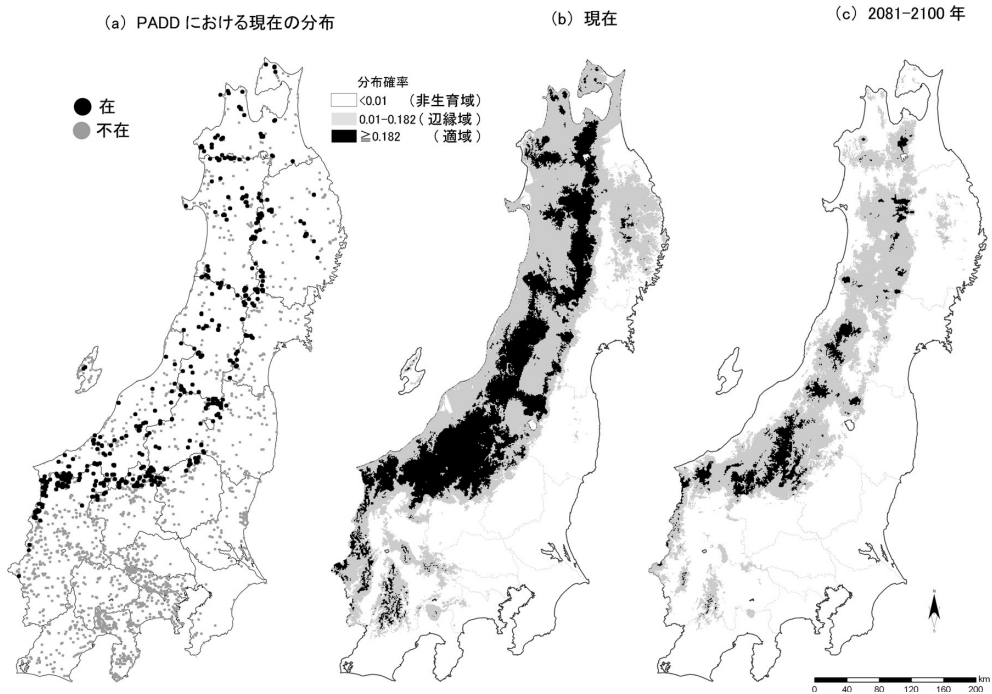
化シナリオにおけるプナ林の分布確率を予測した(第1図). プナ林の適域を, 実際の分布を最もよく予測する分布確率閾値(0.5)以上の地域とすると, その面積は現在の気候条件では26,220セルになる. 温暖化に伴い適域の面積は, 現在の気候に比べCCSR/NIESシナリオでは9%に, RCM20シナリオでは37%に減少した. 両シナリオとも, 九州, 四国, 本州太平洋側の適域はほとんど消滅した. これらの地域のプナ林は温暖化に対して特に脆弱であると推定される. また, 現在は適域が広く分布する東北でも, その面積が大きく減少したことから, この地域でも徐々にプナ林が衰退すると推定される. プナ林の変化は, プナ林に依存する他の生物にも大きな影響を与えるであろう.

3. チシマザサの分布規定要因と温暖化影響予測

チシマザサ(別名ネマガリダケ)は, 樺太・千島列島から鳥取県まで分布し, 北海道と本州の日本海側などの多雪地域の冷温帯から亜高山帯の林床で優占する

ササである. チシマザサが多雪地域に分布するのは, 積雪の保護により冬期に寒さや乾燥からの被害を免れること, 根元が曲がった柔軟な稈をもつことで雪圧に対して耐性があることが理由と考えられている. 温暖化のチシマザサへの影響を予測するために, 本州東部を対象として, チシマザサの分布確率を気候要因から予測する分類樹モデルを構築し, チシマザサの潜在生育域・適域を特定し, 気候変化が与える影響を予測した(津山ほか2008).

現在の気候データには, 3次メッシュ気候値(気象庁1996)を, 将来の気候データには, 2081~2100年のRCM20シナリオを3次メッシュにダウンスケールした気候値を使用した. モデルの説明変数には, プナ林の場合と同じ3変数(WI, TMC, PRS)のほか, 冬季の水分条件として, 積雪量の指標の最大積雪水量(Maximum Snow Water Equivalent, 以下MSW), 冬季の降雨条件の指標の冬期(11~4月)降雨量(Winter Rainfall, 以下WR)を用いた. MSWとWRは, 地域気象観測システム(アメダス)データ



第2図 チシマザサの分布. (A)PRDBに基づく在不在地点, (B)現在の気候と(C)気候変化シナリオ RCM20 (2081-2100年)における分布確率と生育域区分(津山ほか(2008)の図を一部改変).

(統計期間: 1979~2000年)と3次メッシュ気候値(気象庁1996)に基づいて算出した. まず近隣3点のアメダスポイントからの距離による加重平均によって3次メッシュ毎の日別平均気温と日別降水量を求め, これを基に3次メッシュ毎の月別の22年平年値を作成した(以下, 月別22年平年値). 次に, 月別22年平年値と3次メッシュ気候値について, 同一3次メッシュにおける差比(気温は差, 降水量は比)を計算し, この差比データをアメダススペースの3次メッシュ日別降水量と日別平均気温に乗加算して, 3次メッシュ気候値の気候特性を反映させた22年各年の3次メッシュ日別気候値を作成した. この各年の3次メッシュ日別気候値を基に, 積雪過程においては日平均気温の閾値による降水形態の雨雪分離を行い, また融雪過程ではディグリーデイ法によって融雪量を推定することにより(Kominami *et al.* 2005), 各年のMSWとWRを推定し, これを平均することによってMSWとWRを算出した. 応答変数には, チシマザサの在不在データを用いた. これは, 植物社会学ルベデータベースPRDB(田中2003, 2007)から抽出した.

分類樹モデルから算出したDWSの値から, 各気候

変数の分布規定要因としての重要度は, MSWが最も大きく(DWS合計の80.3%), 以下, WI(同14.9%), PRS(同2.8%), WR(同2.0%), TMC(同0.0%)の順であった. すなわち, 最大積雪水量(MSW)と暖かさの指数(WI)が特に重要であることがわかった.

チシマザサの適域の条件は, 寒冷な地域($32.3 \leq WI < 70.7^\circ\text{C} \cdot \text{月}$)では $MSW \geq 215.6\text{mm}$ であるのに対し, 温暖な地域($WI \geq 70.7^\circ\text{C} \cdot \text{月}$)では $MSW \geq 452.8\text{mm}$ と, より多雪な環境に限定された. 温暖な地域では寒冷な地域に比べて融雪が起りやすいため, チシマザサの適域は, 温暖な地域においてはより積雪量が多い地域に限定されると考えられる. これまでは, チシマザサは多雪地域に分布することは知られていたが, 積雪の閾値は明らかになっていなかった. この解析により, WIとMSWの閾値の組み合わせにより適域が規定できることが明らかになった.

ブナ林で用いたPRWを, チシマザサの分布予測ではMSWとWRに置き換えることにより, 積雪の影響度を判定することができた. しかし, このことによりチシマザサ分布の予測精度が, PRWを使った場合

より上昇することはなかった。これは、PRW と WI または TMC の組み合わせが降水形態（雪か雨）と対応するので、積雪の影響がモデルの中に織り込まれたためと考えられる。また、MSW の推定値は、低標高にあるアメダス観測地点のデータに基づいているので、高標高の降水量などは不正確な可能性がある。今後、精度の高い積雪推定データが得られれば、PRW を使うよりも精度の高い予測が可能になると考えられる。さらに、積雪量の最大値を示す MSW だけでなく、積雪の存在期間や消失日などの変数による分布予測モデルの構築を行い、積雪のどの側面が最も影響するかを明らかにすることも、予測精度向上にとって重要である。

モデルに基づきチシマザサの分布予測を行った結果、現在の気候におけるチシマザサの適域（分布確率 0.182 以上）は 26,067 セルで、2081—2100 年の気候では 21.7% に減少した（第 2 図）。温暖化後のチシマザサの適域は、低標高域を中心に縮小し、日本海側の各山脈の高標高域に孤立化すると予測された。適域から外れた地域では、チシマザサの衰退が徐々に進行すると推定される。

4. おわりに

植物種の分布域を気候条件から予測するには、日本国内であれば、4～5 個の変数（WI, TMC, PRS, PRW, または PRW に換えて MSW と WR）で高精度に予測することが可能である。植物分布に影響する気候変数と閾値は、種により異なる上、同じ種では、地域により影響する気候変数と閾値が異なる。

植物の分布予測モデルに必要な気候データは、時間的解像度は月単位で十分であるが、空間解像度は高いほどよい。今回紹介した解析は 1 km 解像度で行われたが、地形の影響を評価するには十分な解像度ではない。さらに高解像度の植物分布データと環境データを分布予測モデルに組み込むことにより生育域の予測を行えば、どのような場所が影響を受けやすいかがわかるので、森林生態系の保全策立案に有用である。

一方、現在の植物の分布は歴史の結果であることを忘れてはならない。過去の気候変動に対応して、植物は分布の縮小拡大を繰り返した。その影響は、現在の分布にも現れている。たとえば、適域であるにもかかわらず分布がない地域（不在適域）の存在が明らかにされている（津山ほか 2008；Horikawa *et al.* 2009）。これは、植物の移動と適域の問題で、温暖化

影響研究における重要なテーマである。

参 考 文 献

- Emori, S., T. Nozawa, A. Abe-Ouchi, A. Numaguti, M. Kimoto and T. Nakajima, 1999: Coupled ocean-atmosphere model experiments of future climate change with an explicit representation of sulfate aerosol scattering. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 1299-1307.
- Horikawa, M., I. Tsuyama, T. Matsui, Y. Kominami and N. Tanaka, 2009: Assessing the potential impacts of climate change on the alpine habitat suitability of Japanese stone pine (*Pinus pumila*). *Landsc. Ecol.*, **24**, 115-128.
- Huntley, B., P. M. Berry, W. Cramer and A. P. McDonald, 1995: Modelling present and potential future ranges of some European higher plants using climate response surfaces. *J. Biogeogr.*, **22**, 967-1001.
- Iverson, L. R. and A. M. Prasad, 1998: Predicting abundance of 80 tree species following climate change in the eastern United States. *Ecol. Monogr.*, **68**, 465-485.
- Kira, T., 1977: A climatological interpretation of Japanese vegetation zones. *Vegetation Science and Environmental Protection* (A. Miyawaki and R. Tuxen, eds.), Maruzen, 21-30.
- 気象庁, 1996: 気象庁観測平年値 (1961-1990). 気象業務支援センター, CD-ROM.
- 気象庁, 2004: 気候統一シナリオ第 2 版. 気象庁気候・海洋気象部気候情報課.
- Kominami, Y., N. Tanaka, Y. Endo and S. Niwano, 2005: Estimation of snow distribution under global warming using data from remote weather stations (AMeDAS). *J. Agric. Meteor.*, **60**, 445-450.
- Leathwick, J. R., D. Whitehead and M. McLeod, 1996: Predicting changes in the composition of New Zealand's indigenous forests in response to global warming: a modelling approach. *Environ. Softw.*, **11**, 81-90.
- Matsui, T., T. Yagihashi, T. Nakaya, N. Tanaka and H. Taoda, 2004a: Climatic controls on distribution of *Fagus crenata* forests in Japan. *J. Veg. Sci.*, **15**, 57-66.
- Matsui, T., T. Yagihashi, T. Nakaya, H. Taoda, S. Yoshinaga, H. Daimaru and N. Tanaka, 2004b: Probability distributions, vulnerability and sensitivity in *Fagus crenata* forests following predicted climate changes in Japan. *J. Veg. Sci.*, **15**, 605-614.
- 大澤雅彦, 1993: 東アジアの植生と気候. *科学*, **63**, 664-672.
- 大澤雅彦, 江口 卓, 田中信行, 池田浩明, 根本正之, 波

- 田善夫, 1997: 自然系への影響. 地球温暖化と日本: 自然・人への影響予測, 西岡秀三・原沢英夫編, 古今書院, 37-103.
- 酒井 昭, 1995: 植物の分布と環境適応—熱帯から極地・砂漠へ. 朝倉書店, 160pp.
- 田中信行, 2003: 植生データベースを用いた地球温暖化の影響予測研究. 植生情報, 7, 9-13.
- 田中信行, 2007: PRDB: 植物社会学ルルベデータベース. <http://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/prdb/index.html> (2009.6.23閲覧).
- 田中信行, 松井哲哉, 八木橋 勉, 埜田 宏, 2006: 天然林の分布を規定する気候要因と温暖化の影響予測: とくにブナ林について. 地球環境, 11, 11-20.
- 津山幾太郎, 松井哲哉, 小川みふゆ, 小南裕志, 田中信行, 2008: 本州東部におけるチシマザサの潜在分布域の予測と気候変化の影響評価. GIS—理論と応用—. 16, 11-25.
- Yagihashi, T., T. Matsui, T. Nakaya, N. Tanaka and H. Taoda, 2007: Climatic determinants of the northern range limit of *Fagus crenata* forests in Japan. *Plant Species Biol.*, 22, 217-225.
- Yokozawa, M., S. Goto, Y. Hayashi and H. Seino, 2003: Mesh climate change data for evaluating climate change impacts in Japan under gradually increasing atmospheric CO₂ concentration. *J. Agric. Meteor.*, 59, 117-130.