

1. 業務の目的

平成 27 年 7 月に環境省では「生物多様性分野における気候変動への適応の基本的考え方（以下「基本的考え方」という。）」を公表し、同年 11 月には、この基本的考え方を反映させた政府全体の「気候変動の影響への適応計画（以下「適応計画」という。）」が閣議決定された。

これを受けて、生物多様性分野における気候変動への適応策（気候変動による影響を低減するために健全な生態系を保全・再生する対策）を、地域の自然保護区（国立公園等）管理や種の保存、野生鳥獣の管理等に組み込んでいく必要があるが、その必要性の認識に関係者間でギャップがあるほか、気候変動に伴う変化の予測をもとに取組を検討する不確実性が、具体的な取組に向かう際の障害となっている（大澤, 2015）。また、生態系そのものだけではなく、例えば自然公園におけるレジャー や レクリエーションを含む生態系サービスに対する気候変動による影響の把握と対策の検討も、これまで十分にされていない。

海外では、米国の US National Park Service が Climate Change Response Program を立ち上げ、科学的知見（将来予測）を取り入れた管理を行っている。例えば、Olympic National Forest and Olympic National Parkにおいては、2008 年から 1 年半かけて気候変動影響予測から脆弱性評価を行い、ワークショップで管理指針の提案を行っている（Halofsky et al., 2011）。今後はこれに基づき、具体的な適応オプションの実行に移っていくこととなっている。

本業務は、これらの課題を解決するため、既存の評価ツールや手法を活用して、保護区レベルでの気候変動とそれに伴う生態系の変化予測、種や生態系への影響予測と脆弱性評価、これらの結果を踏まえた保護区における適応策の検討を試行し、全国で同様の生態系を持つ保護区について、適応策を含む将来的な保全管理検討に役立てることを目的とする。

2. 適応策の実施に資する既存データ・ツール・手法の収集・整理

2-1. 空間基盤情報

対象地域の現状把握を行い、分布変化等の予測を行うためのモデルを構築するために気象、地形、植生、土地利用等に関する空間的な基盤情報は必須である。我が国においては、表 2-1 に示す基盤情報が全国規模で整備されており、無料でダウンロード可能である。

表 2-1. 我が国における主な空間基盤情報

	整備	名称	空間解像度	入手先
気象	国土交通省 (気象庁)	平年値メッシュデータ	3次メッシュ (~1km)	http://nlftp.mlit.go.jp/ksj
	農業環境変動 研究センター	アメダスマッシュデータ	3次メッシュ (~1km)	http://agrienv.dc.affrc.go.jp/
地形	国土地理院	基盤地図情報 数値標高モデル	10 m	http://fgd.gsi.go.jp/download/
植生	環境省	自然環境保全 基礎調査 植生図	ポリゴン	http://gis.biocid.go.jp/webgis/
土地 利用	国土交通省	国土数値情報 土地利用細分 メッシュ	細分メッシュ (~100m)	http://nlftp.mlit.go.jp/ksj
国立 公園 区域	環境省	自然環境保全 基礎調査 国立公園区域 図	ポリゴン	http://gis.biocid.go.jp/webgis/

2-2. 我が国の地域スケールの気候変動シナリオのデータ

気候モデルを用いた将来気候の出力結果の空間解像度は通常数 10~100km 程度である。国立公園をはじめとする区域の限られた保護区を対象とし、高山植生など分布が限られた生物を対象とした予測を行うためには少なくとも数 km 程度の空間解像度のデータが必要であり、気候モデル出力結果のダウンスケーリングが必要である。また、気候変動シナリオは温室効果ガスの排出経路により複数のシナリオがあり、IPCC 第5次報告書においては RCP シナリオが用いられている。空間解像度が数 km のデータセットが準備可能であること、複数の RCP シナリオでの出力結果が存在すること、複数年における予測結果が存在することという条件でデータを探索し、日本および世界で入手可能な気候モデルの出力結果を表 2-2 にまとめた。これらはすべてバイアス補正されており、すぐに予測研究に活用できるものである。ただし、積雪や融雪に関する項目が欠けている場合がある。気候変動適応プラットフォームにおいては、公開されているデータは都道府県単位での年平均気温と年平均降水量であるが、カスタマイズ可能であり、本業務においては 3 次メッシュ（約 1km × 1km）にダウンスケーリングされた日単位のデータを入手した。

表2-2. ダウンスケーリングされた気候変動モデル出力データ。気候変動適応情報プラットフォームのデータは〔 〕内に示す解像度でのデータの準備が可能

気候モデル	開発元	期間	時間解像度	空間解像度〔メッシュ数〕	シナリオ	単位	その他項目	ダウンロード	情報源
MIROC5	東大/NIES/JAMSTEC	2031-2050年 2081-2100年	年〔日〕	普通地図 〔3次メッシュ（-1km）〕	RCP2.6/4.5/8.5	年平均〔日〕	降水量	スクリプト	カスマイズ可能
MRCCGCM3	米国NOAA	2031-2050年 2081-2100年	年〔日〕	普通地図 〔3次メッシュ（-1km）〕	RCP2.6/4.5/8.5	年平均〔日〕	年平均〔日〕	スクリプト	カスマイズ可能
GFDL-CM3	米国NOAA	2031-2050年 2081-2100年	年〔日〕	普通地図 〔3次メッシュ（-1km）〕	RCP2.6/4.5/8.5	年平均〔日〕	年平均〔日〕	スクリプト	カスマイズ可能
HadGEM2-ES	英国・ドレセントナー	2031-2050年 2081-2100年	年〔日〕	普通地図 〔3次メッシュ（-1km）〕	RCP2.6/4.5/8.5	年平均〔日〕	年平均〔日〕	スクリプト	カスマイズ可能
ACCESS1-0	豪気象局	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
BCC-CSM1-1	中国気象局	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
CCSM4	米国NCAR	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
CESM1-CAM5-1-4V2	米国NCAR	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
CNRM-CM5	仏気象研	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
GFDL-CM3	米国NOAA	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
GFDL-ESM2G	米国NOAA	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
GISS-E2-R	米国NOAA	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
HadGEM2-AO	英国・ドレセントナー	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
HadGEM2-CC	英国・ドレセントナー	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
HadGEM2-ES	英国・ドレセントナー	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
INMCM4	ロシア	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
IPSL-CM5A-LR	IPSL Climate Modelling	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
MIROC-ESM-CHEM	東大/NIES/JAMSTEC	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
MIROC-ESM	東大/NIES/JAMSTEC	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
MIROC5	東大/NIES/JAMSTEC	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
MPI-ESM-LR	独マックスプランク	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
MRU-CGCM3	米気象庁	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能
NorESM1-	ノルウェー	2041-2060年 2061-2080年	月～季節	30°（-0.9km）	RCP2.6/4.5/6.0/8.5	月最高・最低	季節～年	GeoTiff	カスマイズ可能

2-3. 種や生態系の気候変動に対する脆弱性評価及び変化シナリオ予測

気候変動下での自然保護区の管理に関して、Rannow et al. (2014)（付録1文献①図1）は、自然保護区で研究が貢献すべき点として、適切な管理に関する助言、管理の枠組構築、長期モニタリング、決定支援ツールを挙げた。これらは互いに関連しており、脆弱性評価から管理計画案の決定までを支援するツールや枠組が必要である。

気候変動に対する脆弱性を評価する枠組として、IPCC 第4次報告書においては、脆弱性は、気候変動に対する曝露・感受性・適応能力により形成されるとされた。この枠組は種や生態系の評価にも応用可能であり（Butt et al., 2016）（付録1文献④図1）、感受性と適応能力に関する生物の形質が Foden et al. (2013)（付録1文献③表1）によりまとめられている。こうした状況をふまえ、主に以下の3つの脆弱性評価手法が提案され、単体あるいは複合されて活用されてきた（Pacifici et al., 2015）（付録1文献②）。

(1) 統計モデル

環境要因と生物応答や分布の関係を統計的に求めて分布推定モデルを構築し、気候変動に対する変化予測を行う方法。分布推定モデルは空間明示的で、気候変動シナリオに基づく生物の分布変化予測が可能である。統計学的アルゴリズムが複数種が存在するため、複数の統計モデルを使用して結果を比較検討することが望ましい。分布推定モデルを構築する際には、現在の生物分布が気候変化に追随しているという仮定が必要である。

(2) メカニスティックモデル

環境変化に対する生物の成長などのプロセスを考慮したモデルを構築し、気候変動に対する変化予測を行う方法。空間明示的なモデルを構築することが可能で、気候変動シナリオに基づく種分布や現存量の予測が可能である。対象種の分布予測を行うためには、成長など生活史に係る詳細な定量データが必要である。土地利用を代表する種を選定することにより、空間明示的な土地利用の変化予測も可能である。こうしたモデルとしては LANDIS-II (Scheller et al., 2007) が挙げられるが、9種の樹木の寿命、成熟年数など7つの成長に関するパラメータが必要である。最近土地利用変化に関するエクステンションが開発され、気候変

動適応としての樹木の移植にも対応できるようになった (Thompson et al., 2016)。

(3)生物種の特性に基づく脆弱性評価

生息地の特異性、種間関係、分散能力などの生物種の形質 (Foden et al., 2013; 付録 1 文献③表 1) と曝露をスコアリングして評価する方法。種の脆弱性を対象とする場合に用いられる。曝露・感受性・適応能力のいくつかの項目について専門家の判断に基づいてスコアリングを行う。他の方法と比べて、最も多様な将来の状態を考慮して脆弱性評価を行うことができるが、評価が主観的になる可能性がある(Hameed et al., 2013) (付録 1 文献⑤)。また、空間明示的な解析は不可能である。

(1)統計モデルと(2)メカニスティックモデルが将来の気候に対応した種の分布の変化を予測するのに対し、(3)生物種の特性に基づく脆弱性評価は気候変動に対して脆弱な種を気候変動への曝露と種の形質に基づいて特定するという点で目的が異なっている (Willis et al., 2015; 付録 1 文献⑥表 2)。目的が異なるため、(1)統計モデル(2)メカニスティックモデルと(3)生物種の特性に基づく脆弱性評価の優劣を比較するのではなく、各手法の目的、方法、出力等に関しての特徴と、評価を行う際の必要なデータや難易度についてまとめた (表 2-3)。

Willis et al. (2015)は、(1)統計モデルと(3)生物種の特性に基づく脆弱性評価を補完的に用いることによって、分布推定モデル結果から得られる管理計画案を抽出し、さらに形質 (例: 種間相互作用) を考慮してさらに管理計画案を導く例を示した (Willis et al., 2015; 付録 1 文献⑥図 3)。(1)統計モデルと(2)メカニスティックモデル長所と短所を比較検討した上で対象への適用可能性を検討し、さらに管理計画案の提案に関して、(3)生物種の特性に基づく脆弱性評価との統合が可能かを検討するべきである。

表 2-3. 気候変動に対する脆弱性評価に用いられる各手法の特徴

	(1)統計モデル(分布推定モデル)	(2)メカニスティックモデル	(3)生物種の特性に基づく脆弱性評価
目的	将来の気候に対応した種の分布の変化を予測する	将来の気候に対応した種の分布の変化を予測する	気候変動に対して脆弱な種を、気候変動への曝露と種の形質に基づいて特定する
方法	現在の生物分布と気候を統計的に解析し、将来を予測する	対象種の成長など生活史に係る詳細な定量データとその環境応答をモデル化し、将来を予測する	感受性が増加するあるいは適応可能性が低い形質を特定する。これらの形質に基づいてスコアリングし、曝露を考慮して総合的な脆弱性を評価する
出力	<ul style="list-style-type: none"> ● 各種に対する最適な気候の分布地図 ● 結果の重ねあわせによる地域における群集構成の変化 	<ul style="list-style-type: none"> ● 地域における種分布とその現存量、群集構成の変化 	<ul style="list-style-type: none"> ● 各脆弱性に関するランクやカテゴリー等に基づく種ごとの脆弱性評価 ● 結果の重ねあわせによる脆弱な種の集中度
定量性、時間・空間明示性	ある時点での空間明示的な分布変化予測が可能	ある時点での空間明示的な分布変化予測が可能	種間の比較は可能だが、ある時点での空間明示的な分布変化予測は不可能
必要なデータ	<ul style="list-style-type: none"> ● 環境要因に関する空間基盤情報 ● 気候予測データ 	<ul style="list-style-type: none"> ● 環境要因に関する空間基盤情報 ● 気候予測データ ● 生物の形質に関する定量的データ 	<ul style="list-style-type: none"> ● 気候変動、生物の形質に関する定性的な情報
コスト、手間、難易度	<ul style="list-style-type: none"> ● 環境要因と分布データは表より入手可能 ● フリーのツールが提供されているが、習熟が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ● 環境要因と分布データは表より入手可能 ● フリーのツールが提供されている ● 生物の形質データの取得が困難 	<ul style="list-style-type: none"> ● 現地や対象生物に詳しい専門家や現地関係者へのヒアリングやワークショップ開催が必要

2-4. レジャー・レクリエーションを中心とする生態系サービスに対する気候変動による影響予測

レジャー・レクリエーションを中心とする生態系サービスに対する気候変動による影響予測を行うためには、注目する種、生態系や景観の変化とともに、人間の行動の変化を予測する必要がある。気候変動によるレクリエーション活動への影響を評価する枠組は Shaw and Loomis (2008) (付録 1 文献⑨図 1) によって示され、気温上昇などによる人間活動の変化（直接影響）と、気候変動による自然環境の変化がもたらす変化（間接影響）に整理されている。気温上昇などによる人間活動の変化に関しては米国の国立公園で検討がなされている。訪問者数と気温は高い相関を持っており、この関係を用いて将来の国立公園の訪問者数を予測したところ、2041-2060 年においては全体として 8-23% 訪問者数が増加する結果が得られた (Fisichelli et al., 2015)。

生物種や生態系のうち、高山植生やサンゴは、観光資源として地域でも認識されており、これらを見に多くの人が国立公園を訪れ、レクリエーションをもたらしている。これらの分布変化予測に関しては前節で述べた方法が活用可能であるが、同様の資源として重要なのは紅葉である。紅葉が生じる仕組みについては、気温との関係が解析されているものの、展葉に比べて知見は少ないので現状である (Gallinat et al., 2015)。

また、登山道の浸食についても山岳域の国立公園では問題となっており、それには降水、表層地質とともに人間の過剰な踏みつけが影響している可能性があるが、その発生メカニズムについて知見が乏しく、また浸食箇所や度合いに関する統一的なデータセットが存在しないのが現状である。なお、近年の傾向として、極端な豪雨による登山道の激しい浸食が確認されている。

2-5. 具体的適応策の検討

脆弱性評価から具体的適応策へのアクションについては、予測結果やスコアリング結果を踏まえた上で、コストなど実現可能性とともに検討を行う必要がある。Cross et al. (2012) (付録 1 文献⑧) は、管理計画策定に関して、1：保全対象とその管理目的の特定、2：将来の気候変動の影響可能性の評価、3：シナリオに対する管理行動の特定、4：管理行動の優先順位付け、5：優先度の高い

行動の実施、6：効果と目的に向けた進捗のモニタリング、行動の修正や計画の見直しという6つのステップからなる Adaptation for Conservation Act (ACT) の枠組みを提案した。この枠組みではイエローストーン川の流量を対象とした評価が行われているが、脆弱性評価の枠組み (Butt et al., 2016; 付録1文献④図1) を活用して、汎用的に整理した枠組みを提示することが可能である（図2-1）。

自然環境の保全においては、「曝露」として気候変動に加えて土地利用変化などの人為的な要因が対象種に及ぼす直接影響と、気候変動や土地利用変化が対象種以外の生物の変化をもたらしそれが対象種に影響を与える間接影響が考えられる。「感受性」としては、種の生息地、環境耐性、種間相互作用の依存性、希少性（分布範囲の狭さなど）が考えられ、「適応能力」としては、分散能力や進化的適応力が考えられる（Foden et al., 2013）。これらによって生物や景観の変化がもたらされる。

一方、人間による利用に関しては、Shaw and Loomis (2008)が示すように、気温上昇などによる人間活動の変化（直接影響）と、気候変動による自然環境の変化がもたらす変化による利用の変化（間接影響）が考えられる。生物・景観、インフラと利用の変化や脆弱性を明らかにし、それらに対する適応オプションを適切な管理計画へとつなげていく必要がある。

生物の保全に対する適応オプションや管理計画への策定に関しては、Willis et al. (2015)（付録1文献⑥図3）が分布推定モデルと対象種の形質を考慮して管理計画案を導く例を示したが、Shoo et al. (2013)（付録1文献⑦図1）は成功可能性やコストの面からの評価も加えて整理を行い、より優れた枠組みを提示している。

保護区においては、保全や利用において考慮すべき項目が様々であるため、対象の選定においては、曝露・感受性・適応能力等に関するヒアリングやスコアリングに基づく評価を行う必要がある。また、保護区において、どこで何を行うかという具体的な適応策や管理計画の立案のためには、空間明示的な解析が必要不可欠である。保全対象種は希少種や固有種である場合が多く、ほとんどの場合曝露・感受性・適応能力に関する定量情報が不足しており、プロセスに基づくメカニスティックモデルを構築することは困難である。そのため、メカニスティックモデルが構築できない場合は、曝露（環境要因）と対象の分布等の関係を統計的に解析し、空間明示的に分布等の変化予測を行うのが妥当である。その場合でも、有識者へのヒアリングや文献調査等により、応答特性（平均気温

か積算気温か等) や種間相互作用 (高山植生の衰退とササの繁茂等) に関する情報は可能な限り収集してモデルを構築すべきである。その上で、Shoo et al. (2013) や Willis et al. (2015) が示したように、分布変化予測結果と生物種の特性を考慮して適応オプションを設定し、管理計画を立案することが望まれる。立案においては、現在の利用や管理等を参照することにより、新たな取組のみならず、既存の保全策の中で適応策として機能する取組を見出すことが可能となる。

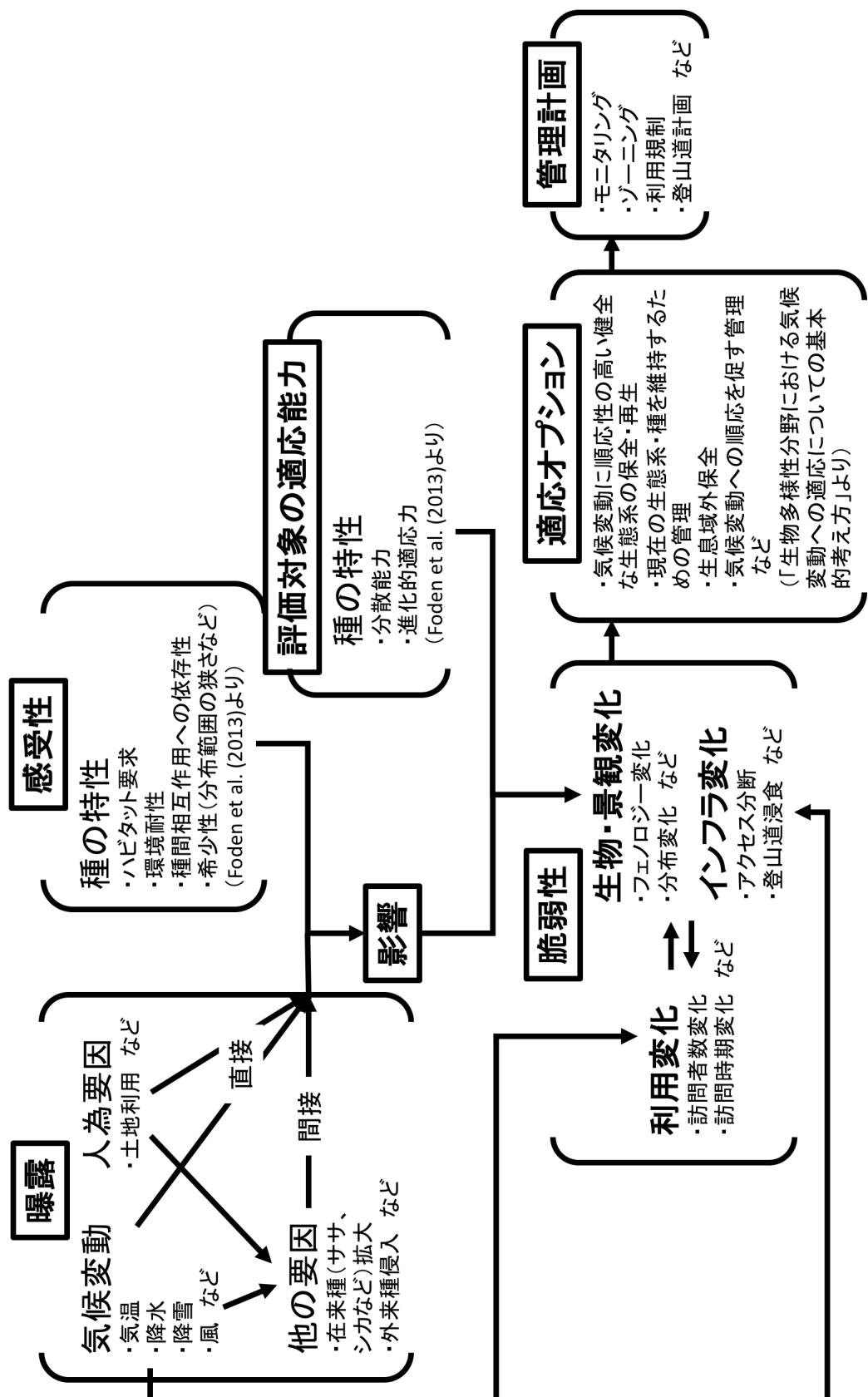


図 2-1. 保全と利用のための国立公園の気候変動適応枠組み

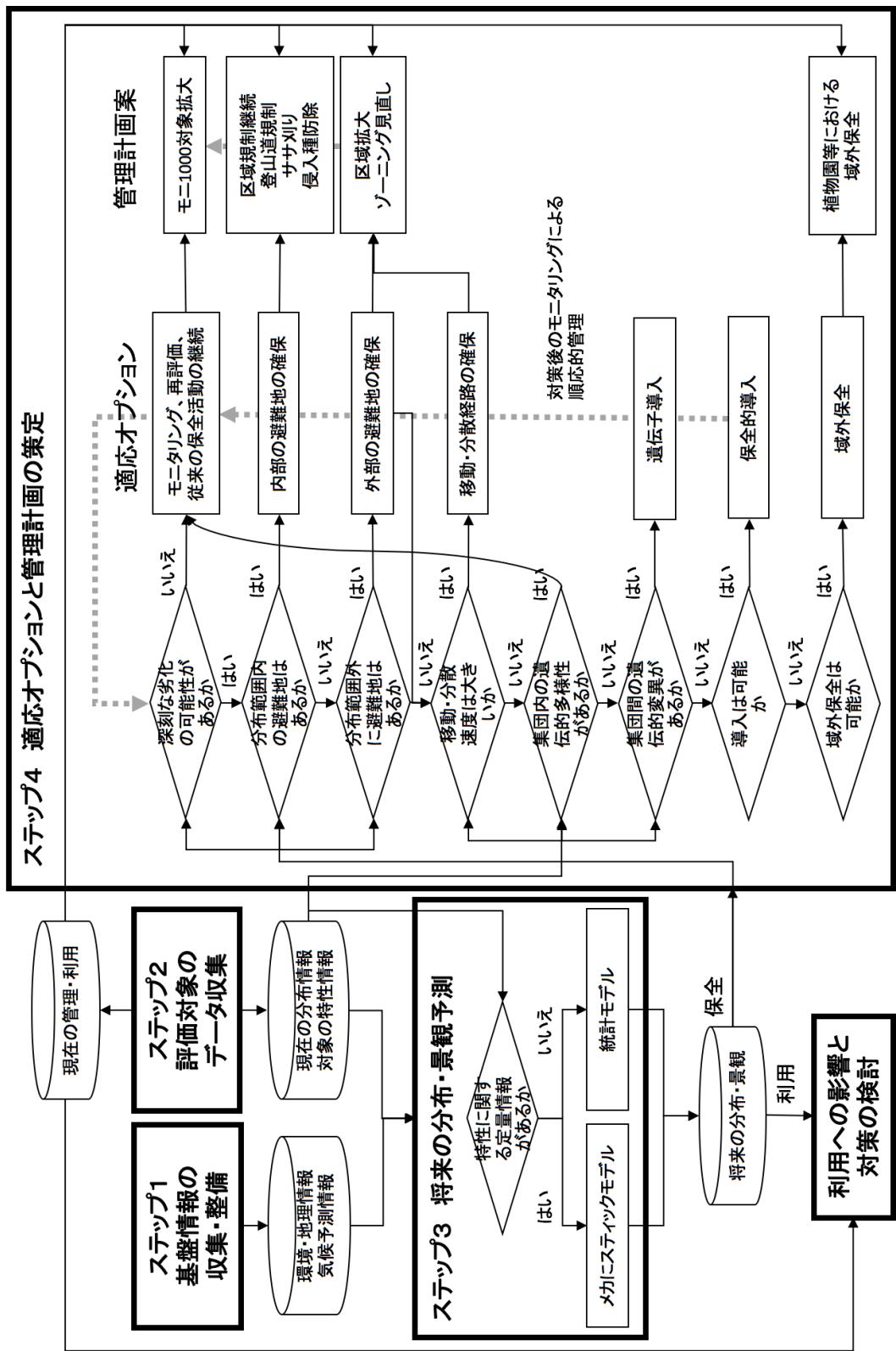


図 2-2. 気候変動適応枠組み (図 2-1) と文献レビュ－により作成した、脆弱性評価から管理計画案へのフローchart

以上を考慮して、図2-1の枠組みに基づき、脆弱性評価から適応オプションと管理計画案を策定するフローチャートを作成した（図2-2）。このフローチャートは大きく以下の4つのステップから構成される。

ステップ1：対象地域の基盤情報（気象、地形、植生）の収集・整備

気象、地形、植生など現状把握と予測に必要な情報の収集を行い地理情報システム上に統合する。日本においては、表2-1に示す通り、全国規模で整備されたデータが入手可能であり、対象とする保護区でのデータを揃えることが可能である。また、論文や報告書の探索を行い、利用者数など上記以外の情報も収集する。気候の予測に関しては、表2-2に示すデータが利用可能である。これらを地理情報システム（GIS）上で統合する。

ステップ2：評価対象の決定、評価対象の特性や形質等関連データと利用・管理情報の収集・整備

論文・報告書、ウェブサイト等の情報、現地関係者や有機識者へのヒアリングによって評価対象を決定する。その上で、評価対象について、有識者へのヒアリングや文献調査（Foden et al. (2013)に示された感受性と適応能力の項目；表2-4）等によりその分布や特性情報を収集する。生物の分布に関しては、環境省自然環境保全基礎調査（表2-1）の情報が利用可能である。また、現地関係者へのヒアリングや国立公園管理計画等の文書より、評価対象に関して現在の利用と管理についての情報を得る。

ステップ3：分布・景観予測モデルの構築、将来の変化予測

特性や形質に関して定量的な情報が得られる場合はメカニスティックモデルの活用の可能性があるが、得られない場合は分布推定モデル等の統計モデルを活用する。ステップ1で収集した現在の気象等の環境要因と分布やフェノロジーの情報との関係を統計的に求めて推定モデルを構築し、その上で将来の気候での分布や景観の変化予測を行う。

ステップ4：適応オプションの抽出と管理計画の立案

将来の分布や景観の変化予測結果に基づき、保全と利用面での影響と対策可能性を評価する。保全においては、変化予測結果に基づく適応オプションを抽出

した後に、ステップ2で収集した種の特性や形質を考慮した適応オプションを検討する。その上で、各適応オプションに対して、ステップ2で収集した現在の管理や利用情報を参考し、どこで何を行うべきか具体的な管理計画案を作成する。

表2-4. 感受性と適応能力に関する生物の形質（Foden et al. 2013 を改変）

項目	
感受性	生息地の特異性、微環境の要求性
	環境耐性もしくはいずれかの生活史段階における環境閾値（その中でも気候変動の影響により超過する可能性があるもの）
	生活史の環境トリガーへの依存性（トリガーが気候変動によって阻害される可能性のあるもの）
	種間相互作用への依存性（その中でも気候変動によって阻害される可能性のあるもの）
	希少性（個体群が小さい等）
適応能力	移動分散能力、障壁の存在
	進化可能性（遺伝的変化、遺伝的多様性）

3. モデル保護区での試行の実施

本業務では、北海道中央部に位置する大雪山国立公園（図 3-1）を対象として、地形や気象等の基盤データの整備を行い、前章で述べたステップ 1-4（図 2-2）に従い、脆弱性評価から適応オプションの抽出、そして管理計画案の検討という一連の過程を試行する。

大雪山国立公園は昭和 9 年 12 月 4 日に指定され、面積は 226,764ha である。北海道最高峰の旭岳（2,291m）を主峰とする山岳は標高 2,000m 前後で、面的な広がりを有する。緯度が高いため本州の 3,000m 級に匹敵する高山環境を有している。山頂部付近の高山植物群落には日本の高山植物の 4 割に相当する約 250 種が確認されている。紅葉は早い年では 8 月末から観察され、観光客を集めている。風穴や永久凍土をはじめとした、多様な地形・地質の存在も、大雪山の生物多様性を支えている。平成 27 年 6 月には、登山道に関して大雪山グレードが定められ、管理者はグレードに応じた登山道管理の実施により、周辺の自然環境や奥深い雰囲気の保全と大雪山らしい登山体験の提供を図り、利用者は大雪山国立公園での登山を計画する際、また登山を行う際に、自らが歩く登山道のグレードを確認し、個々の力量に応じた登山を行うことで、遭難事故の防止、登山利用の適正化が図られることが期待されている。

ステップ 1：対象地域の基盤情報（気象、地形、植生）の収集・整備

大雪山国立公園に関する地形や気象等公開されているデータを収集した（表 3-1、図 3-1）。気候変動予測データとしては、表 2-2 に示した気候変動適応情報プラットフォームから、大雪山国立公園を含む範囲の 3 次メッシュ（約 1km × 1km）の気温と降水に関するデータ入手した。変化の最大値を求めるために、RCP シナリオの中で最も温室効果ガス排出が多く気温上昇の大きいシナリオ RCP8.5 を選定し、評価期間は 2081 年～2100 年と設定した。

表 3-1. 大雪山国立公園を対象に収集した基盤情報。本業務で高山植生等の分布推定、紅葉日の推定、管理計画案の策定に用いたデータを「データ活用」列に示す

データ活用	内容	所管	データ	整備した区域	データ入手元	備考
管理	環境省	PDF地図	モニタリンググリッド1000	区域内	https://www.cenv.go.jp/park/common/data/05_datasets_map_j.pdf	点やラインを地図から読み取り
管理計画案	環境省	モニタリンググリッド1000	モニタリンググリッド1000報告書	地点	http://gis.biocid.go.jp/webgis/se-026.htm?kind=nps	
管理計画案	環境省	国立公園区域等	国指定鳥獣保護区区域等	全国	http://gis.biocid.go.jp/webgis/se-026.htm?kind=nwp	
管理計画案	環境省	生物多様性センター	大雪山登山道グレード	全国	http://www.datasetsuzan.or.jp/enjoy/grade/	
管理計画案	環境省	利用・管理	登山者数	区域内	Shoji et al. (2008) Journal of Forest Research, 13, 286-295	大雪山登山道グレードにデータ追加
分布推定	気象	論文	平年値気候メッシュ	北海道	http://nftp.mlit.go.jp/ksj/index.html	データ所管は気象庁
紅葉日	気象	気象庁	アメダス観測所一覧	全国、区域周辺	http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/ametdas/kaisetsu.html	csvをボイントデータに変換、区域中の閉鎖された点について手入力追加
紅葉日	気象	気象	日別値：気温、降水、雪 量、積雪、層雲峠	上川、白滙、ぬかびら源泉 白金、三股、三国山*、軍艦 山*、西スプカウシ山*、旭岳 *、前富良野岳	http://www.data.jma.go.jp/gnd/risk/obstd/index.php	層雲峠は気温なし
紅葉日	気象	気象	年別値：気温、降水、積雪 量	旭川、ぬかびら源泉 層雲峠	http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etru/index.php	冬季をのぞく
紅葉日	気象	農業環境情報データセンター	地上気象メッシュ値	区域周辺	http://agrienv.dclaffrc.go.jp/mesh/mesh.html	*は現在閉鎖されている
分布推定	地形	国土地理院	10mDEM	区域周辺	http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html	
紅葉日	地形	国土地理院	5mDEM	区域周辺、半分以上欠	http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html	
地形	国土交通省	国土地理院	河川	北海道	http://nftp.mlit.go.jp/ksj/index.html	
地形	国土交通省	国土調査	主要水系調査（一級水系） 十勝川水系 石狩川水系	十勝川水系 石狩川水系	http://nrb-www.nlit.go.jp/kokio/inspect/landclassification/download/index.html#sw	
地形	国土地理院	湖沼図	然別湖	GISデータなし、閲覧のみ	http://www.gsi.go.jp/kankyoiri/koshouchousa-list.html	
地形	国土地理院	水系図	北海道	http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html		
他	国土交通省	基盤地図情報	行政区域	北海道	http://nftp.mlit.go.jp/ksj/index.html	
他	国土地理院	国土数値情報	道路線	北海道	http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html	
地質	産総研	地質調査総合センター	シームレス地質図	区域周辺	https://gbank.gsj.jp/seamless/index.html?lang_ja&p=download	
分布推定	生物	環境省	生物多様性センター	北海道	http://gis.biocid.go.jp/webgis/sc-023.html	小川(ほか(2013))により凡例整理
生物	環境省	生物多様性センター	特定植生群落調査	上川・十勝	http://gis.biocid.go.jp/webgis/sc-023.html	
生物	環境省	生物多様性センター	河川調査	上川・十勝	http://gis.biocid.go.jp/webgis/sc-023.html	
生物	環境省	生物多様性センター	湿地調査	上川・十勝	http://gis.biocid.go.jp/webgis/sc-023.html	
生物	環境省	生物多様性センター	湖沼調査	上川・十勝	http://gis.biocid.go.jp/webgis/sc-023.html	

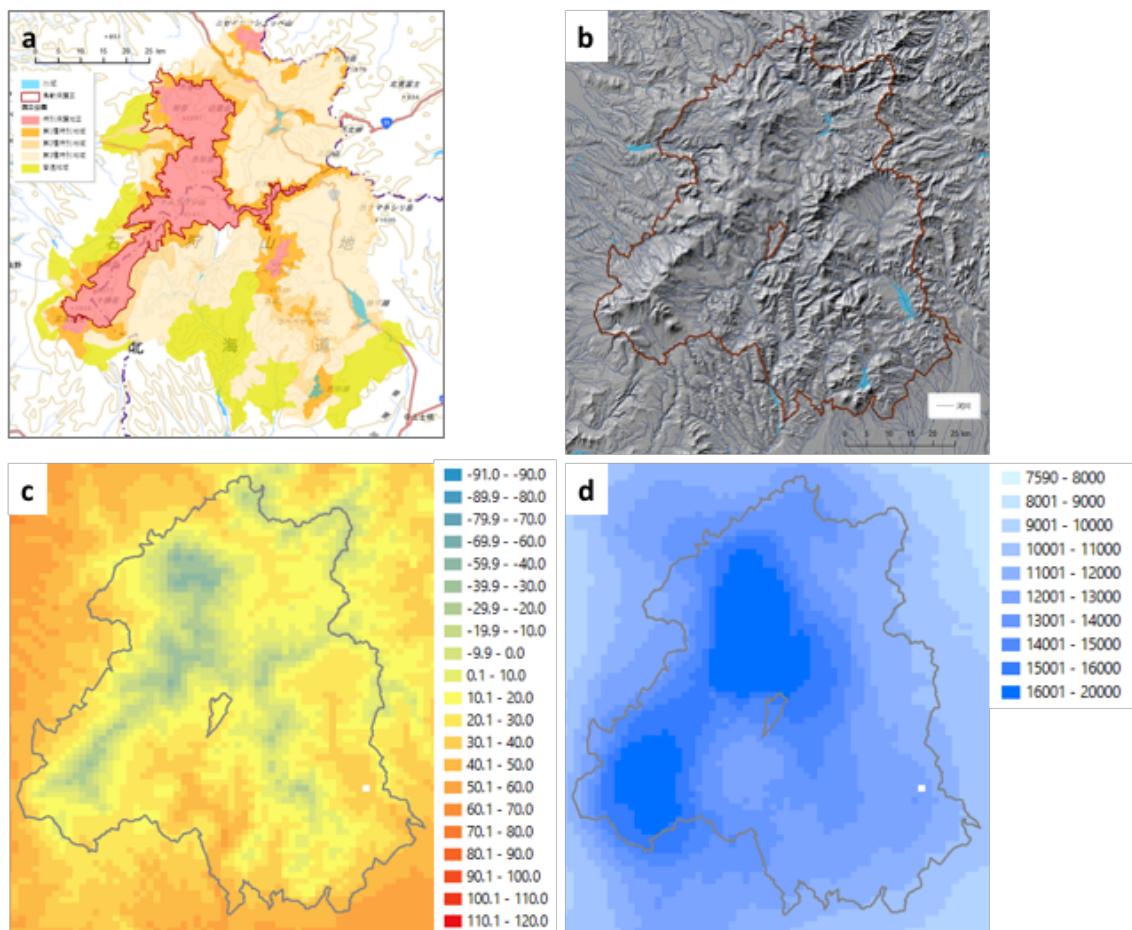


図 3-1. 大雪山国立公園の管理区域(a)、地形(b)、年平均気温(c)、年降水量(d)。年平均気温の単位は 0.1°C 、年降水量の単位は 0.1mm

ステップ2：評価対象の決定、評価対象の特性や形質等関連データと利用・管理情報の収集・整備

大雪山国立公園における気候変動影響や適応に関する課題を明らかにし、評価対象を決定するために現地関係者及び有識者にヒアリングを行った。ヒアリング内容は図3-2の通りで、(1)全体的な課題（日本全国、国立公園を中心）。(2)大雪山国立公園を対象とした課題、(3)将来予測における課題（可能性も含め、対象種、影響の構造（直接・間接））、(4)モニタリング等の調査・研究に留まらず、今の時点で執れる又は執るべき対策・適応策（公園計画・管理計画の改定、保護管理事業への提案）に関して、現地関係者には主に(2)～(4)に関して、有識者には主に(1)～(3)に関してうかがった。また、有識者に関しては、以下の方々に、研究の専門性を考慮した項目を中心にヒアリングを行った。

①工藤 岳（北海道大学地球環境科学研究院環境生物学部門・陸域生態学分野准教授）

<http://hoshoees.hokudai.ac.jp/~gaku/index-j.html>

専門：植物生態学、進化生態学、生物間相互作用、フェノロジー、ポリネーション、外来種

- ・高山植生全般
- ・大雪山国立公園の生物（特に植物）及び景観への気候変動影響
- ・気候変動の植物相影響、評価可能性、評価対象種の選定に関する助言
- ・モニタリング等の調査・研究に留まらず、今の時点で執れる又は執るべき対策・適応策
- ・今後、保全上重要と思われる要素に関する示唆

②渡辺悌二（北海道大学大学院地球環境科学研究院 統合環境科学部門 環境地理学分野 教授）

<http://www.teiwatanabe.com/>

専門：地理学、資源保全学、自然災害科学

- ・国立公園の管理全般
- ・大雪山国立公園の管理

- ・異常気象（大雨や冬期降雨等）による登山道への影響と対策

③庄子 康（北海道大学大学院農学研究院 森林政策学研究室 准教授）
<http://www.agr.hokudai.ac.jp/formac/forpol/cn18/associate-professor.html>
専門：環境経済学と環境評価、知床のエコツーリズム、礼文島のレブンアツモリソウの保全、大雪山国立公園の管理、白老町の協働の森づくり、世界自然遺産の管理、釧路湿原の自然再生事業

- ・国立公園の利用全般
- ・大雪山国立公園の利用
- ・利用面から見た気候変動影響、評価可能性、評価対象の選定に関する助言
- ・モニタリング等の調査・研究に留まらず、今の時点で執れる又は執るべき対策・適応策
- ・今後、保全上重要と思われる要素に関する示唆

※環境評価

④愛甲哲也（北海道大学大学院農学研究院 花卉・緑地計画学研究室 准教授）
<http://www.agr.hokudai.ac.jp/hsla/aikoh/site/indexj.html>
専門：公園緑地、景観の計画・管理

- ・国立公園の管理全般
- ・大雪山国立公園の管理
- ・気候変動に対応した管理に関する助言

※実践的な話

⑤五箇公一（国立環境研究所 生物・生態系環境研究センター 生態リスク評価・対策研究室 室長）
<http://www.nies.go.jp/researchers/100183.html>
専門：外来生物・農薬の生態リスクマネジメント、感染症の生態学、ダニ学

- ・国立公園への侵入種問題

- ・大雪山国立公園の侵入種問題
- ・気候変動の侵入種影響、評価可能性、評価対象種の選定に関する助言
- ・気候変動の侵入種をどこまで防除すべきか、どこからは受容すべきか
- ・モニタリング等の調査・研究に留まらず、今の時点で執れる又は執るべき対策・適応策

※外来生物の侵入による生態系のバランス崩壊が懸念

※セイヨウオオハナマルバチの侵入・定着が懸念

※低地にしか従来分布していなかった外来植物が近年、大雪山高山帯にも侵入

※ウチダザリガニが然別湖で定着

⑥深澤圭太（国立環境研究所 生物・生態系環境研究センター 生物多様性評価・予測研究室 主任研究員）

http://www.nies.go.jp/biology/aboutus/staff/fukasawa_keita.html

専門：時空間生態学、保全生物学、階層ベイズモデル

- ・国立公園への獣害問題
- ・大雪山国立公園のチョウ、動物相及び獣害問題
- ・気候変動のチョウ、動物相及び獣害影響、評価可能性、評価対象種の選定に関する助言
- ・越冬し易くなり増加しているとも考えられるエゾシカについて、現実的にどういう対策を執るべきか
- ・モニタリング等の調査・研究に留まらず、今の時点で執れる又は執るべき対策・適応策

※ウスバキチョウ、アサヒヒヨウモン等の高山蝶が分布

※エゾクロテン、エゾオコジョ、エゾシマリス、エゾリス、エゾモモンガ、エゾナキウサギ等の中小型ほ乳類が多数生息

※大型ほ乳類のエゾヒグマやエゾシカが生息

※クマゲラ、ミュビゲラ、シマフクロウ、キンメフクロウ等の希少種を含む多種の鳥類が分布

- ・今後、保全上重要と思われる要素に関する示唆

※エゾシカの個体数増加、食害、衝突事故の報告あり

⑦肱岡靖明（国立環境研究所　社会環境システム研究センター　地域環境影響評価研究室　室長）

<http://www.nies.go.jp/researchers/100063.html>

専門：気候変動、影響評価、適応

- ・気候変動影響評価全般に関する助言
- ・大雪山国立公園を対象とした評価に関する助言
- ・気候変動データ（モデル、シナリオ、解像度等）に関する助言

ヒアリング結果を付録2に示す。現地関係者及び有識者へのヒアリング内容から影響や管理に関するキーワードを表3-2及び表3-3にまとめた。

気候変動により影響を受ける対象として多く挙がったのは、高山植生の変化、紅葉日の変化、登山道の浸食であった。これらのうち、入手可能なデータや既存ツール・手法をベースとして高山植生と紅葉日について将来予測を行い、それに基づく適応オプションと管理計画案の検討を行った。

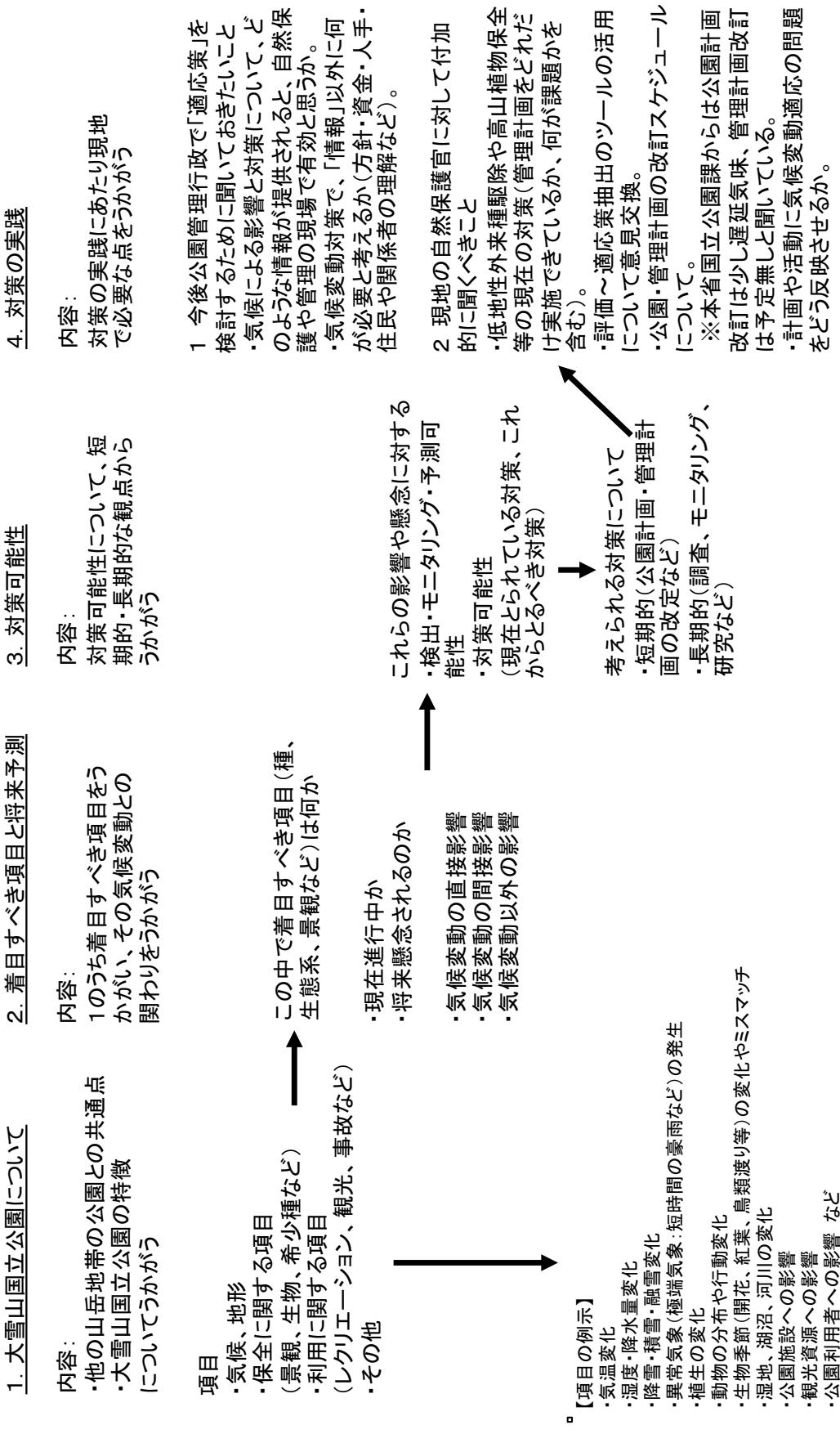


図3-2. ヒアリソング内容

表 3-2. 現地関係者ヒアリング結果の概要

対象者（匿名）	気候変動影響（主要なキーワード）	対策可能性（抜粋）
A	雪渓、紅葉、高山植生、バックカントリー	
C	高山植生、ササ、登山道浸食	<ul style="list-style-type: none"> ・現状困るということが無い限り対策は取れない。規制をするということは国民の権利に制限をかけるということ ・実際の管理につかえる解析の精度に関しては、3-4平方キロでよいのではないだろうか
F	紅葉、氷瀑まつり	
I	高山植生乾燥化、紅葉の色づき	
J	ウスバキチヨウが高山植物（コマクサ）の減少とともに減少	<ul style="list-style-type: none"> ・石狩岳で今後モニタリングの強化が必要（高山蝶との関連） ・パークボランティアに生物の在不在データだけでも報告してもらいたい
K		
L	紅葉の色づき、ホテルにクーラー設	
M	夏場の雨、登山道浸食、ササ増加、獣害、バックカントリー	<ul style="list-style-type: none"> ・登山道のルートの付け替えや迂回ルートの設置など、登山道を新しく作ることは植生のこともあり積極的には行いたくない ・利用をとめることなく保全をしたい
O	高山植生減少、登山道浸食	<ul style="list-style-type: none"> ・ササ刈り ・登山道のグレードに沿った利用
R	雪減少、黄砂、ハイマツ・ササ増加、紅葉時期	
S	紅葉・積雪・開花時期、高山植生減少、登山道浸食	
T	黄砂、湖の結氷、高山植生（五色ヶ原）減少	
U	湖の結氷、ササ増加、カブトムシ増加、永久凍土融解と登山道浸食	<ul style="list-style-type: none"> ・風穴が30程度存在するが、レフュージアとして、全ての種をキープしている訳ではない（もともと確認される種数は少ない）
V	湖の結氷年変動大きい、風強い、ワカサギ減少	
W		<ul style="list-style-type: none"> ・公園計画や管理計画は、「現在」起きていることに対応するもの。今、進捗中で問題のあることならば合意形成がはかりやすい。（気候変動による将来予測のように）合意形成がしにくいものは計画に入れにくい。五色が原のお花畠対策など（=自然再生・植生復元施設など）、見えるものは提案しやすい ・予測のスパンはせいぜい2030年までがリーズナブル。それ以降は排出シナリオによって結果が大きく異なってくる

表 3-3. 有識者ヒアリング結果の概要

名前	気候変動影響（主要なキーワード）	要因（主要なもの）	対策可能性（抜粋）
工藤 岳	融雪時期の早期化、異常気象（集中豪雨）、湿性お花畠減少、チシマザサ拡大、エゾシカ増加、外来種、開花期短縮、登山道浸食	高山植物の分布は雪解け時期と土壤水分量で決まる 直接的～間接的な変化のほか、個々の植物の変化、相互作用の変化	<ul style="list-style-type: none"> モニ1000では気象要因が抜けている 植生帯の全容把握には大雪山で数10点は必要 航空写真が活用可能 エゾシカ情報不足 セイヨウオオマルハナバチのモニタリング 植物群落開花時期はボランティアによるモニタリング チシマザサの刈り取り 避難地はマイクロハビタット
渡邊 悅二	極端な豪雨、登山道浸食、永久凍土の融解	凍土の融解による登山道浸食	<ul style="list-style-type: none"> 生物多様性とジオ多様性両方を考慮する必要あり 永久凍土の分布の把握 多点での気象観測 アメダス・標高などのデータから将来を予測するシステムが現状ベスト 登山道グレードの周知 登山道を閉じる、ルートを変える、グレードを変えるなど利用規制 登山道浸食把握にはドローンが必要 世界でも対策の事例は少ない
庄子 康 愛甲哲也	豪雨、登山道浸食、シカ増加	人数と登山道の荒廃との関係は不明、気象条件の方が大きい	<ul style="list-style-type: none"> 合意形成などで目標値を設定して、問題が起きなければ現状維持、目標値と現状を鑑みて利用を止めるなどの対策をとる方が良い 利用者人数の調査は必要、合意形成材料 古くからある道は、景観の良いところを通っている。生態系の観点からは避けたいところに道がある。湿原の道をハイマツにまわす対応策もあり 維持コストを考慮、ボランティアで行われる箇所もある 道路に注目する：アクセスの問題。利用面の脆弱性をアクセスからみる
深澤 圭太	シカ食害	気候変動が要因ではない。気温が重要な факторではないというのが研究者の考え方。積雪が問題である。雪がふることはシカにとってマイナス、大雪に弱い	<ul style="list-style-type: none"> シカの被害は、下（標高の低いところ）で増えて、上に上がっている。下の個体数を減らせば、標高の高いところにはいきにくいくらいだろう。入り込むのをふせいでから、元をたたくのが鉄則 狩猟のデータは基本冬場のもの。データは、5kmメッシュの情報がある。国でとっている。その中で平坦なところの割合や降雪を考慮すると分布がわかる可能性 獣害のモデリング、予測について。分布データが時系列でとれていれば可能。ただ、5kmメッシュではある 気候変動シナリオに狩猟による捕獲のシナリオを考慮する必要性について。狩猟がどこでどれくらいされているのかわからないので、捕獲の影響と気候変動の影響を識別した分析や予測は困難
五箇公一	雑草増加、セイヨウオオハナマルバチ	外来種は道路沿いから入って来やすい 全ての動物にとって、積雪か餌が問題、気温はあまり問題ではない	<ul style="list-style-type: none"> 国内外来種について、法律的には人や農業被害がでないと対策はしにくい 今の管理計画は気候変動を意識しているわけではないが、適応している。利用のあり方は議論しやすいかもしれない。気候変動の生態系への影響は難しい。公園管理の枠ではどうしようもない可能性も。どこにポイントを置くのか。温暖化と言うキーワードを後押しにしてリスク管理を行うとよい 気候変動の結果、割と最後まで残るところや、固有性がわかれれば優先順位をつけて戦略地として設定をする。その評価を優先してやる、その方が良いのではないか

ステップ3：分布・景観予測モデルの構築、将来の変化予測

①高山植生の分布予測

大雪山国立公園において、保全対象および観光資源として重要である、高山植生およびその主要な脅威要因であるササ群落の分布について、現在の植生分布に基づいて、分布推定モデルを3次メッシュレベルで作成し、将来の気候(気温、降水量)に基づいて分布予測を行った。

使用したデータ

自然環境保全基礎調査の植生調査、5万分の1(第4-5回)(表3-1)のデータに基づいて作成された、日本全国標準土地利用メッシュデータ(小川ほか, 2013; Akasaka et al., 2014)のうち、各3次メッシュ内で高山植生に相当する区分(高山植生及び雪田草原)と、ササ群落の面積を抽出し(図3-3)、それらを分布推定モデルの従属変数とした。

これらの面積を推定する説明変数には、高山植生の分布推定に関する既存研究および有識者ヒアリングの結果に基づき、気温、水分条件、降雪、地形を用いた(図3-4)。

気温に関しては、寒さの指数(吉良 1948)を用いた。これは月平均気温がセ氏5°Cを下回る月について、(5°C-月平均気温)を積算したものである。その他の気温に関連する各種指標値(年平均気温、春季の平均気温等)も検討を行ったが、全ての指数について寒さの指数と相関係数0.9前後の強い相関がみられたため、気温に関しては寒さの指数のみを用いた。

有識者ヒアリング(工藤岳氏; 表3-3, 付録2)では、積雪および融雪時期の重要性が指摘されたが、将来予測に用いることができるデータが月ごとの気温と降水量に限られていたため、月平均気温が氷点下の月の降水量を降雪量に相当するとして説明変数に用いた。また、年間の水分条件に影響する要因として、それ以外の月の降水量も説明変数に含めた。年間の降水量はこれらと強い相関関係があったので、含めなかった。

地形に関しては、3次メッシュ内の北向き斜面の割合、10mスケールでの凹地の割合、100mスケールでの凹地の割合、平均斜度、斜度の標準偏差を説明変数に含めた(図3-4)。

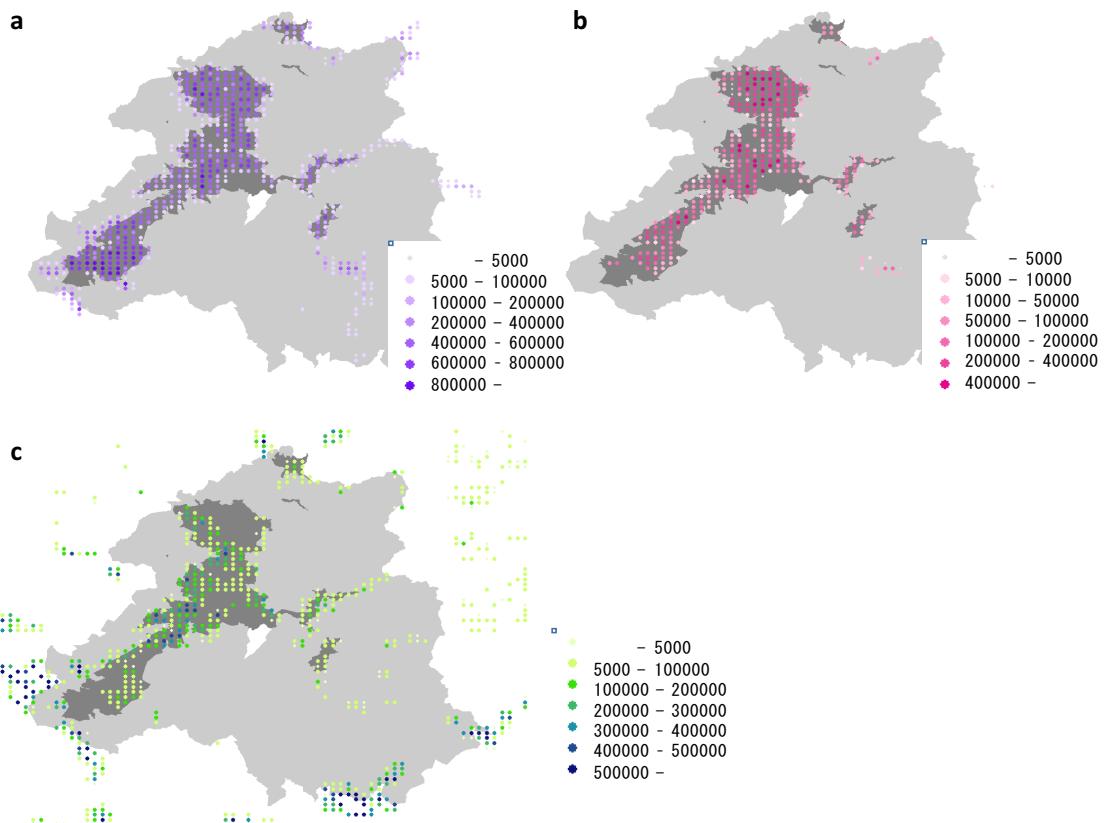
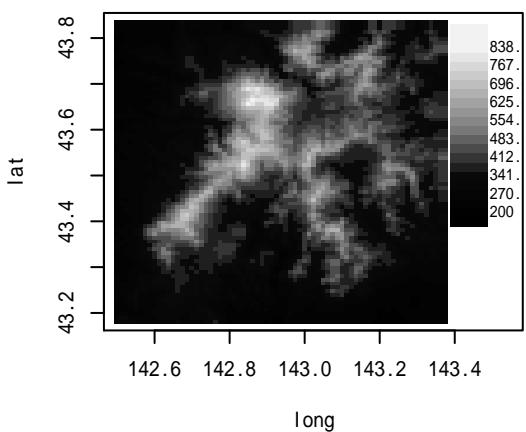
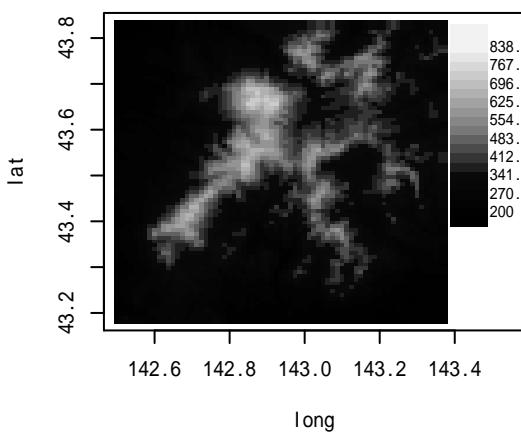


図 3-3. 大雪山国立公園における 3 次メッシュ内の植生面積(m^2)。高山植生(a)、雪田草原(b)、ササ(c)。濃いグレーは特別保護区を示す

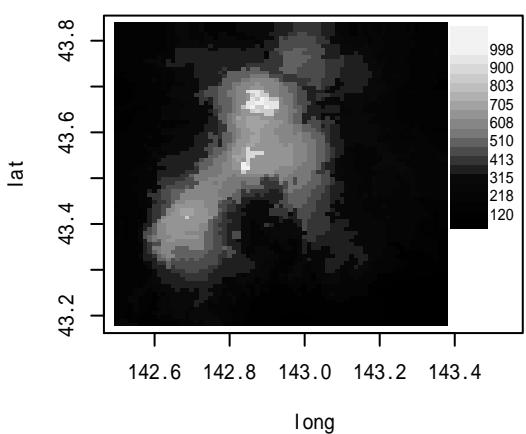
寒さの指数 現在



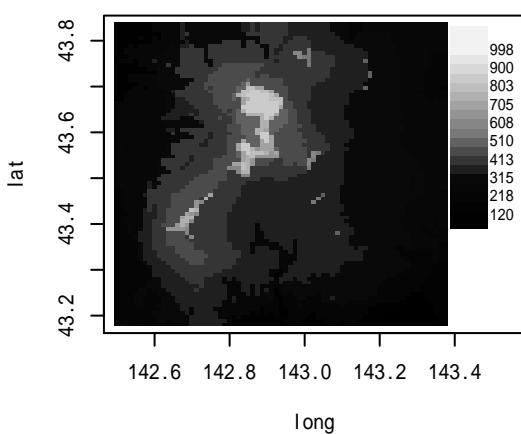
寒さの指数 将来



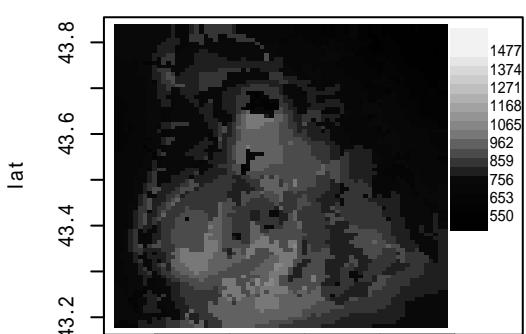
平均0度以下の月の降水量 現在



平均0度以下の月の降水量 将来



平均0度以上の月の降水量 現在



平均0度以上の月の降水量 将来

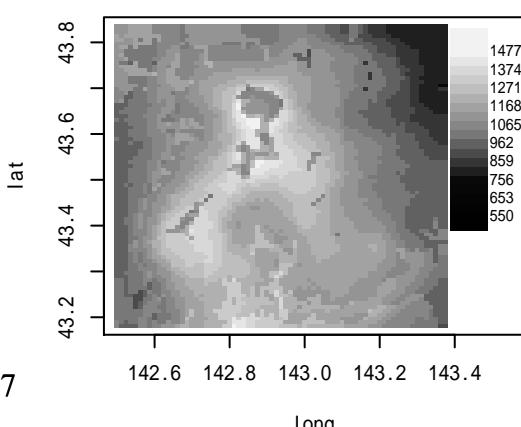
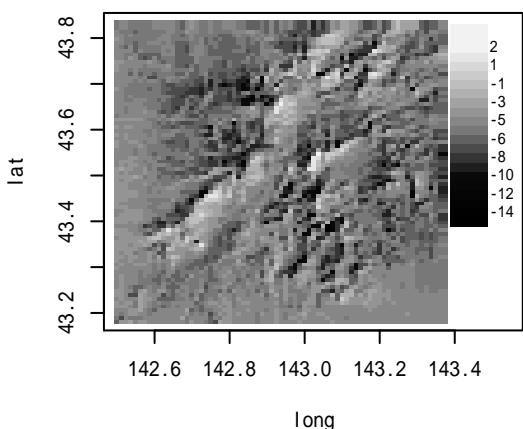
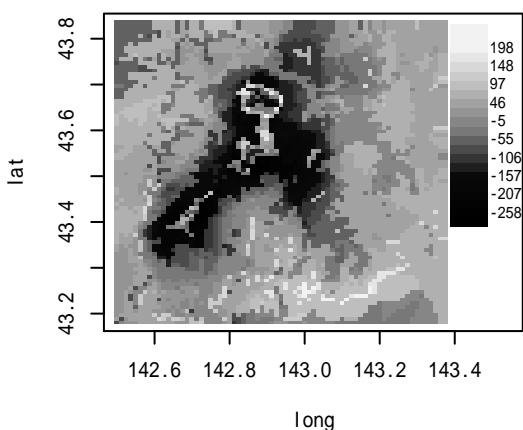


図3-4. 高山植生・雪田草原とササの分布推定に用いた変数一覧

寒さの指数の差分(将来-現在)



平均0度以下の月の降水量の差分(将来-現在)



平均0度以上の月の降水量の差分(将来-現在)

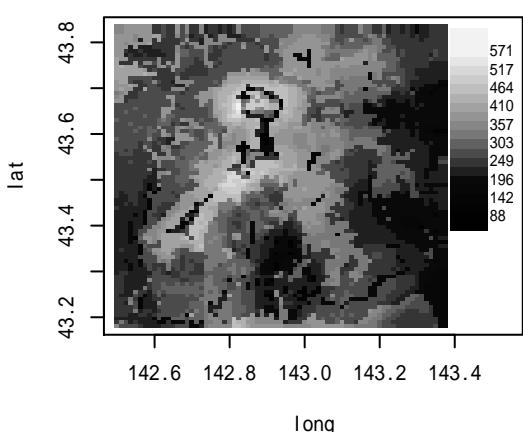
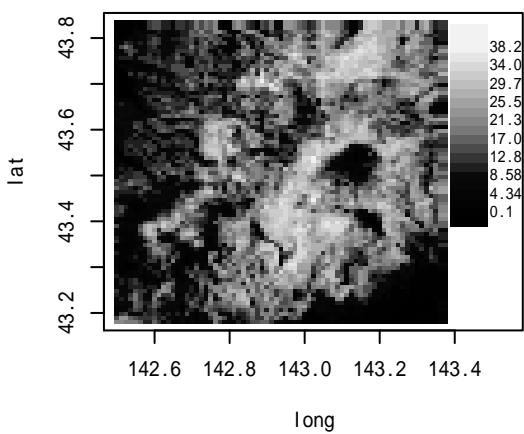
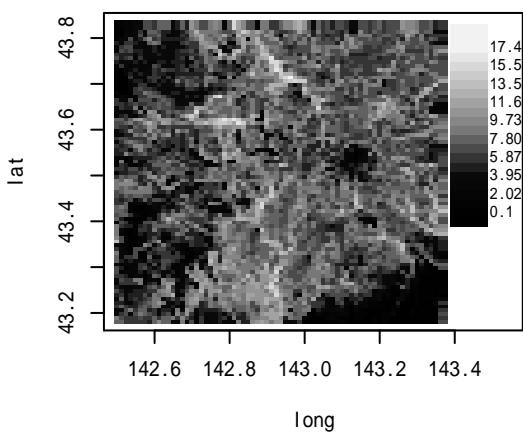


図3-4. 高山植生・雪田草原とササの分布推定に用いた変数一覧(つづき)

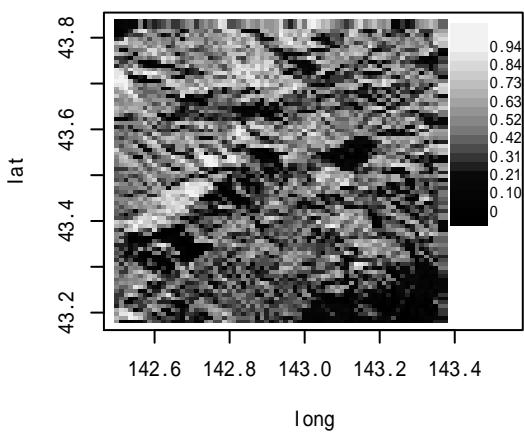
傾斜（平均） 現在



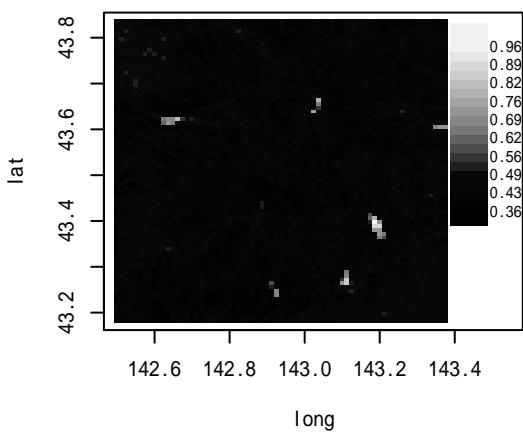
傾斜（標準偏差） 現在



北向き斜面の割合 現在



凹地率 (10mスケール) 現在



凹地率 (100mスケール) 現在

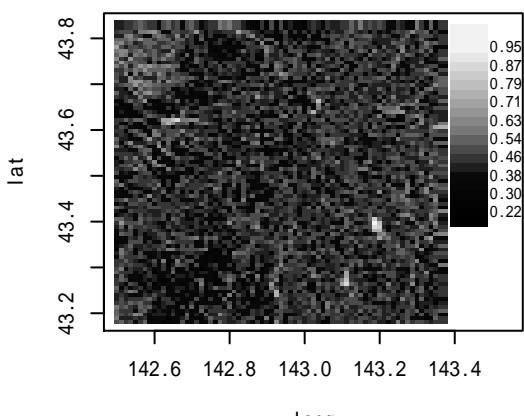


図3-4. 高山植生・雪田草原とササの分布推定に用いた変数一覧 (つづき)

予備解析により、寒さの指数と氷点下の月の降水量、およびこれらの交互作用が大きな効果を持つことが明らかになったため、この 2 変数の間の交互作用も説明変数に含めた。他の変数間の交互作用は、モデルが過度に複雑になることを避けるため、モデルに含めなかった。

分布推定モデルの構築

気候変動に伴う将来分布予測では、不確実性の大きさを考慮にいれた評価が欠かせない(Heikkinen et al., 2006; Lawler et al., 2006; Hulber et al., 2016)。特に分布推定モデルの手法間の違いは不確実性の大きな部分を占め、複数のモデルで予測を行い、不確実性の大きさを評価することが重要である(Lawler et al., 2006; Marmion et al., 2009; Wright et al. 2015)。本業務では、従来から最もよく用いられている統計モデルである、一般化線形モデル(GLM)、一般化加法モデル(GAM)、機械学習モデルの中でも特に予測性能が高いことが知られている Boosted Regression Trees(BRT)を用いた。誤差分布には、GLM はポアソン分布および負の二項分布、GAM はポアソン分布およびベータ分布、BRT では正規分布を用いた。

GLM および GAM では、統計モデルの良さを評価するための指標である赤池情報量基準 AIC*に基づくモデル選択を行い、AIC が最小値となった変数セットからなるモデルを将来予測に用いた。BRT については、モデル推定のプロセスに変数選択が組み込まれているので、モデル選択は行わなかった。BRT で最適な推定値を得るために学習速度や相互作用の複雑さに関するパラメータのチューニングが必要となる。最適なパラメータセットは、標準的な評価手法であるクロスバリデーションに基づいて決定した。

将来の分布予測

将来の気候値は、MIROC5 モデルを用いた RCP8.5 シナリオの将来の気候予測データをダウンスケーリングしたもの（表 2-2）を用いた。MIROC5 は日本で開発された気候モデルであり、日本付近の予測精度が高いことが知られている。また、気候変動の影響が最も大きい場合を想定した予測を行うため、RCP8.5 シナリオのデータを用いた。大雪山国立公園付近での将来の気候の予測値は、2080 年から 2100 年において、気温が上昇(寒さの指数が減少)するものの、降水量が大きく増加、降雪量（平均気温が 0 度以下の月の降水量）も高山植生の辺縁部では増加するという予測となっている（図 3-4）。この将来気候値を、上記で推定し

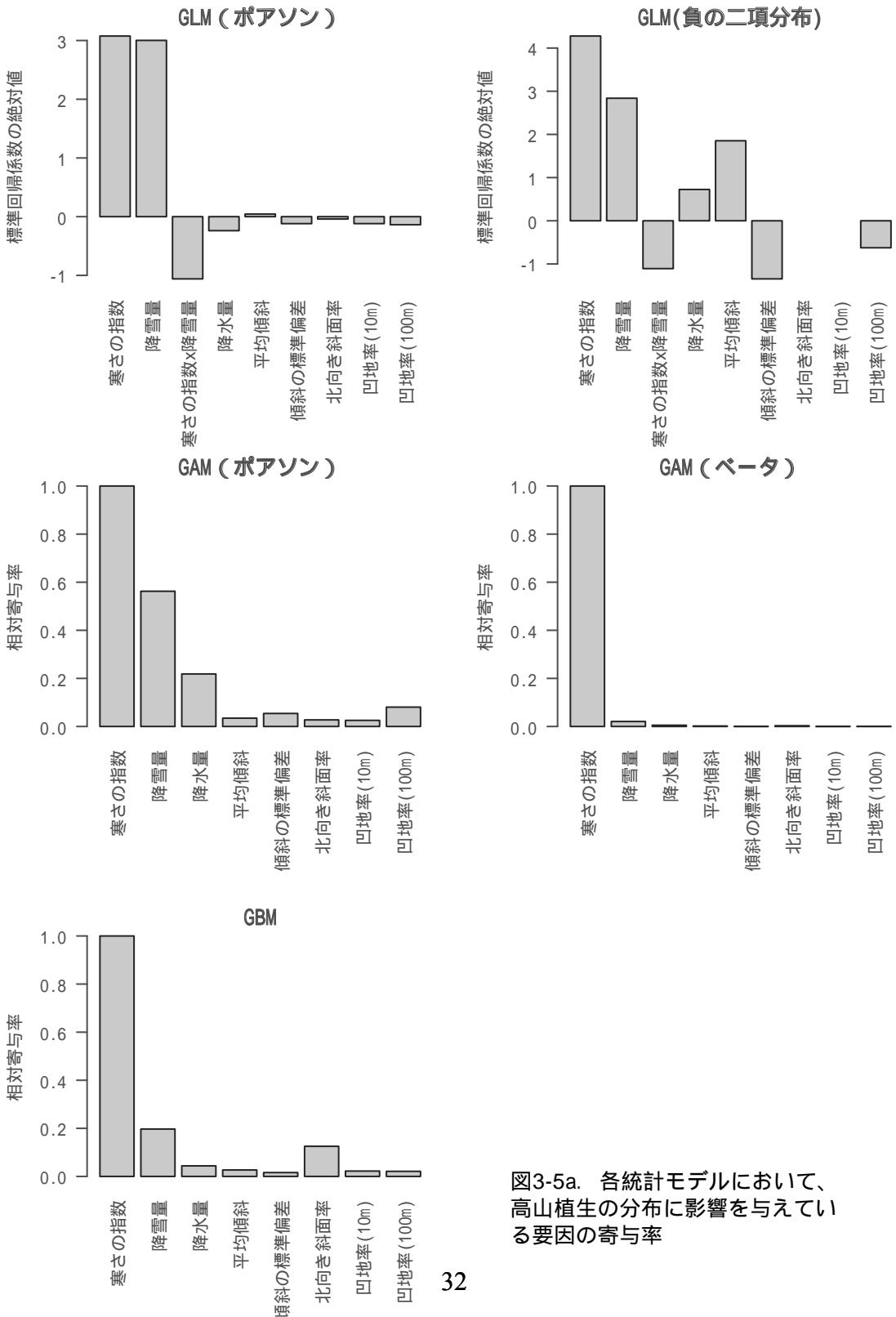
た統計モデルに与え、2081年から2100年の間の対象植生の面積の予測を行い、モデル間の平均値および標準偏差を求めた。

結果

高山植生および雪田草原の分布に影響を大きく与えている要因は、いずれのモデルでも、寒さの指数の効果が最も大きく、指数値が大きいほどこれらの植生の分布面積は大きかった（図3-5；GLMについては回帰係数なので、正・負があるが、GAM・GBMについては、非線形なので、正・負ではなく絶対的な寄与の大きさを示している）。次いで、氷点下の降水量（図中では簡略化のため降雪量と表記）の影響が大きく、この変数も高山植生の分布に正の寄与があった。降雪量の寄与の大きさは、モデルによってばらつきが大きく、GLMでは、いずれの誤差分布を仮定した場合にも、寒さの指数に劣らぬ効果があったものの、より複雑なモデルであるGAMやGBMでは、寒さの指数に比べた効果の大きさは限定的であった。その他の説明変数については、GLMのモデル選択では最良モデルに含まれてはいたものの、寄与は限定的であり、GLM以外のモデルでも同様であった。高山植生および雪田草原の現在の分布については、いずれのモデルも説明力が高く（図3-5a,b）、全体のばらつきのうち80%程度を説明するモデルであった。ササ群落の分布については、寒さの指数、降雪量、降水量、平均傾斜が全てのモデルで比較的寄与が大きかった。しかし、いずれのモデルも説明力は限定的で、全体のばらつきのうち15から40%に留まった（図3-5c）。現在の分布推定結果を図3-6に示す。

2081年から2100年における平均的な気候条件における各植生タイプの分布面積変化の予測（図3-7）においては、高山植生については、負の二項分布を仮定したGLMではやや増加、ポアソン分布を仮定したGAMでは大きく面積が増加する予測であったが、その他のモデルでは大幅に減少する予測であり、平均的には減少する予測であった（図3-7a）。一方、雪田草原については、いずれのモデルでも大幅な減少が予測された（図3-7b）。ササ群落については、GLMでは面積が増加する予測、GAMおよびGBMでは微減、場所によっては大幅減、平均的にはあまり変化がないという予測であった（図3-7c）。

高山植生



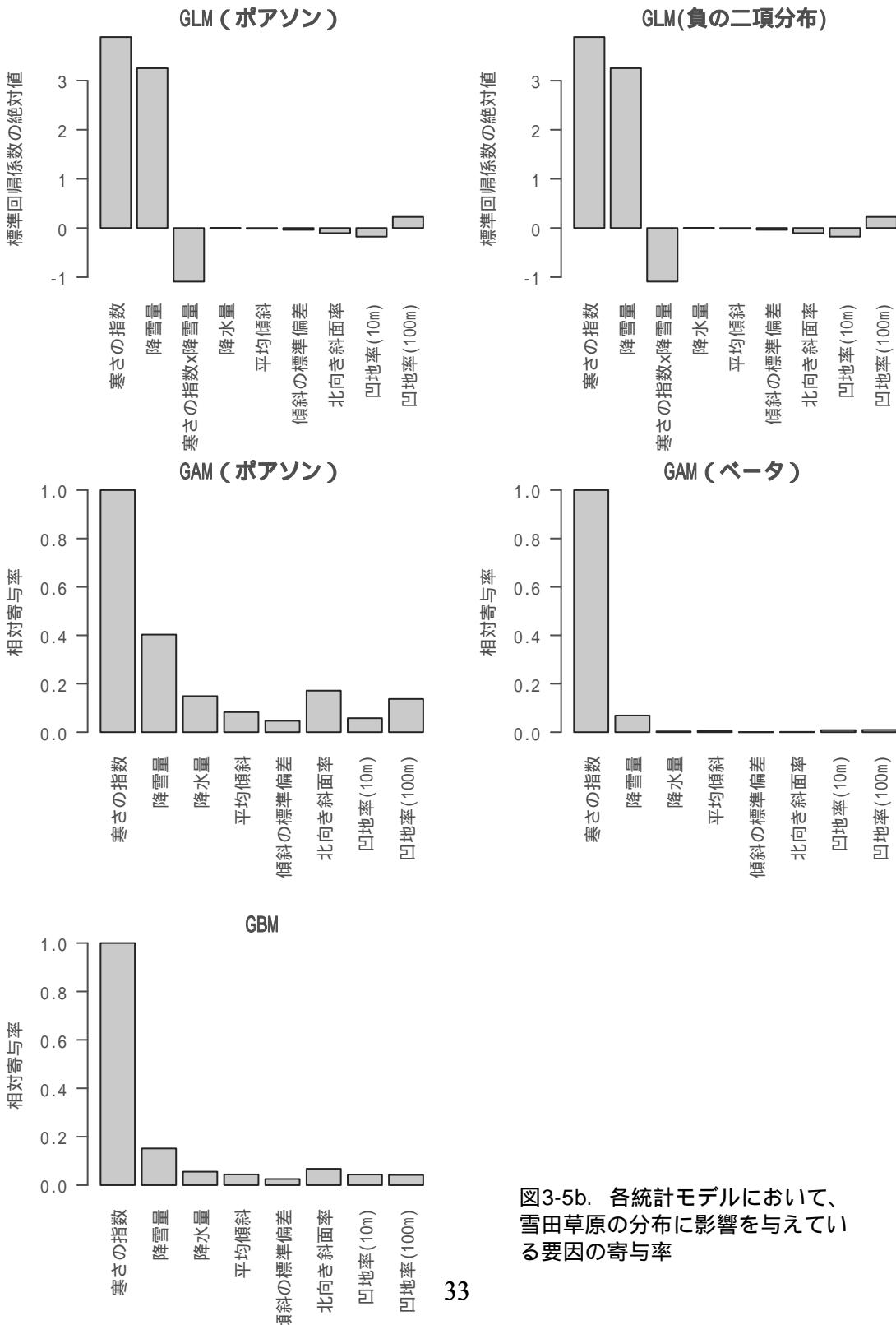


図3-5b. 各統計モデルにおいて、
雪田草原の分布に影響を与えて
いる要因の寄与率

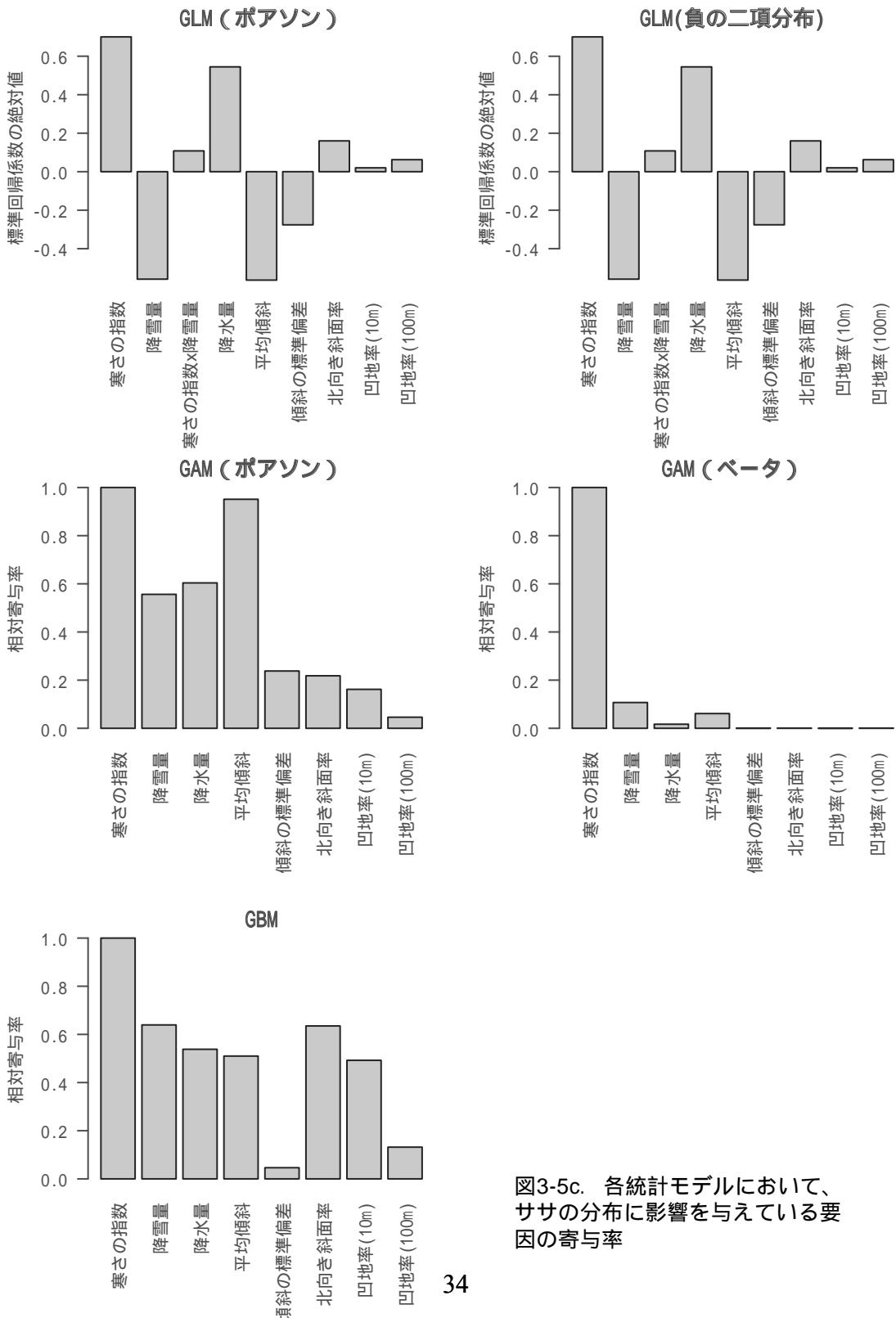


図3-5c. 各統計モデルにおいて、
ササの分布に影響を与えている要
因の寄与率

現在の分布(推定)

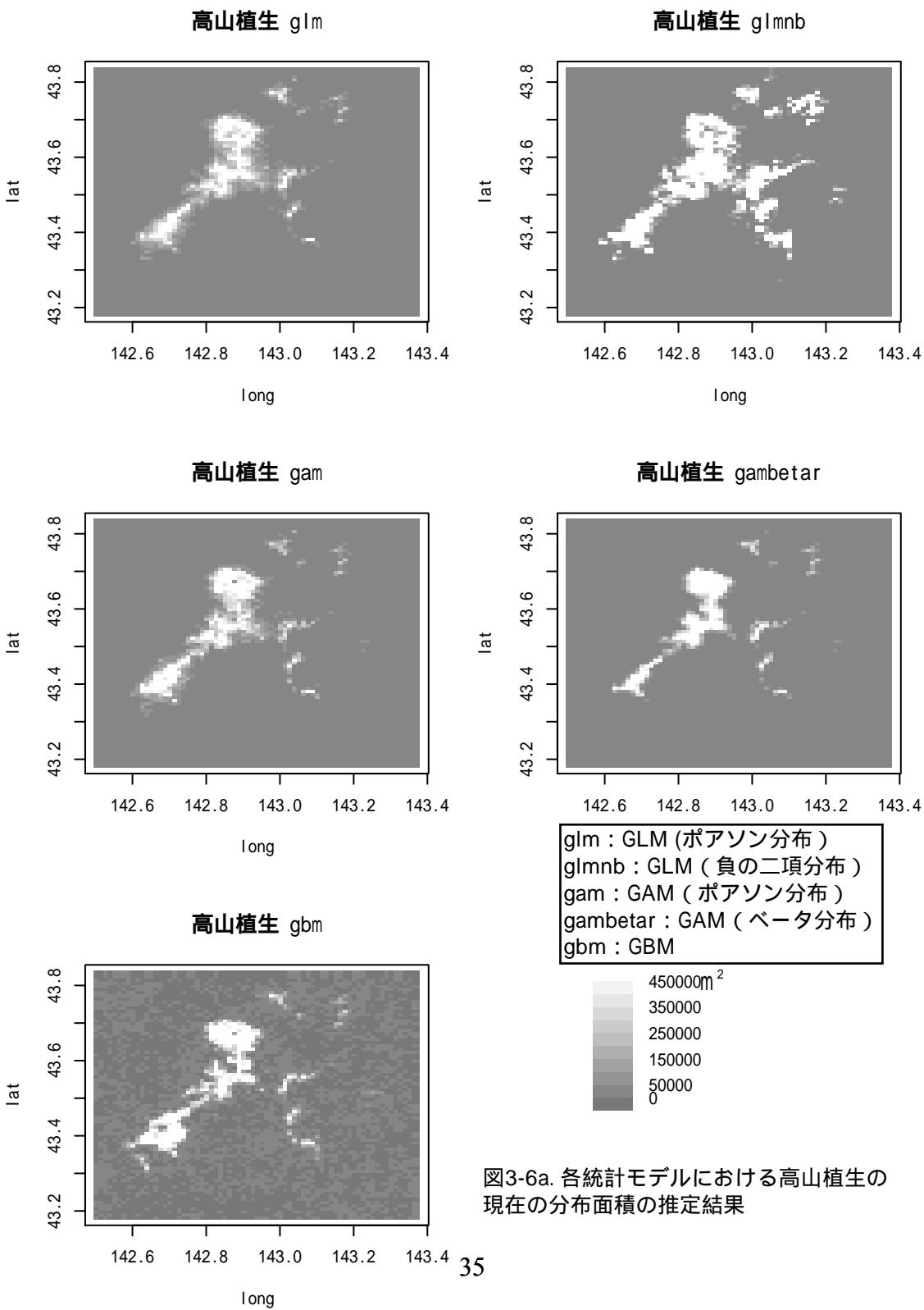
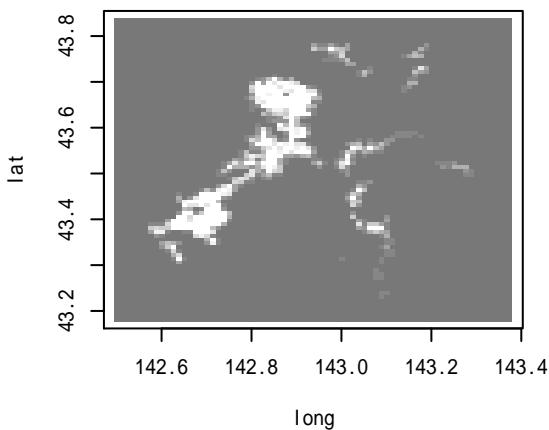


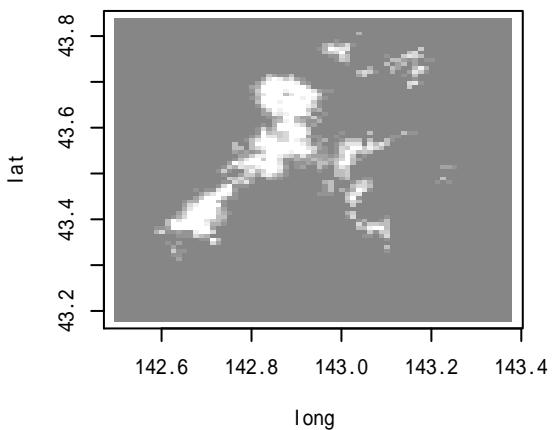
図3-6a. 各統計モデルにおける高山植生の現在の分布面積の推定結果

現在の分布

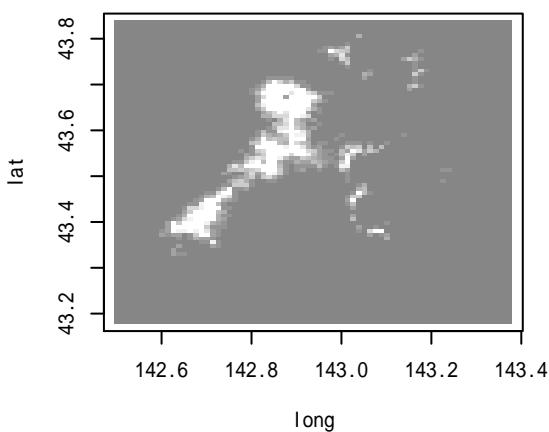
高山植生 実測



高山植生 モデル間の平均値



高山植生 モデル間の中央値



高山植生 モデル間の標準偏差

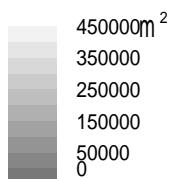
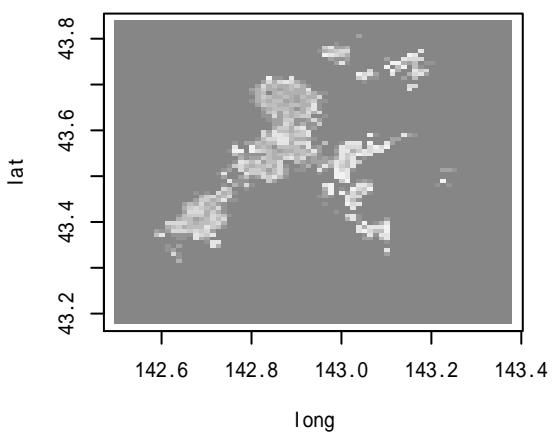
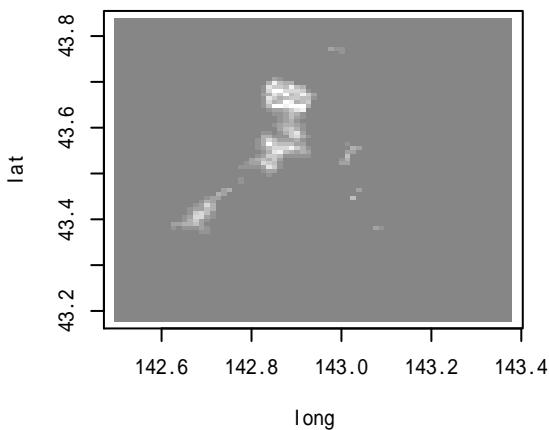


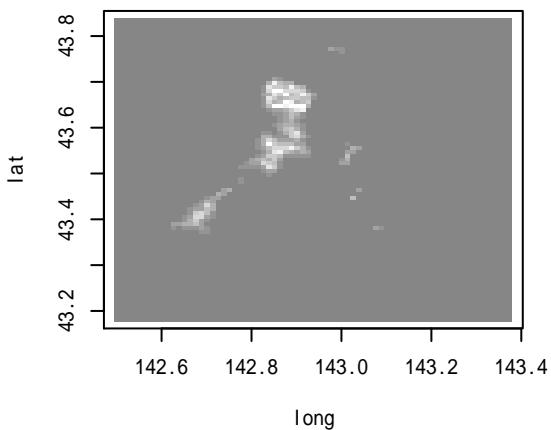
図3-6a. 各統計モデルにおける高山植生の現在の分布面積の推定結果（つづき）

現在の分布(推定)

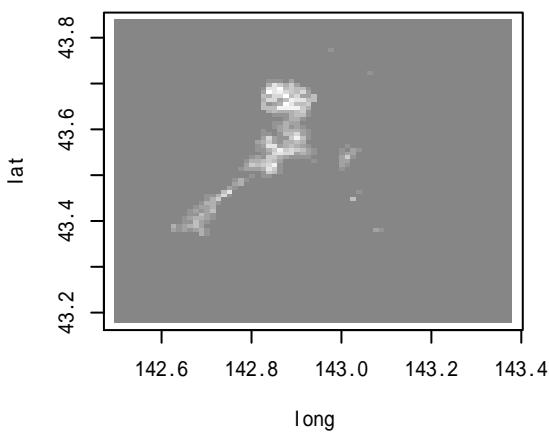
雪田草原 glm



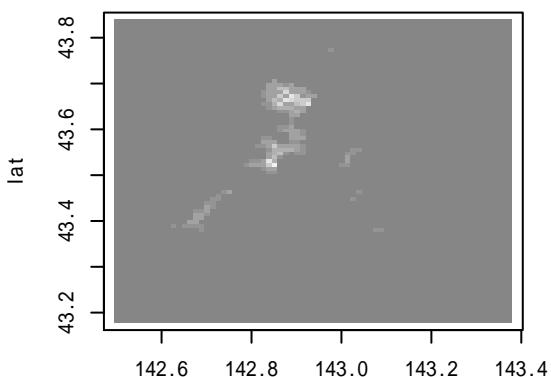
雪田草原 glmnbg



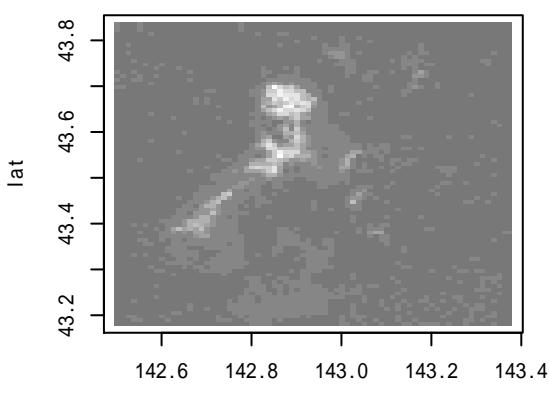
雪田草原 gam



雪田草原 gammatar



雪田草原 gbm



glm : GLM (ポアソン分布)
glmnbg : GLM (負の二項分布)
gam : GAM (ポアソン分布)
gammatar : GAM (ベータ分布)
gbm : GBM

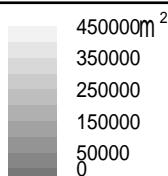
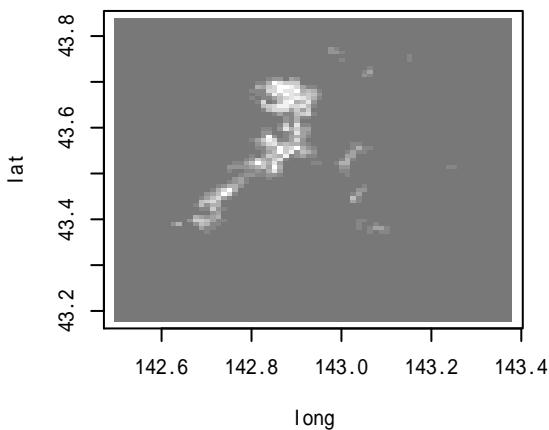


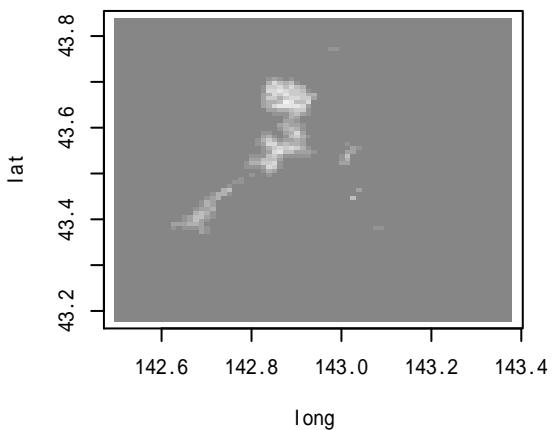
図3-6b. 各統計モデルにおける雪田草原の現在の分布面積の推定結果

現在の分布

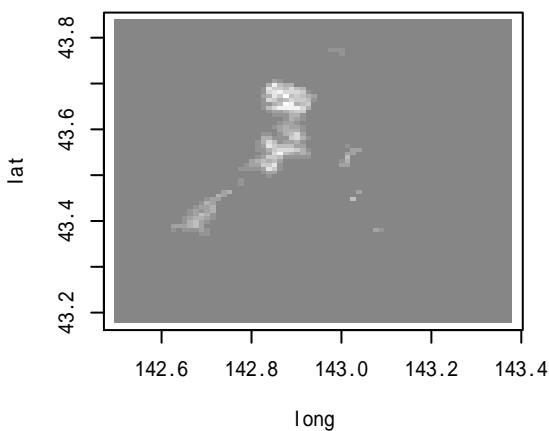
雪田草原 実測



雪田草原 モデル間の平均値



雪田草原 モデル間の中央値



雪田草原 モデル間の標準偏差

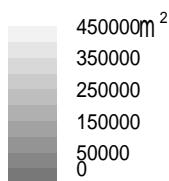
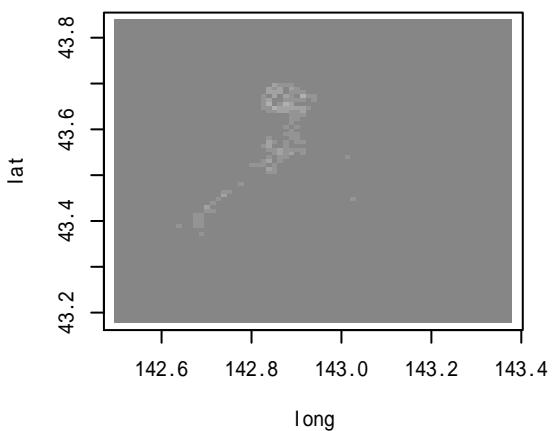
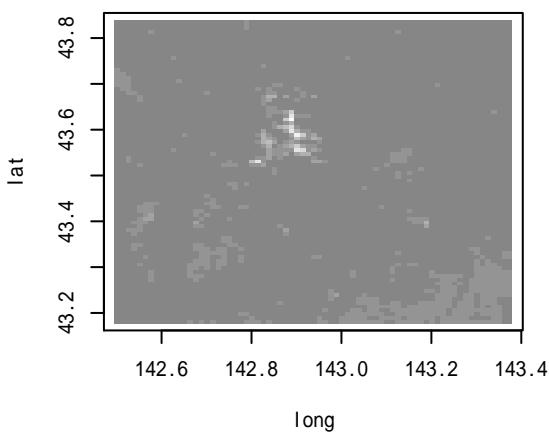


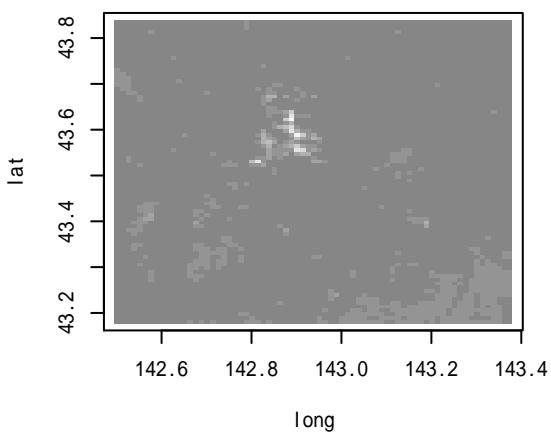
図3-6b. 各統計モデルにおける雪田草原の現在の分布面積の推定結果（つづき）

現在の分布(推定)

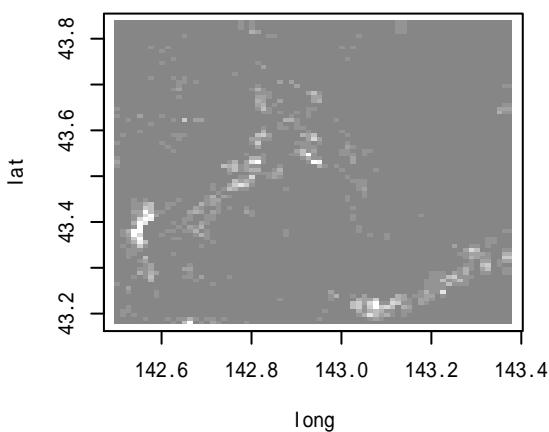
ササ glm



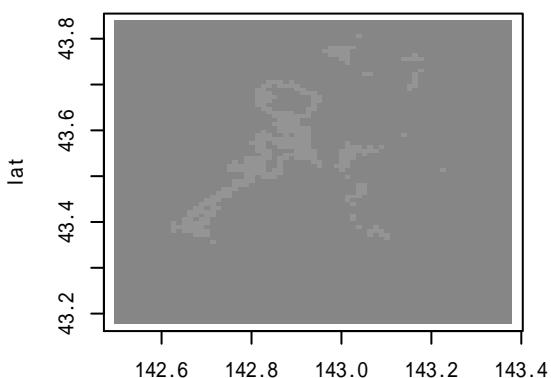
ササ glmnbg



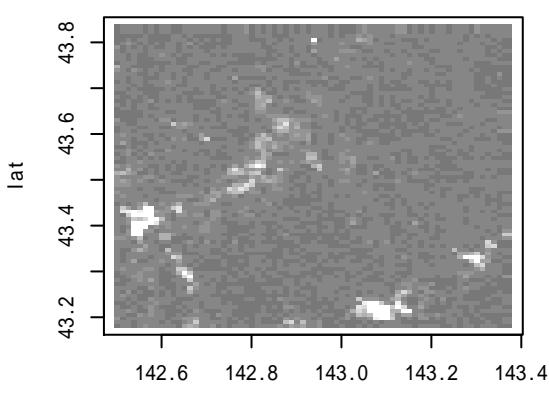
ササ gam



ササ gammatar



ササ gbm



glm : GLM (ポアソン分布)
glmnbg : GLM (負の二項分布)
gam : GAM (ポアソン分布)
gammatar : GAM (ベータ分布)
gbm : GBM

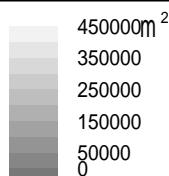
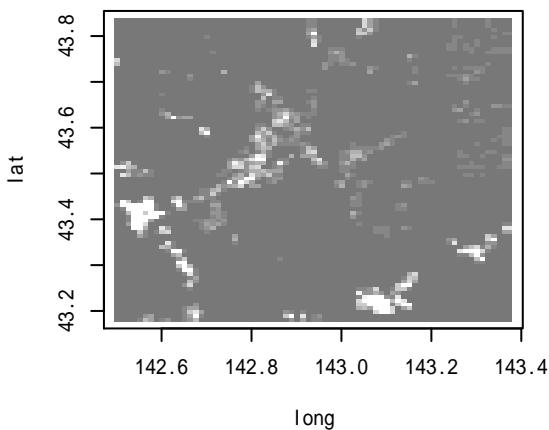


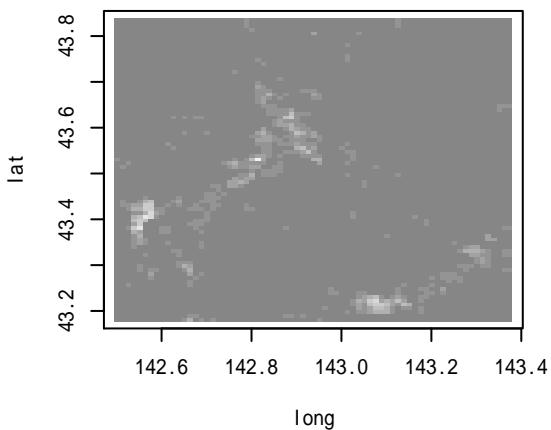
図3-6c. 各統計モデルにおけるササの現在の分布面積の推定結果

現在の分布

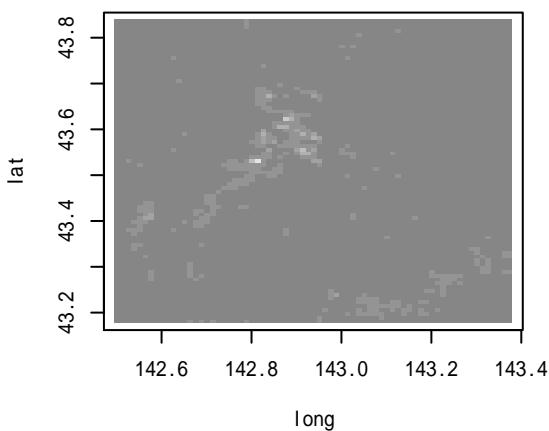
ササ 実測



ササ モデル間の平均値



ササ モデル間の中央値



ササ モデル間の標準偏差

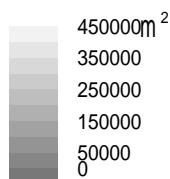
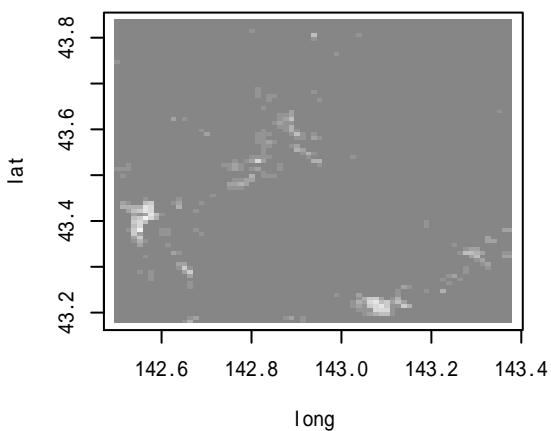
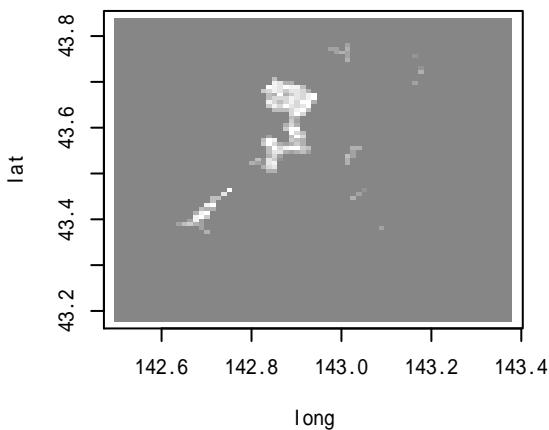
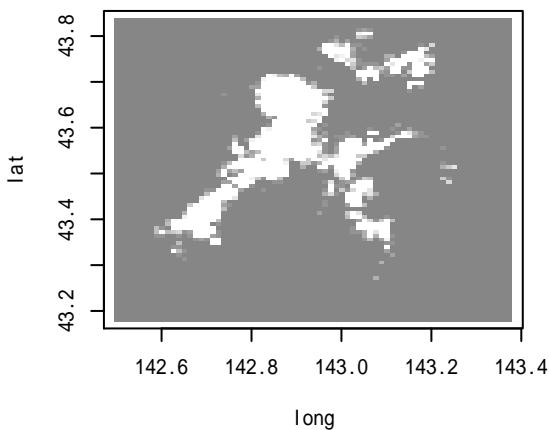


図3-6c. 各統計モデルにおけるササの現在の分布面積の推定結果（つづき）

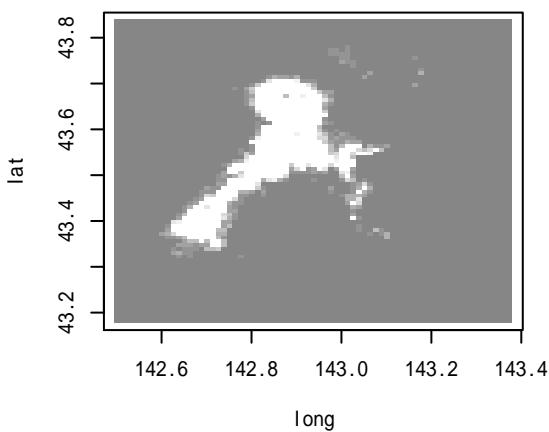
高山植生.集計 glm



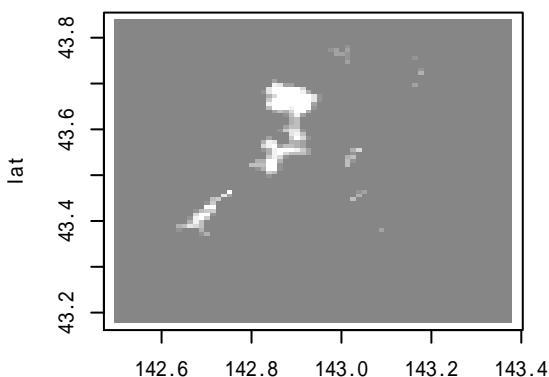
高山植生.集計 glmnb



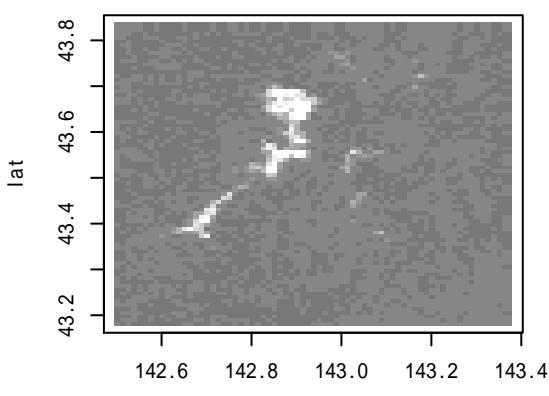
高山植生.集計 gam



高山植生.集計 gammatar



高山植生.集計 gbm



glm : GLM (ポアソン分布)
 glmnb : GLM (負の二項分布)
 gam : GAM (ポアソン分布)
 gammatar : GAM (ベータ分布)
 gbm : GBM

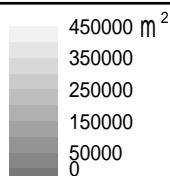
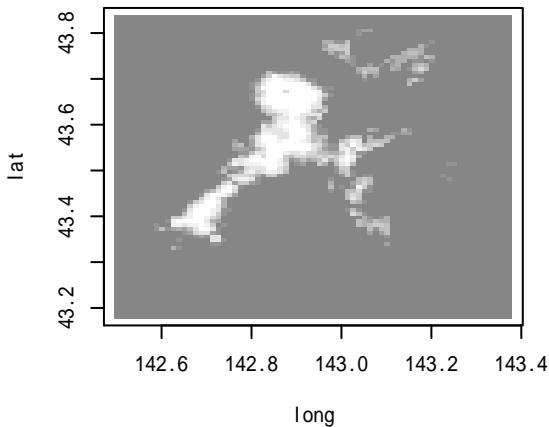
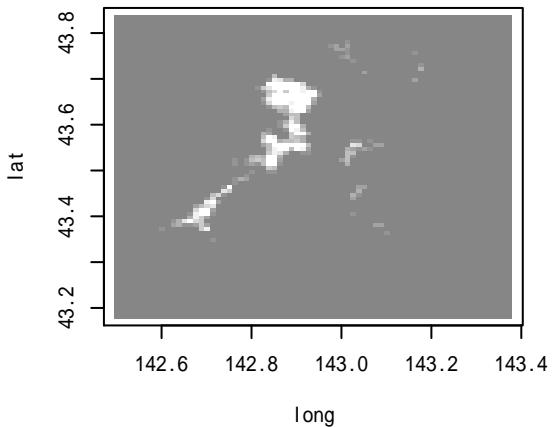


図3-7a. 各統計モデルにおける高山植生の
将来（2081-2100年）の分布面積の推定
結果

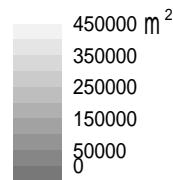
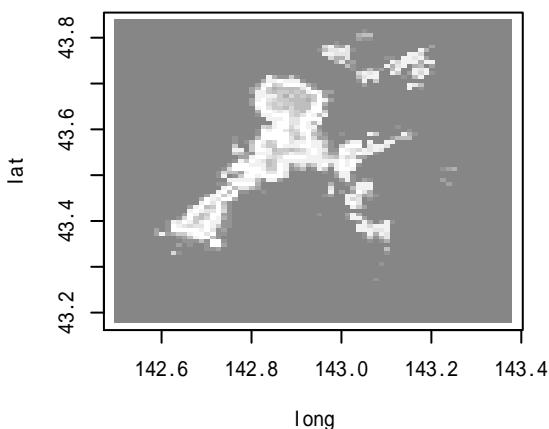
高山植生.集計 モデル間の平均値



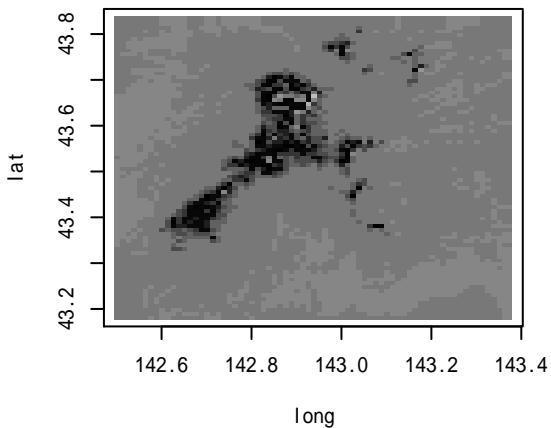
高山植生.集計 モデル間の中央値



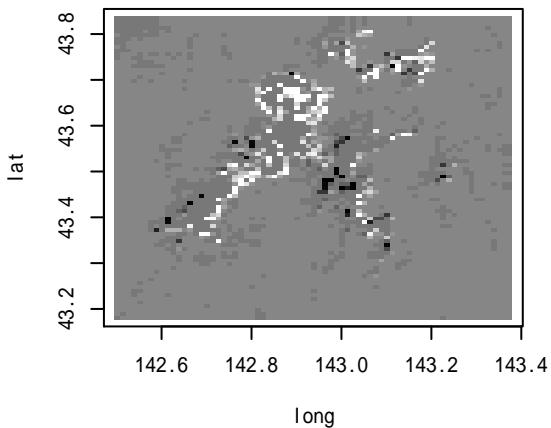
高山植生.集計 モデル間のSD

図3-7a. 各統計モデルにおける高山植生の
将来（2081-2100年）の分布面積の推定
結果（つづき）

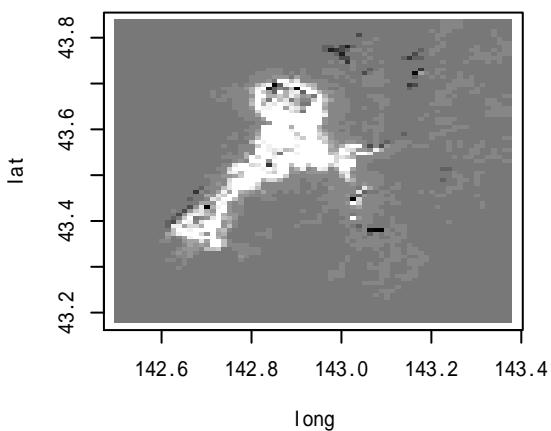
高山植生.集計 面積変化 glm



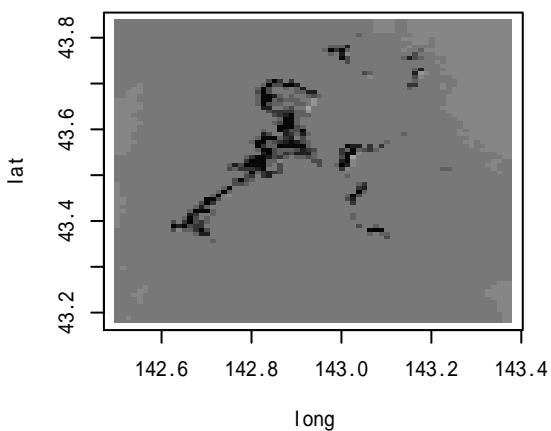
高山植生.集計 面積変化 glmnbb



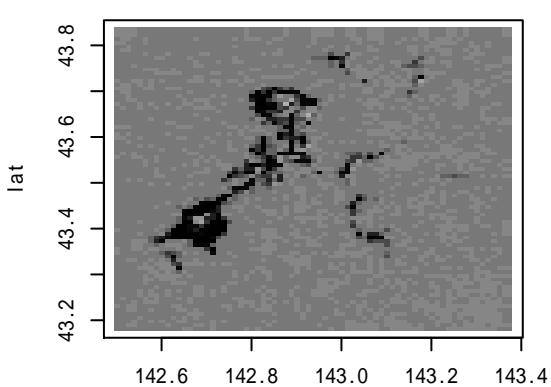
高山植生.集計 面積変化 gam



高山植生.集計 面積変化 gammatar

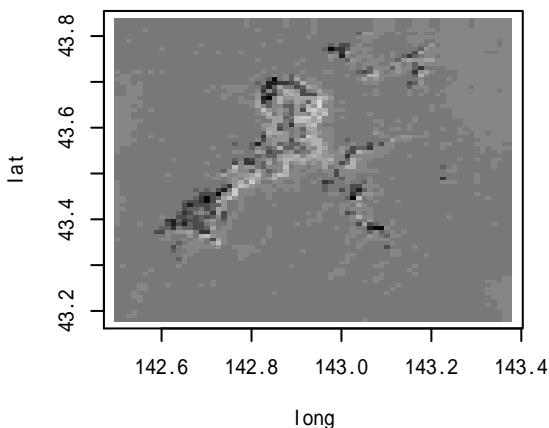


高山植生.集計 面積変化 gbm

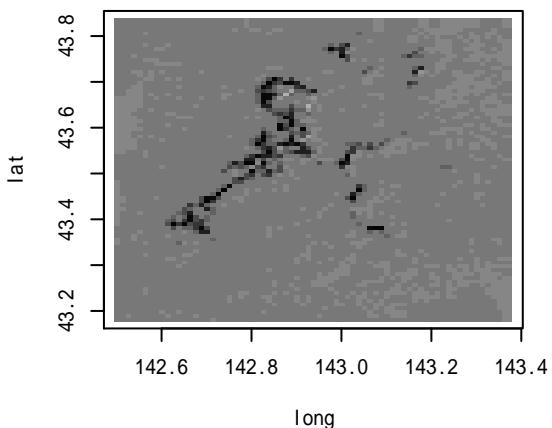


450000 m ²
350000
250000
150000
50000
-50000
-150000
-250000
-350000
-450000

高山植生.集計 面積変化のモデル間の平均値



高山植生.集計 面積変化のモデル間の中央値



高山植生.集計 面積変化のモデル間のSD

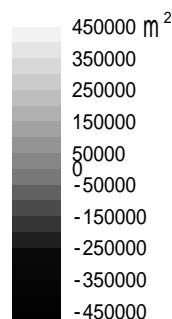
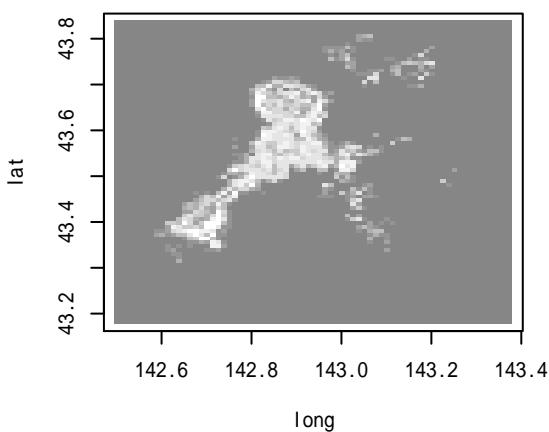
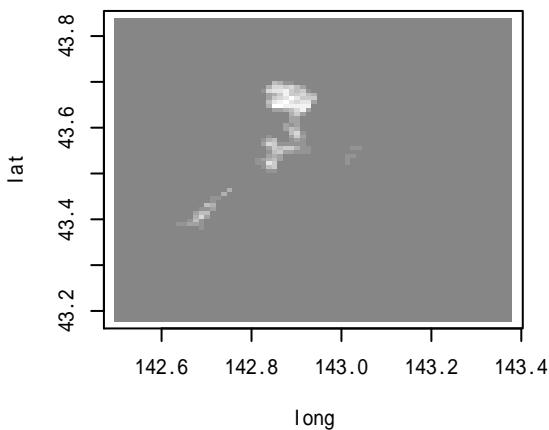


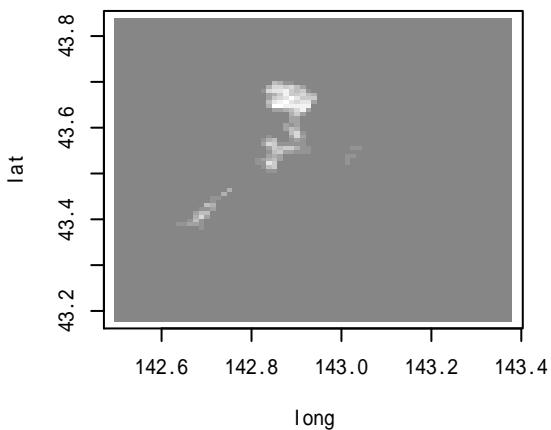
図3-7a. 各統計モデルにおける高山植生の将来（2081-2100年）の分布面積の推定結果（つづき）

将来予測

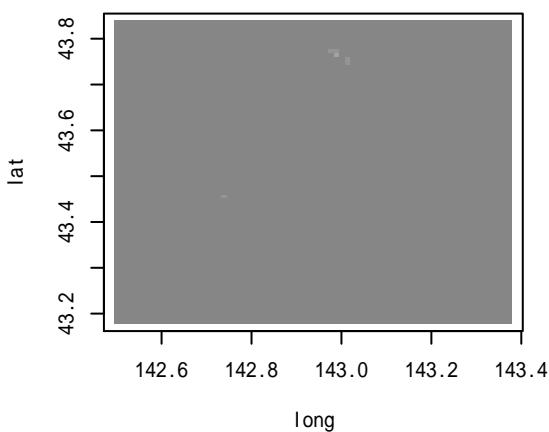
雪田草原.集計 glm



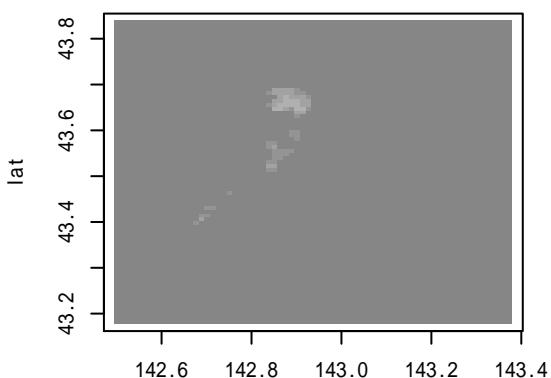
雪田草原.集計 glmnb



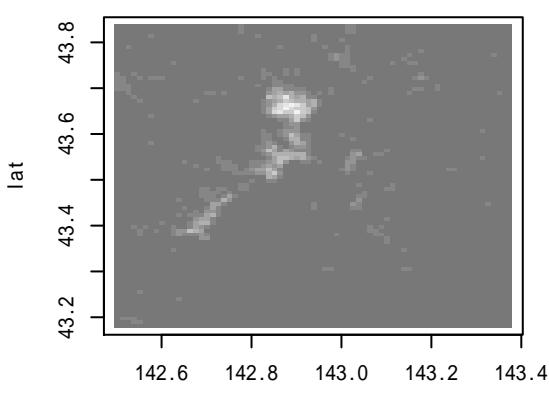
雪田草原.集計 gam



雪田草原.集計 gammatar



雪田草原.集計 gbm



glm : GLM (ポアソン分布)
 glmnb : GLM (負の二項分布)
 gam : GAM (ポアソン分布)
 gammatar : GAM (ベータ分布)
 gbm : GBM

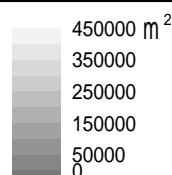
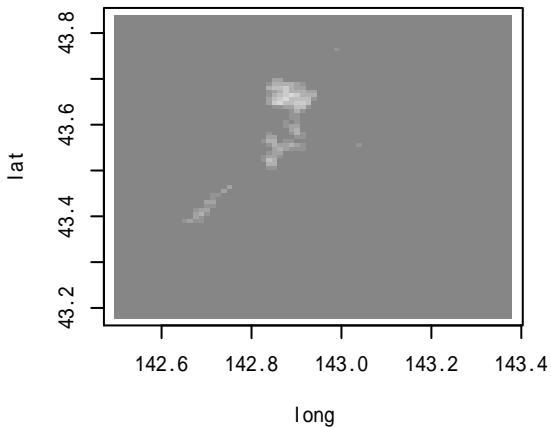
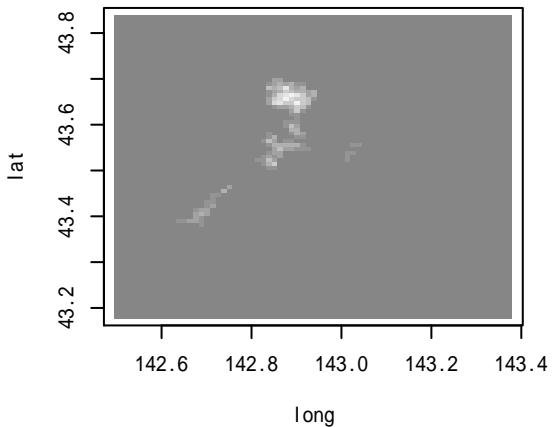


図3-7b. 各統計モデルにおける雪田草原の将来（2081-2100年）の分布面積の推定結果

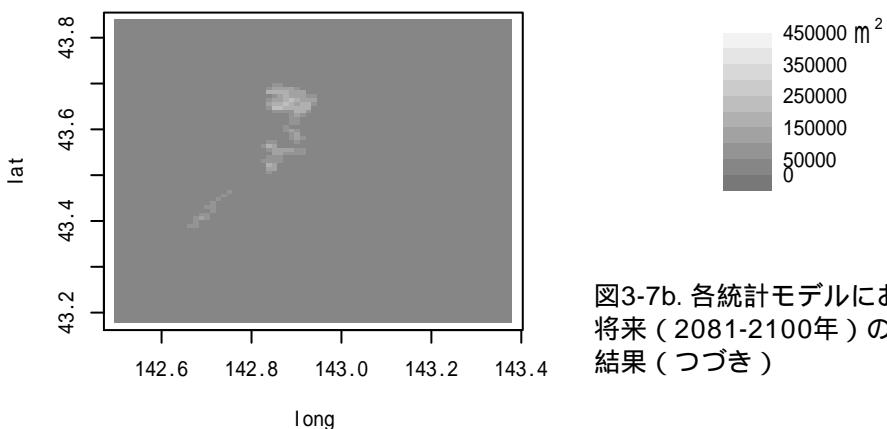
雪田草原.集計 モデル間の平均値



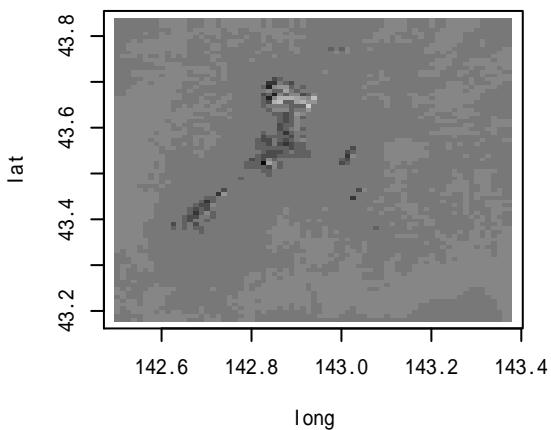
雪田草原.集計 モデル間の中央値



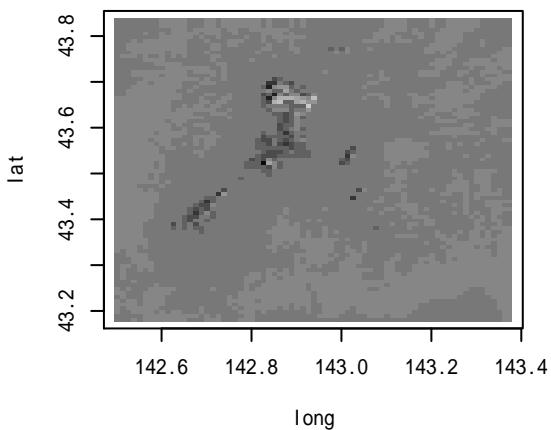
雪田草原.集計 モデル間のSD

図3-7b. 各統計モデルにおける雪田草原の
将来（2081-2100年）の分布面積の推定
結果（つづき）

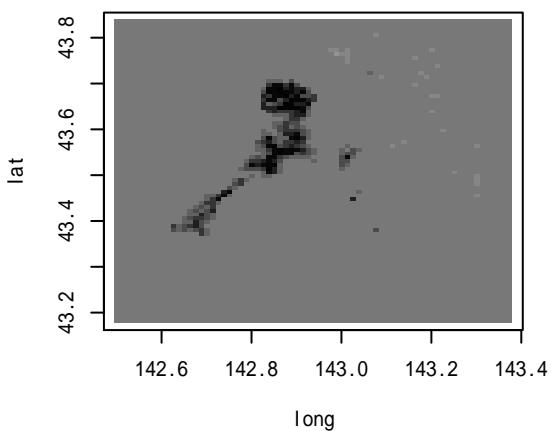
雪田草原.集計 面積変化 glm



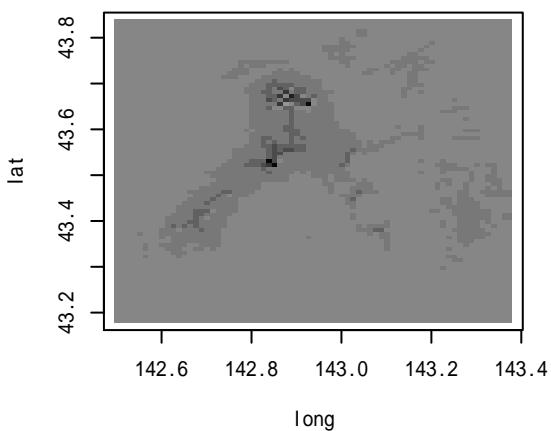
雪田草原.集計 面積変化 glmnbb



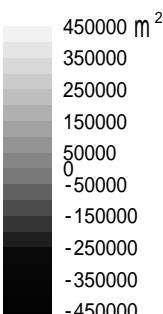
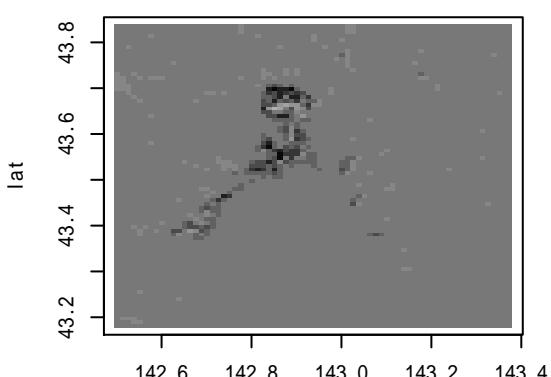
雪田草原.集計 面積変化 gam



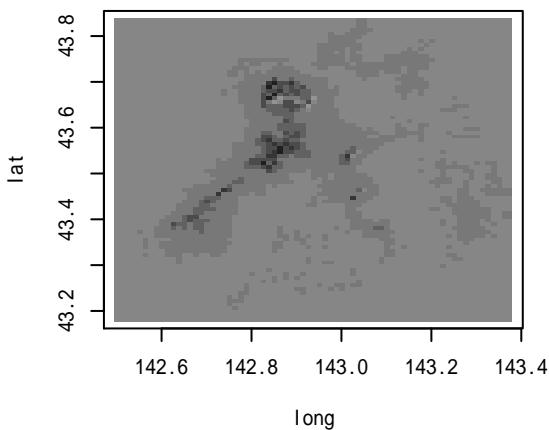
雪田草原.集計 面積変化 gambetar



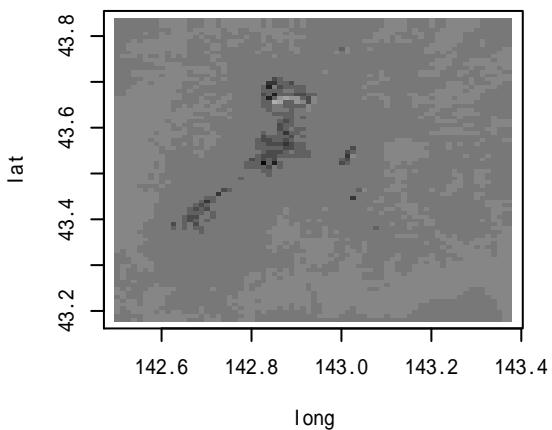
雪田草原.集計 面積変化 gbm



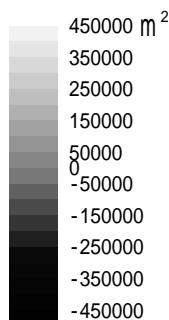
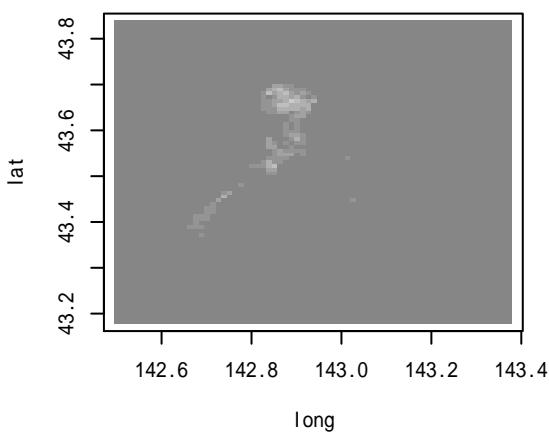
雪田草原.集計 面積変化のモデル間の平均値



雪田草原.集計 面積変化のモデル間の中央値

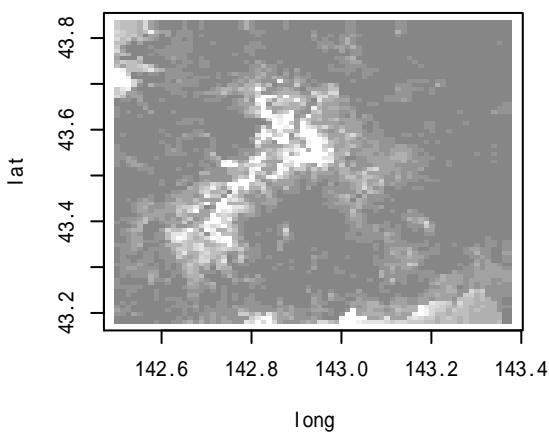


雪田草原.集計 面積変化のモデル間のSD

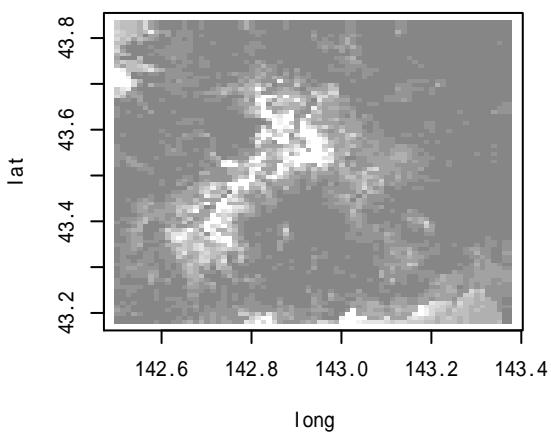
図3-7b. 各統計モデルにおける雪田草原の
将来(2081-2100年)の分布面積の推定
結果(つづき)

将来予測

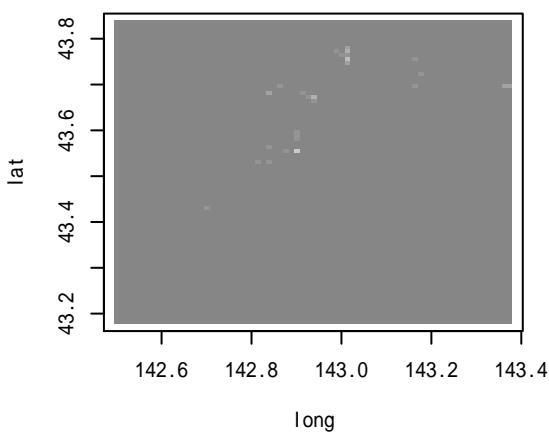
ササ.集計 glm



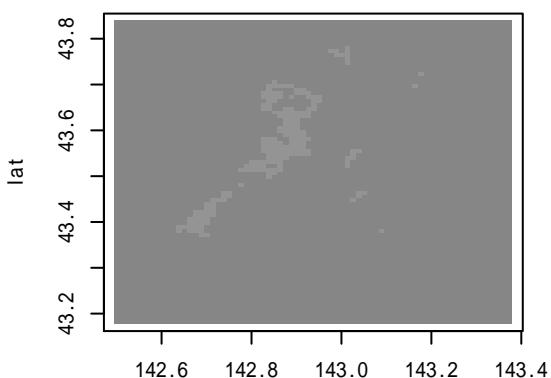
ササ.集計 glmnb



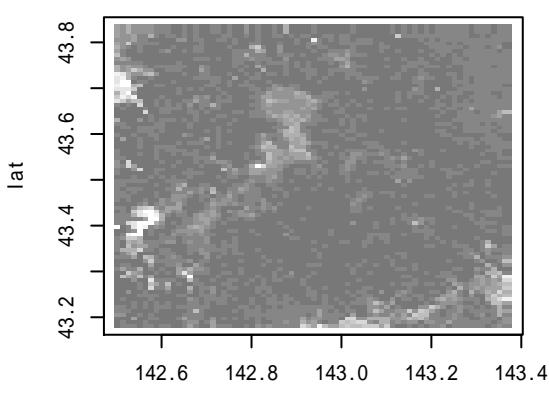
ササ.集計 gam



ササ.集計 gammatar



ササ.集計 gbm



glm : GLM (ポアソン分布)
 glmnb : GLM (負の二項分布)
 gam : GAM (ポアソン分布)
 gammatar : GAM (ベータ分布)
 gbm : GBM

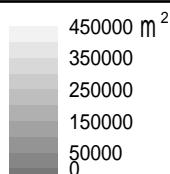
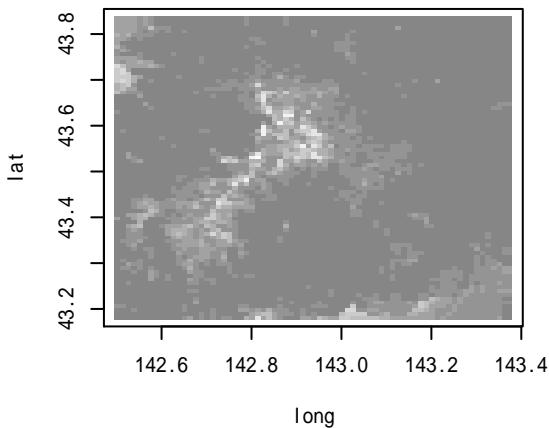
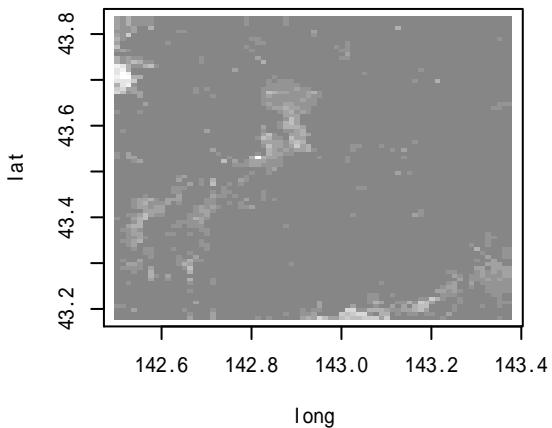


図3-7c. 各統計モデルにおけるササの将来
(2081-2100年) の分布面積の推定結果

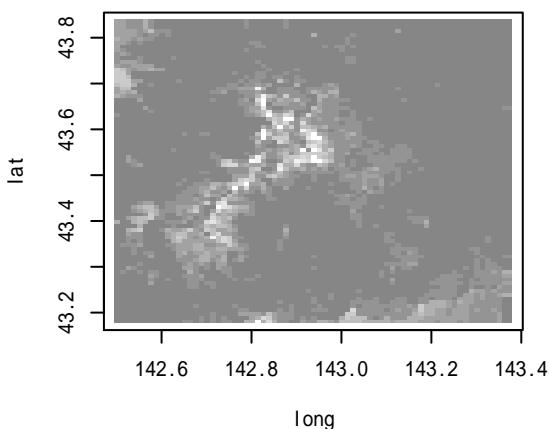
ササ.集計 モデル間の平均値



ササ.集計 モデル間の中央値



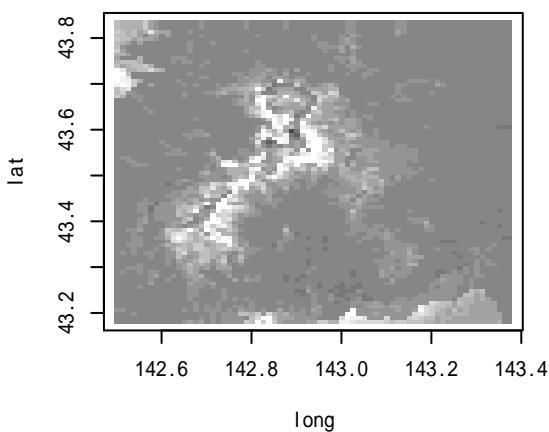
ササ.集計 モデル間のSD



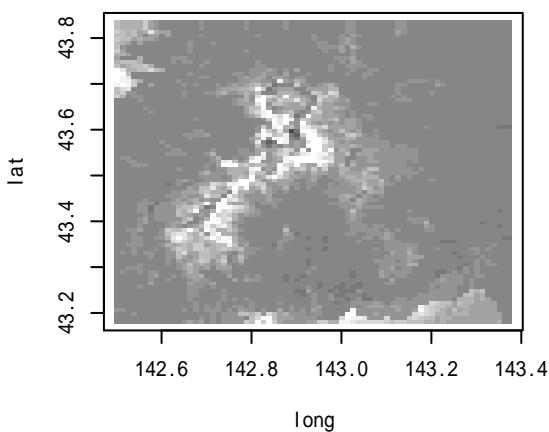
450000 m^2
350000
250000
150000
50000
0

図3-7c. 各統計モデルにおけるササの将来
(2081-2100年) の分布面積の推定結果
(つづき)

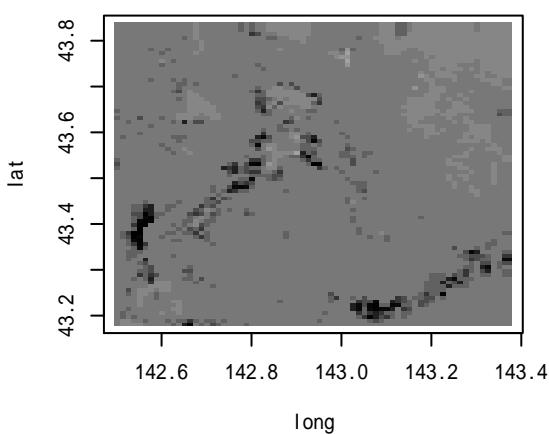
ササ.集計 面積変化 glm



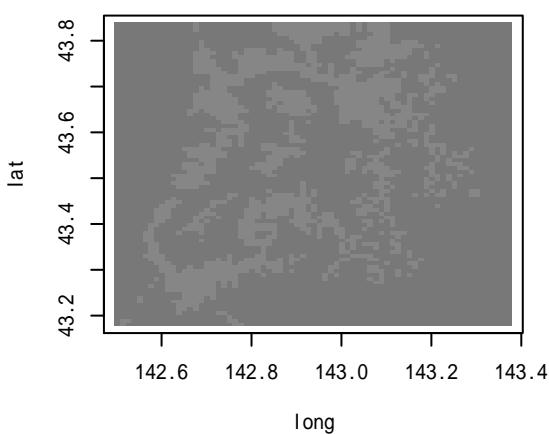
ササ.集計 面積変化 glmnbb



ササ.集計 面積変化 gam



ササ.集計 面積変化 gambetar



ササ.集計 面積変化 gbm

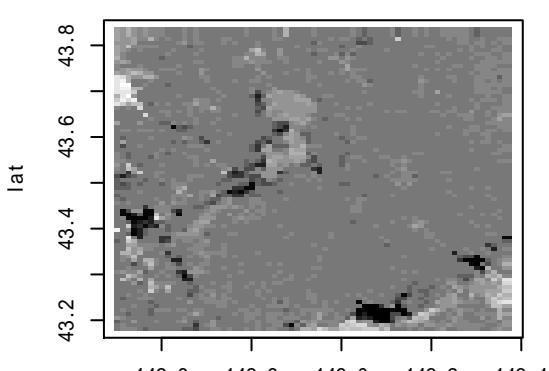
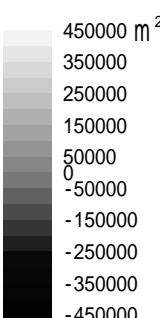
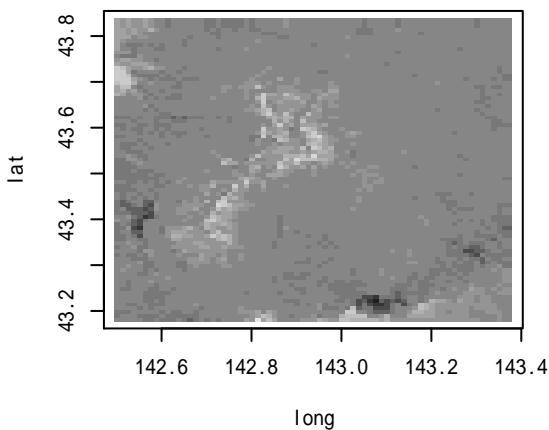


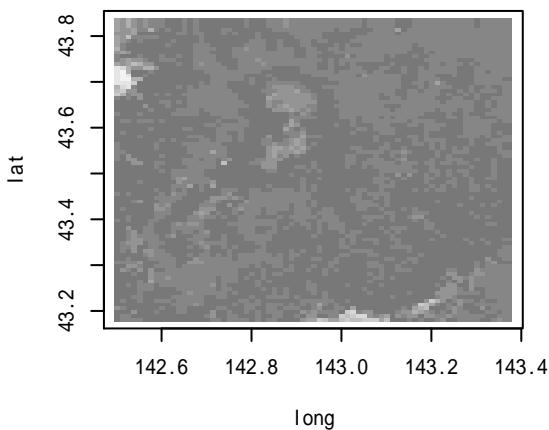
図3-7c. 各統計モデルにおけるササの将来
(2081-2100年) の分布面積の推定結果(つづき)



ササ・集計 面積変化のモデル間の平均値



ササ・集計 面積変化のモデル間の中央値



ササ・集計 面積変化のモデル間のSD

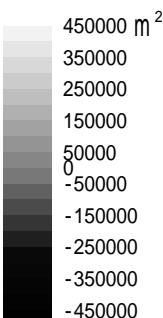
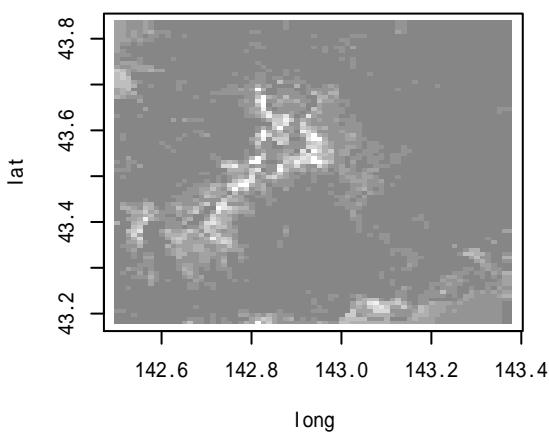


図3-7c. 各統計モデルにおけるササの将来
(2081-2100年)の分布面積の推定結果
(つづき)

考察

高山植生および雪田草原の分布推定は、現在の分布についてはいずれの手法でもよい推定が可能であったものの、主要な分布決定要因と考えられる、気温と降雪量の寄与に関する推定がばらついた。将来の分布推定結果が大きくばらついたのも、この 2 変数の寄与についての推定のばらつきが原因と考えられる。将来の気候の予測値は、2081 年から 2100 年において、気温が上昇するものの、降水量が大きく増加、降雪量も高山植生の辺縁部では増加するという予測となっている（図 3-4）。従って、高山植生および雪田草原の分布の決定に、寒さの指数のみ寄与が大きいと推定するモデルでは、これらの植生面積が将来は大幅に減少するとの予測となるが、降雪量の寄与も大きいと推定するモデルでは、降雪量の効果によって気温上昇の効果が相殺され、将来のこれらの植生の分布面積は拡大するとの予測となった。変数の寄与に関する分布推定モデル間の差異に加え、異なる気候モデルや RCP シナリオでは、予測が大きく変化する可能性も十分あるため、複数の気候モデル・シナリオでの検討が将来的には必要である。

有識者ヒアリングに際しては、高山植生や雪田草原の分布決定には、融雪時期が非常に重要であるとの指摘があった。従って、降雪量の影響を十分評価できていないモデルでは、予測結果に大きな差を生じるおそれがある。今回の分析で、降雪量の影響が評価できなかった原因としては、寒さの指数と、氷点下の月の降水量の間に比較的強い相関（相関係数 0.808）があったことが挙げられる。このような比較的強い相関がある理由は、対象地域内に存在する気候条件が低温かつ降雪量の多い条件ばかりで、低温で乾燥した地域がないということがまず考えられるが、そもそも降雪量の将来予測値がないため、氷点下の月の降水量を降雪の代替値として用いたということも大きな原因の 1 つである可能性が高い。

高山植生と雪田草原の分布予測の改善の方法として、ミクロスケールでのモニタリングによって得られる融雪と高山植生の分布の関係についてのデータの活用が考えられる。ミクロスケールで明らかになったメカニズムを組み込んだ、メカニスティックモデルを構築することで、融雪の影響を適切に考慮することが可能となる。しかし、このようなメカニスティックモデルを活用して将来予測を改善するためには、根本的には気候モデルの機能向上により、将来の降雪に関する予測が得られるようになることが必要である。また、現在の値についても、積雪深や融雪時期に関する情報は不十分であり、これらの値についてリモート

センシングなどを活用した面的な実測を行うことが、予測の改善に重要と考えられる。

ササ群落について、現在・将来ともに信頼性の高い推定値が得られなかつた原因として、地質要因などの寄与が考えられる。ササ群落は、比較的土壤の発達した場所にしか分布できない可能性があり、地質に関する説明変数をモデルに追加することで、精度が改善する可能性がある。

②紅葉日の予測

大雪山国立公園において、紅葉に多くの観光客が毎年訪れており、観光資源として非常に重要である。そのため、将来の紅葉日を予測することは、現在行われている規制の内容や時期を検討するために必要である。現在の紅葉日を気温から推定する手法を開発し、将来の気温変化に基づいて紅葉日の変化予測を行った。

使用したデータ

層雲峠ビジターセンターのウェブサイトの「フィールドノート」(<http://sounkyovc.net/fieldnotes>)で、2008年から2015年の紅葉カレンダーを取得した。2016年については直接コンタクトをとり、公開準備中のデータの提供を受けた。この紅葉カレンダーには、各観測地点(13地点)の標高(600mから1900mの範囲)も掲載されている。紅葉カレンダーから、それぞれの地点・年での、紅葉のピークとなる期間の開始日を読み取った(図3-8)。

各地点の年ごとの詳細な温度データは存在しないので、もっとも近いアメダス測定点である志比内(標高310m)での、2008年以降の日々の日平均気温データを気象庁のデータ提供ページ(<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>) (表2-1)から取得した。

紅葉日予測モデルの構築

標高の変化にともなう温度低減率から各地点の日々の温度を推定した。大雪山周辺地域(北緯43.1875°~43.8292°、東経143.3688°~142.5062°)の中から平均標高が標高145mから2111mの範囲の21の三次メッシュ(ほぼ標高100mおき)を選び、それらについて農業環境技術研究所・農業環境情報データセンター(<http://agrienv dc.affrc.go.jp/mesh/mesh.html>)提供のメッシュ気候データ(表3-1)から、2000年から2009年の日ごとの気温データを取得した。このデータから、標高と月平均気温との関係を求めたところ、月ごとに計算した気温低減率はほぼ100mあたり0.51度から0.63度、年平均で0.55度であった。この低減率平均値を用いて志比内の気象観測点のデータから紅葉観測地点の日ごとの日平均気温を計算した。

各紅葉観測地点について、志比内のアメダスデータおよび気温低減率から求

めた日平均気温のデータから、紅葉のピークが始まる日を推定する統計モデルを探索した。

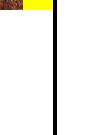
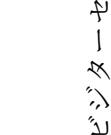
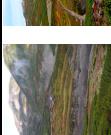
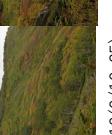
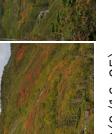
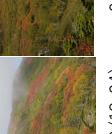
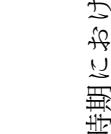
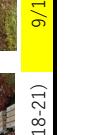
ある閾値温度以下の積算の寒さ、あるいは閾値以下の温度となる日数の積算などの指標は、紅葉ピーク日を推定するよい説明変数とはならなかった。これは、閾値をどのように変えても同様であった。8月中旬から9月上旬ごろを開始日とした30日間の平均気温が、直線回帰により、紅葉のピークの開始日のよい説明変数となるという結果が得られた。

この結果から、たとえば9月1ヶ月の平均気温を T_{sep} とすると、紅葉ピークの開始日 D (1月1日から数えた日数) は、 $D = 230.6 + 3.22 T_{sep}$ で与えられる。

ただし、高標高地点の年による紅葉日の変動は、かならずしもきれいに平均気温で説明されていない。これは平均気温以外の要因（日照など）の影響を強く受けている可能性があるが、紅葉の開始と進行をコントロールする要因と生理的メカニズムが十分に明らかにされておらず、より詳細な検討は容易ではない。

紅葉日の将来予測

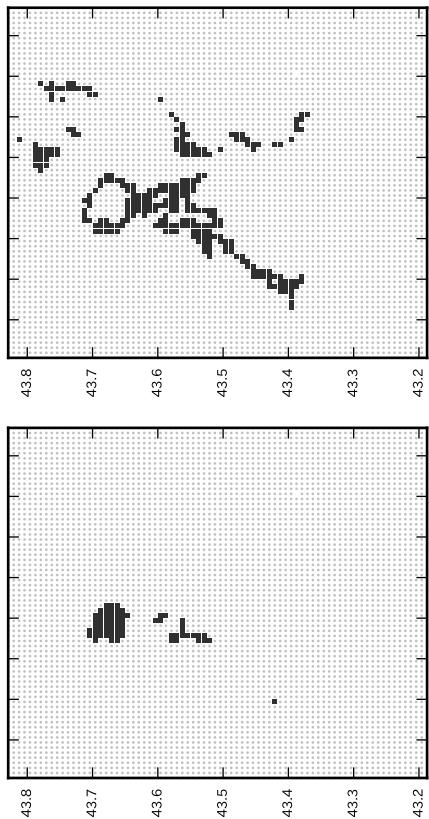
上で求めた推定式のうち、9月1ヶ月の平均気温から推定するモデルと、一般財団法人気象業務支援センターが提供するメッシュ平年値 2010 年 (<http://www.jmbsc.or.jp/jp/offline/cd0490.html>) (表 2-1, 表 3-1) の月平均気温の平年値 (1981 年から 2010 年)、および MIROC5 の RCP8.5 シナリオによる予測データ (2081 年から 2100 年) (表 2-2) により、大雪山周辺地域 (北緯 43.1875°～43.8292°、東経 143.3688°～142.5062°) の 3 次メッシュ 5460 区画について、現在および将来の紅葉ピーク開始日を計算し、図 3-9 に示した。いずれも標高が高い区画から紅葉が始まつて麓へと降りていくこと、現在と将来とでは最大約 3 週間のズレがあることが分かる。

	2008	2008 2度目	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
石室										
マキ岩 (9合目)										
黒岳5合目										
赤岳第3雪渓										
赤岳第一花園										
赤岳第二花園										
縄岳第一花畠										
縄岳第二花畠										

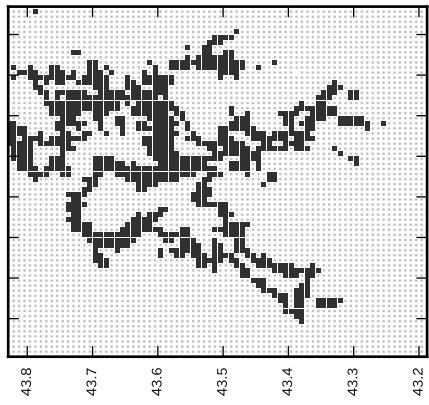
日付は撮影日　○ 内は紅葉ピーク期間
■ ピーク期間外の画像

図3-8 大雪山紅葉カレンダーの紅葉見頃時期における定点撮影画像（層雲峠ビジターセンターのデータより）

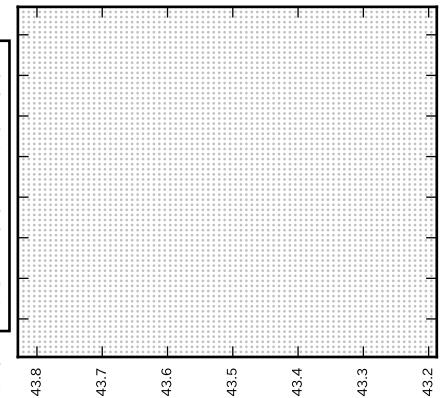
現在 day 243 - 249 (1981-2010)



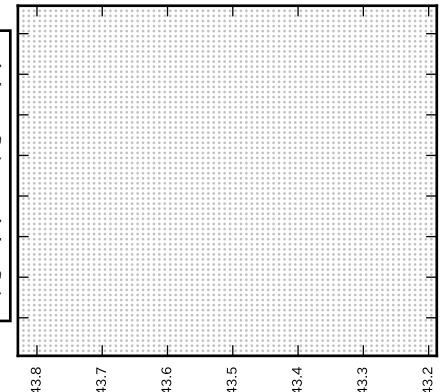
day 250 - 256 (1981-2010)



将来 8月31日 ~ 9月6日



9月7日 ~ 9月13日



9月14日 ~ 9月20日

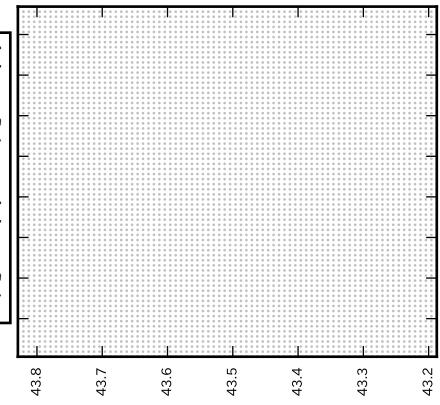
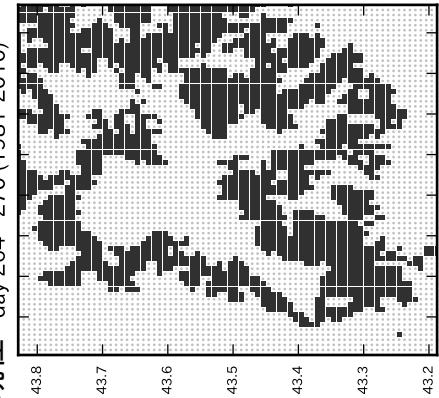
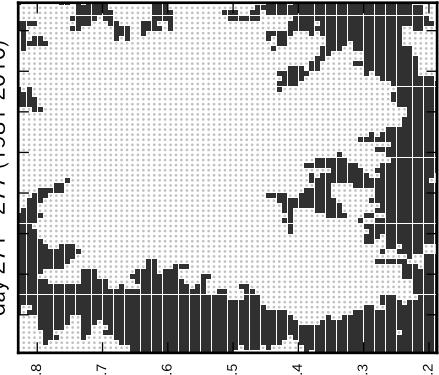


図3-9. 現在と将来（2081-2100年）における紅葉の状況。黒いセルが紅葉開始したことを示す。

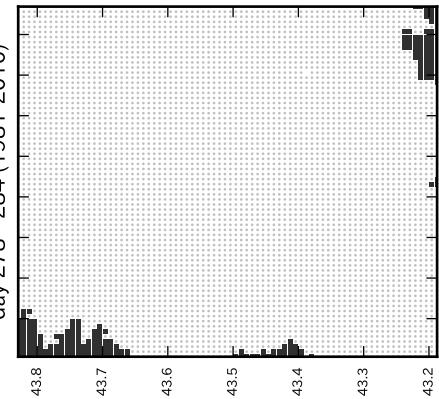
現在 day 264 - 270 (1981-2010)



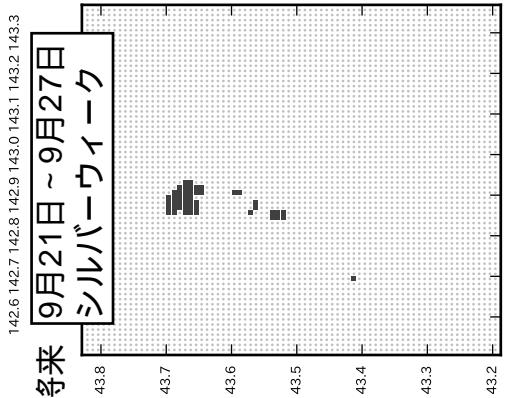
day 264 - 270 (1981-2010)



day 278 - 284 (1981-2010)



将来 9月21日～9月27日
シルバーウィーク



10月5日～10月11日

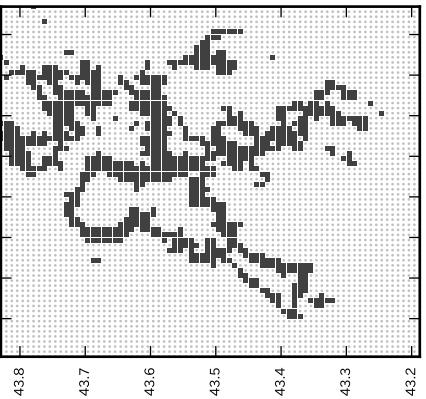
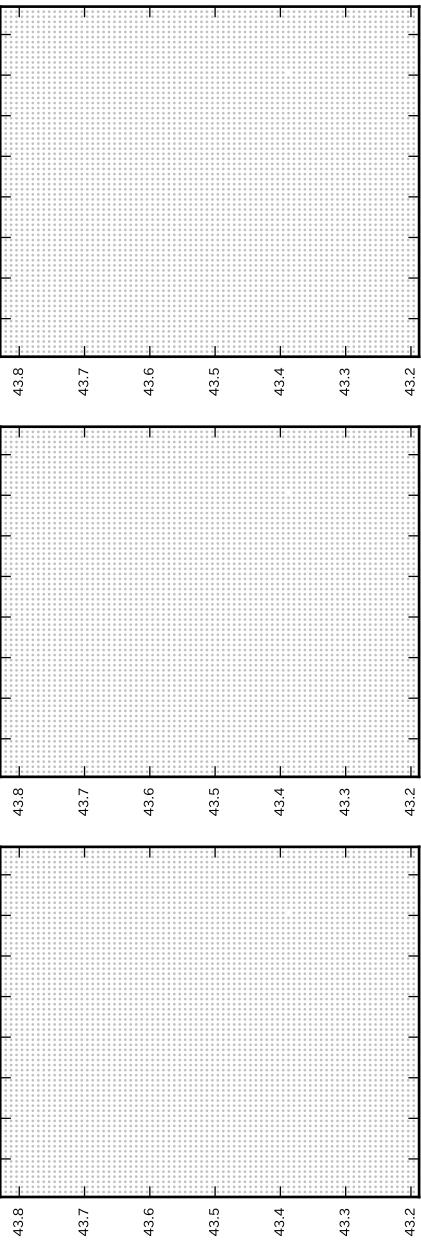


図3-9. 現在と将来（2081-2100年）における紅葉の状況。黒いセルが紅葉開始したことを示す。（つづき）

day 285 - 291 (1981-2010)

day 299 - 305 (1981-2010)

将来
10月12日～10月18日

10月19日～10月25日

10月26日～11月1日

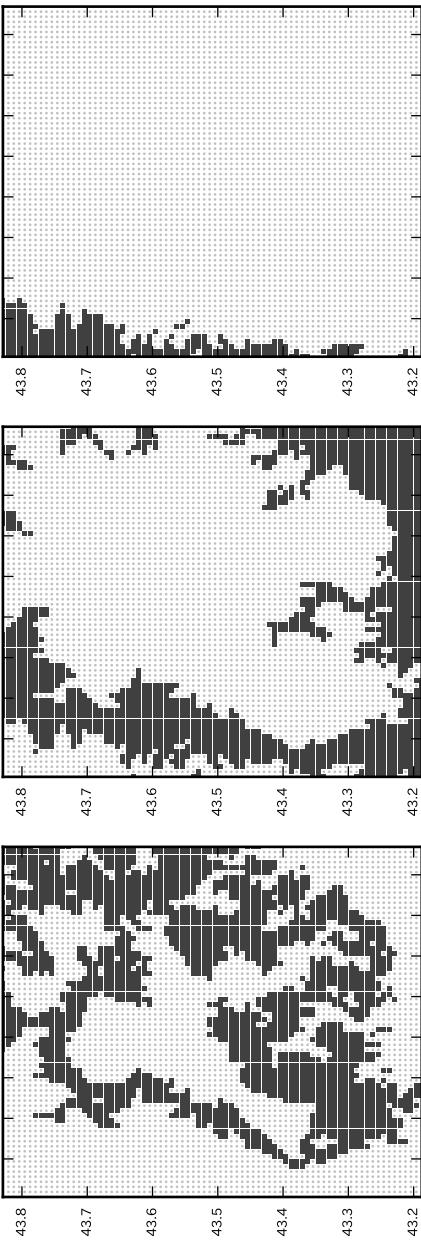


図3-9. 現在と将来（2081-2100年）における紅葉の状況。黒いセルが紅葉開始したことを示す。（つづき）

図3-9. 現在と将来（2081-2100年）における紅葉の状況。黒いセルが紅葉開始したことを示す。（つづき）

ステップ4：適応オプションの抽出と管理計画の立案

紅葉日予測においては、生物への介入が困難であるため、気候変動による影響に対して利用面での適応オプションと管理計画案を提案した。一方、高山植生及び雪田植生に関しては、気候変動による影響を踏まえた規制や利用の方向性を検討するため、将来の分布域と、高山植生及び雪田植生と競合するササ分布の将来予測結果、現在の管理に関する特別保護地区、大雪山グレードと登山者数、モニタリング地点（モニタリングサイト1000）のレイヤーを重ねて検討を行った（図3-10）。適応オプションに関しては、環境省自然環境局が2015年に提示した「生物多様性分野における気候変動への適応についての基本的考え方」に示された適応オプションと対応させた上で、現在の管理や利用を参考して管理計画案を提案した（図2-2）。一部（低地性・南方性生物の侵入抑制）に関しては、情報不足のため予測は行わなかったが、有識者ヒアリングで考慮すべき点として挙がったものである。ただし、この結果はあくまで試行で、予測は1つの気候モデルの1つの気候変動シナリオのもとで、分布推定モデルのうちいくつかのみを用いたものであることに注意されたい。合意形成材料は、複数の主体が判断の根拠とすることに鑑み、不確実性の評価を行った上で作成すべきである。

施策の種類： モニタリングの拡充・評価及び順応的管理

方針： 研究と技術開発の推進

管理計画案： 予測結果の向上と不確実性評価を行う。雪解けや登山道浸食など、新たなデータの収集解析とともに、複数の気候モデルやRCPシナリオ等を用いて変化予測を行う（4.まとめと今後の課題で詳述）。

方針： 気候変動の影響の把握

管理計画案： 将来的にササが増加して高山植生と雪田草原との競合が起こる可能性がある（図3-10；黒岳周辺等）が、モニタリング地点（モニタリングサイト1000）は限られている。特に競合が

起こりやすい地点においてモニタリングを拡充し、コストと手間を考慮してササ刈りを行う。

方針： 生態系サービスへの影響の把握

管理計画案： 紅葉は、毎年多くの観光客を惹きつけている。現在の紅葉のピークが9月20日のシルバーウィーク付近であるのに対し、将来は最大3週間程度遅れ10月12日となる（図3-9）。観光客への影響を評価し、マイカー規制等の規制の時期の変更を検討する。

施策の種類： 気候変動に順応性の高い健全な生態系の保全・再生

方針： 気候変動の影響が少ない地域の特定と優先的な保全

管理計画案： 高山植生と雪田草原の現在と将来の分布域はおおむね特別保護地区と一致するため、現在の規制を継続する（図3-3, 3-10）。

方針： 気候変動以外のストレス低減

管理計画案： 将来高山植生と雪田草原が残存するのは黒岳及び十勝岳周辺が中心となるため、これらの地域の高山植生と雪田草原の維持が重要となる。特に黒岳は登山者も多いため、登山道が高山植生と雪田草原の分布域に近接しているか精査して、ロープ柵の適切な配置や普及啓発を含む登山道の維持管理により、適正な登山が行われるように誘導する（図3-10）。

方針： 移動・分散経路の確保

管理計画案： 高山植生と雪田草原の分布域において、一部特別保護地区から外れている区域（図3-3）や将来的に国立公園外へ分布する区域（図3-10；ニセイカウシュッペ山東部等）が存在する。それらの区域において、将来の分布変化を考慮して特別保護地区や国立公園区域の事前拡張の検討を行う。

施策の種類： 現在の生態系・種を維持するための管理

- 方針： 生態系の維持・再生
- 管理計画案： 将来的にササが増加して高山植生と雪田草原との競合が起こる可能性がある（図3-10；黒岳周辺等）が、モニタリング地点（モニタリングサイト1000）は限られている。特に競合が起こりやすい地点においてモニタリングを拡充し、コストと手間を考慮してササ刈りを行う。（再掲）
- 方針： 生態系の維持・再生
- 管理計画案： 低地性植物の高山帯への侵入等が気候変動に伴って進むことで、現在の生態系・種に著しい影響が及び得る場合は、利用者の登山靴の洗浄（種子除去）等の方策を検討する。
- 施策の種類：** 生息域外保全
- 方針： 生息域外保全
- 管理計画案： 高山植生と雪田草原が消滅する区域が存在するため（図3-10）、特に飛び地の場合は詳細な植生調査を行って、固有種等の存在が確認されたら域外保全を検討する。

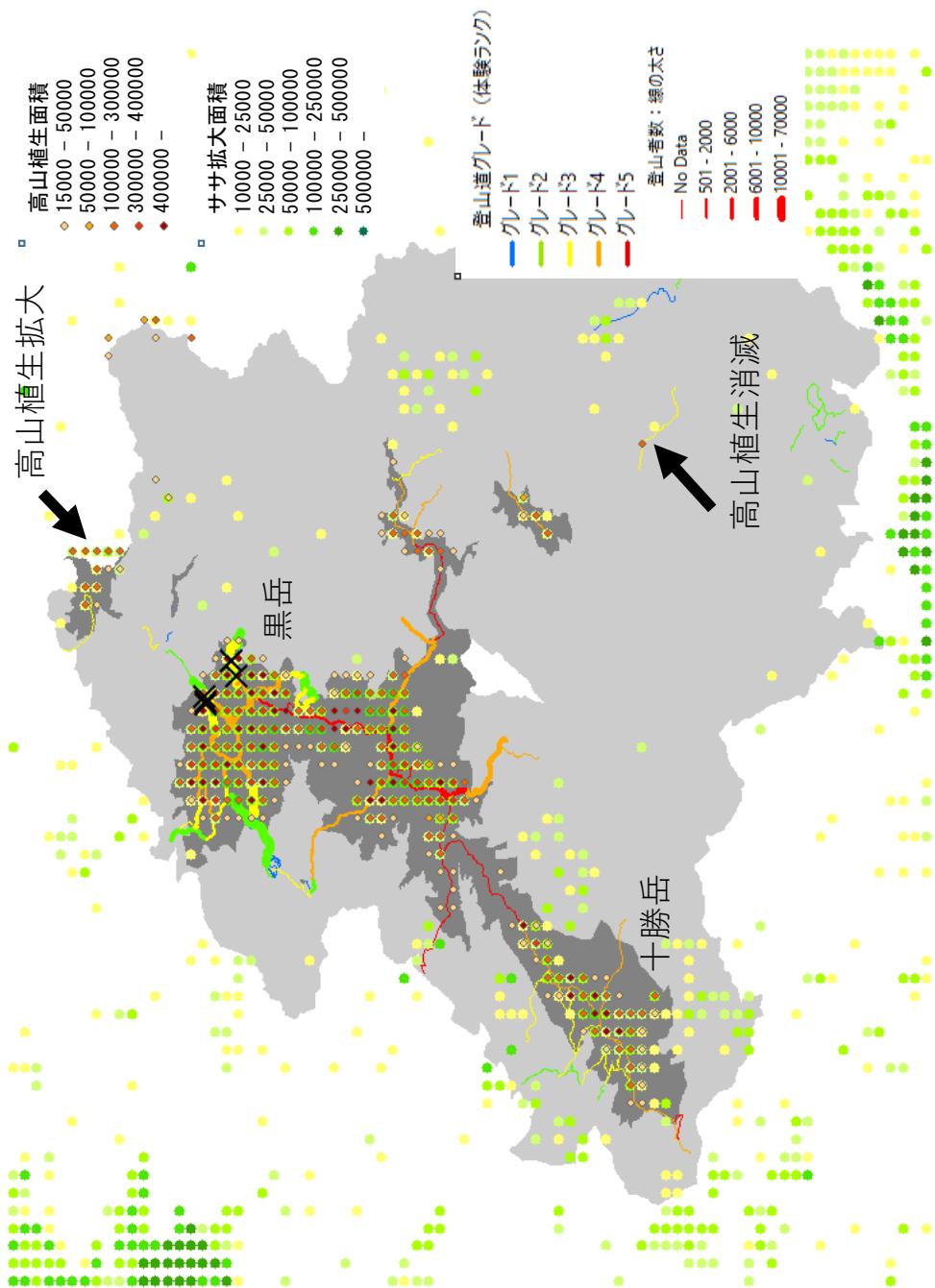


図 3-10a. 将来の高山植生分布とササの拡大面積(m²)と、大雪山グレードと登山者数 (Shoji et al., 2008)。×印はモニタリングサイート 1000 のモニタリング地点。高山植生分布面積は GML を用いた結果を、ササ拡大面積は全モデルの中央値を用いた

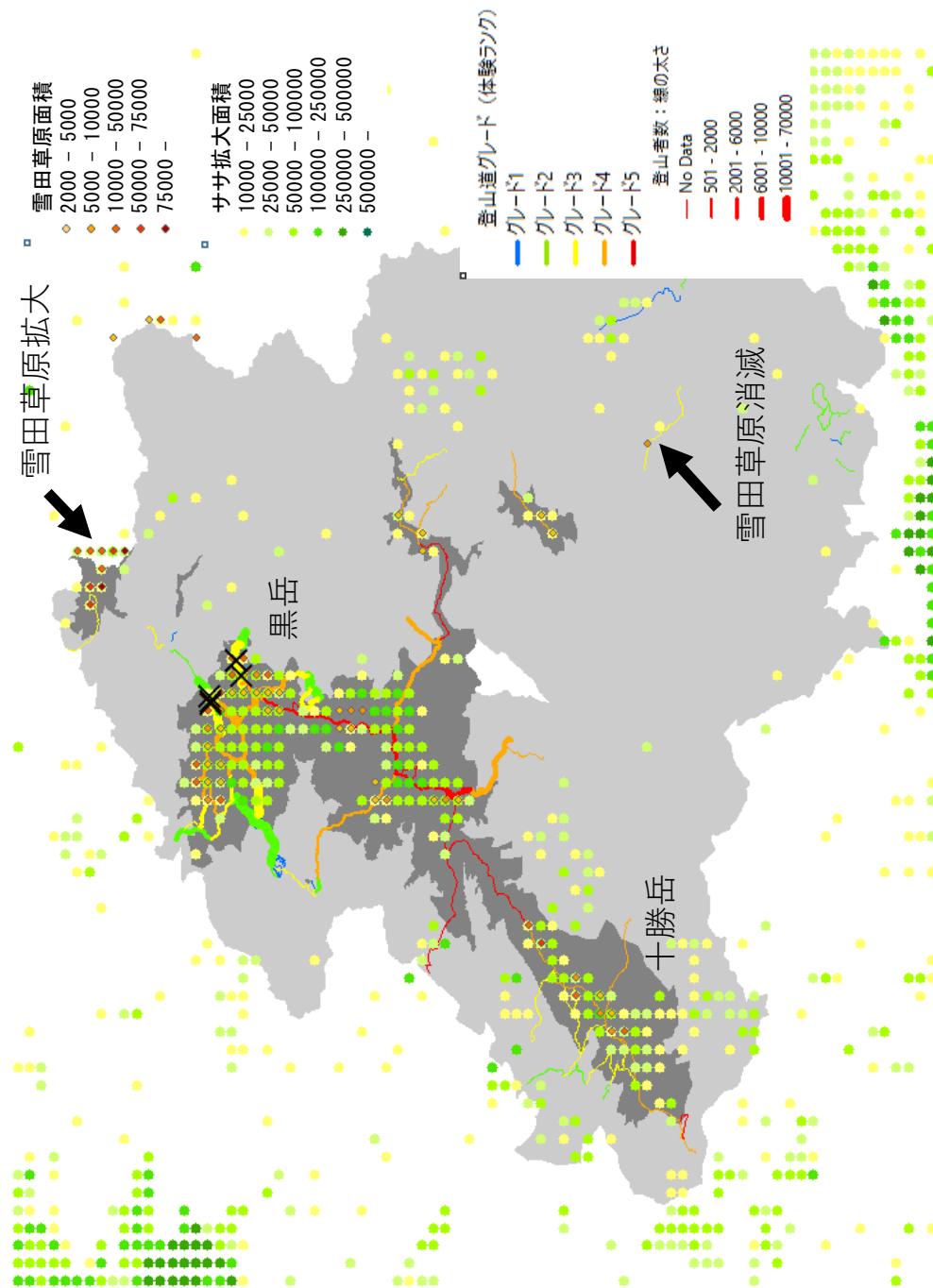


図 3-10b. 将来の雪田草原分布とササの拡大面積(m^2)と、大雪山グレードと登山者数 (Shoji et al., 2008)。×印はモニタリングサイト 1000 のモニタリング地点。雪田草原分布面積は GML を用いた結果を、ササ拡大面積は全モデルの中央値を用いた

4. まとめと今後の課題

本業務においては、文献レビューにより脆弱性評価の考え方を整理し（図2-1）、将来予測から管理計画案策定までの枠組みとフローチャートを作成した（図2-2）。それに基づき、大雪山国立公園を対象に、評価対象の選定、ヒアリング・データ収集、予測（脆弱性評価）、適応オプション、管理計画案提案までの一連の過程を試行した。今後、この枠組みやフローチャートの様々な生物、生態系や保護区における活用可能性を検討するとともに、管理実践に向けた以下の課題について更なる検討を進める必要がある。

①予測データの限界

予測計算の対象期間や予測結果空間解像度に関しては制約があり、評価対象についてはそれらを考慮する必要がある。例えば空間的ダウンスケーリングに関しては1kmの大きさで行われているのが現状である。避難地の検出においては、方角、地形、地質といった要素も考慮して具体化する必要がある。また、風穴など避難地になりうるが微細な構造を持つものに関しては、別途現地調査でその分布を明らかにすることが必要である。

②予測の向上

ヒアリングでも示されたように、高山植生の分布には積雪と融雪が重要である。今回は、気温と降水量により積雪と融雪を判断したが、観測データのさらなる探索や写真からの判別など、新たなデータや手法を試みるべきである。ササに関しては予測のばらつきが大きいため、表層地質等考慮していなかった要因の追加を考慮すべきである。

③予測対象の追加

ヒアリングにおいて登山道浸食は重要な懸念の一つとして挙げられたが、検証データ不足により評価を行うことができなかつた。登山道修理履歴等のデータを収集して、浸食のメカニズムを精査してメカニスティックモデルあるいは統計モデルによる予測を行う必要があり。

④予測時期の追加

今回の予測の対象期間は 2081 年～2100 年である。管理計画においては、いつ変化が起こるのかという情報も重要であり、複数期間あるいは連続した期間での予測が必要である。

⑤予測の追加と不確実性評価

今回の予測結果は、1 つの気候モデルで、1 つの気候変動シナリオを用いたものである。また、分布推定モデル出力結果の不確実性評価は行っていない。科学的な評価に基づく合意形成を行う際には、複数の気候モデル、シナリオ、分布推定モデルを用いて予測の不確実性評価を行うべきである。

⑥利用面の検討

インフラや利用の変化は、インバウンドをはじめ社会経済の変化と密接に関わっている。社会-生態システムとして、国立公園の保全と利用の検討を継続して行う必要がある。

5. 謝辞

本業務遂行にあたり、大雪山国立公園の自然保護官の方々（榎 厚生氏、石田 美慧氏、原澤翔太氏）には現地調査全般の調整をしていただき、また現地に関してご教示をいただき大変お世話になりました。現地関係者の方々及び有識者の方々には貴重な情報やご教示をいただきました。層雲峡ビジターセンターには紅葉の写真を提供いただきました。ダウンスケールされた将来の気候データは気候変動適応情報プラットフォームより提供していただきました。ここに記して謝意を示します。

6 . 引用文献

- Akasaka, M., Takenaka, A., Ishihama, F., Kadoya, T., Ogawa, M., Osawa, T., Yamakita, T., Tagane, S., Ishii, R., Nagai, S., Taki, H., Akasaka, T., Oguma, H., Suzuki, T., Yamano, H. (2014) Development of a national land-use/cover dataset to estimate biodiversity and ecosystem services. In: Nakano, S., Yahara, T., Nakashizuka, T. (eds.) *The biodiversity observation network in the Asia-Pacific region: Integrative observations and assessments of Asian biodiversity*. Springer, Tokyo, pp. 209-229.
- Butt, N., Possingham, H.P., De Los Rios, C., Maggini, R., Fuller, R.A., Maxwell, S.L., Watson, J.E.M. (2016) Challenges in assessing the vulnerability of species to climate change to inform conservation actions. *Biological Conservation*, 199, 10-15.
- Cross, M.S., Zavaleta, E.S., Bachelet, D., Brooks, M.L., Enquist, C.A.F., Fleishman, E., Graumlich, L.J., Groves, C.R., Hannah, L., Hansen, L., Hayward, G., Koopman, M., Lawler, J.J., Malcolm, J., Nordgren, J., Petersen, B., Rowland, E.L., Scott, D., Shafer, S.L., Shaw, M.R., Tabor, G.M., (2012) The Adaptation for Conservation Targets (ACT) framework: A tool for incorporating climate change into natural resource management. *Environmental Management*, 50, 341-351.
- Fisichelli, N.A., Schuurman, G.W., Monahan, W.B., Pamela S. Ziesler, P.S. (2015) Protected area tourism in a changing climate: Will visitation at US National Parks warm up or overheat? *PLoS ONE* 10, e0128226.
- Foden, W.B., Butchart, S.H.M., Stuart, S.N., Vié, J.-C., Akçakaya, H.R., Angulo, A., DeVantier, L.M., Gutsche, A., Turak, E., Cao, L., Donner, S.D., Katariya, V., Bernard, R., Holland, R.A., Hughes, A.F., O'Hanlon, S.E., Garnett, S.T., Sekercioglu, C.H., Mace, G.M. (2013) Identifying the world's most climate change vulnerable species: A systematic trait-based assessment of birds, amphibians and corals. *PLoS ONE*, 8, e65427.
- Gallinat, A.S., Primack, R.B., Wagner, D.L. (2015) Autumn, the neglected season in climate change research. *Trends in Ecology & Evolution*, 30, 169-176.
- Halofsky, J.E., Peterson, D.L., O'Halloran, K.A., Hoffman, C.H. (2011) Adapting to climate change at Olympic National Forest and Olympic National Park. U.S. Department of Agriculture, Forest Service., Portland, Oregon, 130p.
- Hameed, S.O., Holzer, K.A., Doerr, A.N., Baty, J.H., Schwartz, M.W. (2013) The value of a multi-faceted climate change vulnerability assessment to managing protected

- lands: Lessons from a case study in Point Reyes National Seashore. *Journal of Environmental Management*, 121, 37-47.
- Heikkinen, R.K., Luoto, M., Araujo, M.B., Virkkala, R., Thuiller, W., Sykes, M.T. (2006) Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change. *Progress in Physical Geography*, 30, 751-777.
- Hulber, K., Wessely, J., Gatringer, A., Moser, D., Kuttner, M., Essl, F., Leitner, M., Winkler, M., Ertl, S., Willner, W., Kleinbauer, I., Sauberer, N., Mang, T., Zimmermann, N.E., Dullinger, S. (2016) Uncertainty in predicting range dynamics of endemic alpine plants under climate warming. *Global Change Biology*, 22, 2608-2619.
- 吉良竜夫 (1948) 温量指数による垂直的な気候帯のわかつたについて. *寒地農学*, 2, 143–173.
- Lawler, J.J., White, D., Neilson, R.P., Blaustein, A.R. (2006) Predicting climate-induced range shifts: model differences and model reliability. *Global Change Biology*, 12, 1568-1584.
- Marmion, M., Parviainen, M., Luoto, M., Heikkinen, R.K., Thuiller, W. (2009) Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. *Diversity and Distributions*, 15, 59-69.
- 小川みふゆ, 竹中明夫, 角谷拓, 石濱史子, 山野博哉, 赤坂宗光 (2013) 植生図情報を用いた全国スケールでの土地利用図の作成, *保全生態学研究*, 18, 69-76.
- 大澤隆文 (2015) 気候変動下における自然保護区での生態系への影響と適応策—とくに海外における知見と実践例を中心に—. *日本生態学会誌*, 65, 17-31.
- Pacifci, M., Foden, W.B., Visconti, P., Watson, J.E.M., Butchart, S.H.M., Kavacs, K.M., Scheffers, B.R., Hole, D.G., Martin, T.G., Akçakaya, H.R., Corlett, R.T., Huntley, B., Bickford, D., Carr, J.A., Hoffman, A.A., Midgley, G.F., Pearce-Kelly, P., Pearson, R.G., Williams, S.E., Willis, S.G., Young, B., Rondinini, C. (2015) Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change*, 5, 215-225.
- Rannow, S., Macgregor, N.A., Albrecht, J., Crick, H.Q.P., Förster, M., Heiland, S., Janauer, G., Morecroft, M.D., Neubert, M., Sarbu, A., Sienkiewicz, J., (2014) Managing protected areas under climate change: challenges and priorities. *Environmental Management*, 54, 732-743.

- Scheller, R.M., Domingo, J.B., Sturtevant, B.R., Williams, J.S., Rudy, A., Gustafson, E.J., David J. Mladenoff, D.J. (2007) Design, development, and application of LANDIS-II, a spatial landscape simulation model with flexible temporal and spatial resolution. *Ecological Modelling*, 201, 409-419.
- Shaw, W.D. and Loomis, J.B. (2008) Framework for analyzing the economic effects of climate change on outdoor recreation. *Climate Research*, 36, 259-269.
- Shoji, Y., Kazuo Yamaguchi, K., Yamaki, K. (2008) Estimating annual visitors flow in Daisetsuzan National Park, Japan: combining self-registration books and infrared trail traffic counters. *Journal of Forest Research*, 13, 286–295.
- Shoo, L.P., Hoffman, A.A., Garnett, S., Pressey, R.L., Williams, Y.M., Taylor, M., Falconi, L., Yates, C.J., Scott, J.K., Alagador, D., Williams, S.E. (2013) Making decisions to conserve species under climate change. *Climatic Change*, 119, 239-246.
- Thompson, J.R., Simons-Legaard, E., Legaard, K., James B. Domingo, J.B. (2016) A LANDIS-II extension for incorporating land use and other disturbances. *Environmental Modelling & Software*, 75, 202-205.
- Willis, S.G., Foden, W., Baker, D.J., Belle, E., Burgess, N.D., Carr, J.A., Doswald, N., Garcia, R.A., Harley, A., Hof, C., Newbold, T., Rahbek, C., Smith, R.J., Visconti, P., Young, B.E., Butchart, S.H.M. (2015) Integrating climate change vulnerability assessments from species distribution models and trait-based approaches. *Biological Conservation*, 190, 167-178.
- Wright, A.N., Hijmans, R.J., Schwartz, M.W., Shaffer, H.B. (2015) Multiple sources of uncertainty affect metrics for ranking conservation risk under climate change. *Diversity and Distribution*, 21, 111-122.

付録1 保全と利用に関する脆弱性評価および管理計画の文献のレビュー

①

Rannow, S., Macgregor, N.A., Albrecht, J., Crick, H.Q.P., Förster, M., Heiland, S., Janauer, G., Morecroft, M.D., Neubert, M., Sarbu, A., and Sienkiewicz, J., (2014) Managing protected areas under climate change: challenges and priorities. Environmental Management, 54, 732-743.

タイトル

気候変動下での保護地域の管理：課題と優先事項

要旨

場所ごとに異なる要因によって影響を受ける地域の保全管理において、適応の行動を実施することは新しく複雑な問題である。効果的な解決策を特定して実装するには学際的な視点が必要である。気候変動下での保護地域管理に関する国際会議では、国際的な科学者、保全管理者、意思決定者が集まり、保全管理の地域での適応についての経験を議論した。本論文は、その会議に基づいて適応を実施するための主要な問題をまとめたものである。これには、モニタリング、感受性評価、現在および将来の管理の実践、法的および政策的側面に関する一連の結論と勧告が含まれる。気候変動に適応した管理の実施には、空間的および時間的なスケールの範囲を考慮しなければならない。適応プロセスは、地域ごとに考える必要があり、保護地域内外の生態系と社会経済的条件を考慮する必要がある。しかし、戦略的な概要も同時に必要である。各地点での管理には、保全の優先順位と、気候変動の影響が地域的またはより広範囲に及ぶ可能性があることを認識すべきである。これらのレベルをまたいで行動することは、長期的かつ継続的なプロセスであり、「伝統的」保全セクター以外のアクターとの調整を必要とする。これを達成するためには、さまざまな研究、対話、政策/法的措置が必要である。我々は、保護地域の管理者が気候変動に適応できるように、さまざまなスケールで行われる必要がある一連の重要な行動を示す。

対象：保全、脆弱性評価、管理計画

評価：脆弱性評価から管理計画への各段階で科学と政策が行うべき行動を記載

しているが、方法の比較や実践に向けた具体的な道筋は無い

内容

気候変動下での保護地域の管理に関して、以下の 6 つのテーマについて議論を行った。

1. 気候変動の影響の監視

気候変動はすでに影響をあたえつつあり、構造化され標準化されたモニタリングによって生態系の変化に関する信頼できる事実を得、様々な駆動因の影響を知ることができる。モニタリングはまた順応的管理の要である。

目的を絞ったモニタリングと監視のためのモニタリングがあり、前者は管理のための介入の効果を検証する、後者は予期せぬ変化を特定するという点で気候変動への適応計画に適している。

植生は重要であり、その分布や生息域のタイプの変化のモニタリングが行われている。広域においては衛星データなどリモートセンシングが活用可能であるが、種のマッピングに関しては不確実性が高い。また、衛星の寿命は 5-20 年で一貫したモニタリングが困難である。特定の場所においては、航空機リモートセンシングが活用可能である。植生は動物の生息地となるため植生は基本的なモニタリング要素である。一方、動物分布マッピングは標準化されておらず、バイアスが大きい。物理環境のモニタリングも生態系のモニタリングと同様に重要であり、駆動因の変化を理解することができる。国が行っている気象モニタリング結果を利用することは可能であるが、山岳地帯においては空間的な変化が大きいため現地での観測が必要である。気象要素以外にも、大気汚染、土壤の特性、水文や他の要因の観測も価値がある。安価な計測器が導入可能である。

確立した方法で広域をモニタリングしつつ地域での活用も可能な方法が望まれる。また、生物多様性の 10 年規模のモニタリングは少ない。共通のモニタリングの枠組や指標が必要である。

2. 気候変動の影響のモデル化

3. 種や侵入種に対する気候変動の影響

これらの点に関しては研究例が多いので本論文ではふれない。

4. 気候変動に対する感受性の評価

脆弱性は曝露、感受性、適応能力からなる。曝露だけでなく感受性と適応能力

を考慮することが脆弱性評価に必要。方法は開発の余地があるものの、脆弱性とそれをもたらす要因を評価することは適応計画の出発点として重要である。事例や情報を共有して成功例につなげていくことが必要である。

5. 適応に向けた現在と将来の管理の実践

保護地域の管理例を分析すると、以下の共通点や類似点が見られた。

- 脆弱性は広く認められている概念
- 気候変動とその生物多様性への影響、そしてそれが社会に与える影響に関する周知が必要
- 人為的要因（土地利用など）は複合的に作用し、それらの要因を低減することが必要。保護地域外からの影響を考慮する必要がある場合が多い
- 気候変動によって引き起こされる自然—社会プロセスの動態とその不確実性を考慮する必要あり。順応的管理、長期的な柔軟性のある管理が必要
- どこにでも適用可能なレシピは無い。事例に応じた戦略が必要

その上で、以下の重要な問題点が指摘された

- 介入する・しないはどの状況でどちらを選択するか？
- 適切な経路をどのように選択するか

順応的管理と既存のリスク低減手法の組み合わせが必要だがまだ良い事例が少ない状況である。

6. 気候変動適応計画に向けた法的側面と政策勧告

現在の保全を考えているものが多く気候変動を考慮していない。既存の政策を向上させつつも、既存の政策の整合性をとっていくことが重要である。

これらをふまえた保護地域の気候変動適応の支援に向けて以下の結論が得られた。

- 適応は特定の保護地域や地域環境にあわせてデザインすることが重要
- 保護地域外の土地利用を考慮する幅広い視点が必要
- 保護地域の管理は単独で行うのではなく他の場所の管理とあわせて考える必要がある

これらの3つを統合し、図1に示す枠組を構築した。

科学研究 からの支援

- 気候変動影響と脆弱性に関する研究
- 各区域における適応計画の優先順位付けを可能とする戦略的保全計画
- 変化を監視する指標と報告に関するプロトコル
- 科学的な能力開発

- 生態系プロセスやサービスに関する研究
- 保全に関する人々の態度に影響を与える要因の理解と人間社会を巻き込む方策を促進する社会科学研究

- 現場での適応の課題に対する適切な管理の助言
- 順応的管理の枠組み
- 変化と管理効果の長期のモニタリング
- 意志決定ツール

政策と対話 からの支援

- 適応の課題に関する垣根を超えた協力
- 国内・国際法に基づく気候変の結果としてのハビタットの変化の報告

- 保全と土地利用政策の調和
- 協働と新しい資金の流れの促進
- 適応を支える生態系サービスへの支払いを行うメカニズム
- ステークホルダーと地元市民の参加

- 適応の事例の開発と普及
- 保全目標を妥協しない柔軟で順応的な場所を設定する政策や法整備
- 気候変動問題の普及を促進するインターブリテーションや対話活動

広域の保全 戦略の一環

保護区域外の 土地利用の考慮

現場におけ る適応

図1. 保護地域における適応を支えるために考慮すべき研究と政策、法、対話における3つの段階と本会議で特定された重要な行動

②

Pacifci, M., Foden, W.B., Visconti, P., Watson, J.E.M., Butchart, S.H.M., Kavacs, K.M., Scheffers, B.R., Hole, D.G., Martin, T.G., Akçakaya, H.R., Corlett, R.T., Huntley, B., Bickford, D., Carr, J.A., Hoffman, A.A., Midgley, G.F., Pearce-Kelly, P., Pearson, R.G., Williams, S.E., Willis, S.G., Young, B., and Rondinini, C. (2015) Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change*, 5, 215-225.

タイトル

気候変動に対する種の脆弱性評価

要旨

気候変動が生物多様性に及ぼす影響の記録はますます増加しており、進行中および数十年のうちに予測される気候変動に対する種の脆弱性を評価するために多くの方法が開発されている。地球規模の生物多様性の損失を最小限にするために、保全関係者は気候変動の影響に対して最も脆弱な種を特定する必要がある。本レビューでは、種の気候変動脆弱性を評価するために使用される様々な方法を概説する。我々は、これらの方法（相関的、力学的および形質に基づく）、関連するデータ要件、応用およびモデリング手法の空間的および時間的スケールを導出するために使用される3つの主なアプローチを説明する。我々はアプローチの長所と短所を特定し、予測の信頼性を制限する各方法に内在する不確実性の原因を明らかにする。最後に、我々は、保全の実践者が保全計画のニーズに最も適切なアプローチを選択し、さらなる評価のために優先すべき事項を明らかにするための指針を提供する。

対象：保全、脆弱性評価

評価：脆弱性評価に関して既存の方法とその活用例のレビューを行っている。それぞれの手法の長所短所が述べられている

内容

1. 脆弱性評価に使われるもの

気候変動に対する種の脆弱性を評価する際に用いられるものは以下の通りであるが、標準的な方法は無く、必要な情報にあわせて適切な方法を選ぶ必要がある。

1-1. 分布域の変化

将来の気候による分布域の変化で表されるが、他の要因である生物間相互作用などによって脆弱性が増加する可能性がある。

1-2. 個体群の変化

観察や現存量の指標、変化率、生息地の変化によって定量的な個体群の変化を明らかにすることができます。過去の変化傾向を、メカニズムモデルに入力し、分布様式、生活史と気候条件を考慮することにより将来の個体群の大きさを予測した例がある。

1-3. 絶滅確率

生活史が明らかになっている種に対して、個体群の生存率の分析、個体群統計学モデル、進化モデル等を用いて絶滅確率を計算することができる。しかし、多くの種は詳細なデータが無いため、良く知られた種にでしか定量評価ができない。

1-4. 脆弱性指標と他のスコアリング方法

上記で紹介したものに加え、形質に基づく脆弱性評価 (Trait-based vulnerability assessments; TVAs) が点数、カテゴリー、指標を得るために使用される。ただし、種に対する影響の大きさを直接測ることはできない。

2. 気候変動に対する脆弱性をモデル化する方法

2-1. 統計モデル

環境要因と生物応答や分布の関係を統計的に求め、気候変動に対する変化予測を行う方法。分布推定モデルは空間明示的で、気候変動シナリオに基づく生物の分布変化予測が可能である。統計学的アルゴリズムの不確実性が存在するた

め、複数の統計モデルを使用することが望ましい。分布推定モデルを構築する際には、現在の生物分布が気候変化に追随しているという仮定が必要で、分散能力の低い生物を対象とする場合は、分布予測範囲が過大評価になる可能性がある。

2-2. メカニスティックモデル

環境変化に対する生物の成長などのプロセスを考慮したモデルを構築し、気候変動に対する変化予測を行う方法。モデルは、実験室や野外における個体群成長率、生理的な耐性、競争と分散、病気や捕食、エネルギー平衡などさまざまな観測に基づいて作られる。多くの場合絶滅確率が出力される。多種のデータを集めるのは困難であるため1種を対象とする場合が多い。

メカニズムを考慮したニッチモデルは種の形質に基づいて作成され、統計学的なニッチモデルに比べて、重要な要因を明示することができる。

一方で、対象種の分布予測を行うためには、成長など生活史に係る詳細な定量データが必要であるため、応用例は限られる。また、一般的に分散に関わる気候変動以外の要因や生物間相互作用は考慮されない。

2-3. 形質に基づく脆弱性評価（TVA）

生物種の形質と曝露に基づきスコアリングして評価する方法。空間明示的ではなく、種の脆弱性を対象とする場合に用いられる。曝露・感受性・適応能力などいくつかの項目について専門家の判断に基づいてスコアリングを行う。

TVAは複数種に対して迅速な評価が可能であるため、保全団体での活用事例が増えている。モデリングの技術に関する多大な知識を要求しないので、保全の実践に用いられやすい。

欠点としては、各形質に関する脆弱性の閾値が多くの場合不明であり、恣意的な評価をしてしまう可能性が挙げられる。重要な形質があるはずだが、形質はすべて同格として扱われる。形質の異なる分類群間の比較はできない。

2-4. 上記を組み合わせるアプローチ

2-4-1. 基準に基づくもの

観察されたあるいは予測された個体群の変化と生物の特性を組み合わせて気候変動によるリスクのカテゴリーの区分を行う。IUCNレッドリストの基準がよ

く用いられる。この方法は多くの種に適用可能である。基準が恣意的になると
いう欠点がある。

2-4-2. メカニズム-統計、メカニズム-統計-TVA の組み合わせ
統計モデルに基づいた結果を個体群モデルに入力して個体群構造を推定する。
生活史を組み入れた方法もある。

2-4-3. 統計-TVA の組み合わせ

種の特性と種の分布推定モデルを形質を考慮することによって統合し、種分布の予測を高度化する。分散能力と寿命を考慮することにより分布域の動態予測を高度化できる。あるいは、分布推定モデルの結果によって気候変動への曝露を評価し、将来の分布域を特定する。これらを TVA によって評価した感受性や適応能力と組み合わせて脆弱性評価指数を計算する。

3. 方法の選択に関する指針

方法の選択は保全目的に完全に依存する。

3-1. 絶滅リスクの評価

本目的の場合は、メカニズムモデルと統計モデル両方が適用可能である。個体群のデータと環境要因を関連付け、将来予測を行うのが最も効果的である。あるいは、生息地の減少を個体群の減少の代替指標として用いる方法があり、統計モデルが活用可能である。

3-2. 行動の優先順位付け

保護地域のような特定の場所の保全が目的の場合は、統計モデルによってそこが将来の生息適地となる種を特定できる。

地域スケールの場合は、統計やメカニズムに基づく生息適地モデルによる空間明示的な予測により、種が存続できる区域の特定が可能となる。

特定の種を対象とする場合は、形質とメカニズムに基づく方法によって影響を与えていたる要因を特定でき、感受性を下げ適応能力を上げる介入が可能となる。

4. 結論

- 統計モデルは、種の分布しか情報が無い場合に有用である。
- メカニズムに基づくモデルは、絶滅確率を求めることができ、保全行動や管理の介入の効果を評価することができるが、いくつかの、情報の豊富な陸上の種に限られる。
- TVA は、手軽で広く使われる。GIS を使わずに少ないデータで地域での保全の優先順位付けに貢献する。

今回レビューしたほとんどすべての研究は気候変動の生物への直接的影響を扱っている。生物群集内での間接的影響、さらに自然資源の人間の利用は種に対して甚大かつ複雑な影響を与えつつある。人間の適応活動自体が生物多様性に悪影響を及ぼす可能性もあり、これらを考慮した評価が必要である。

③

Foden, W.B., Butchart, S.H.M., Stuart, S.N., Vié, J.-C., Akçakaya, H.R., Angulo, A., DeVantier, L.M., Gutsche, A., Turak, E., Cao, L., Donner, S.D., Katariya, V., Bernard, R., Holland, R.A., Hughes, A.F., O'Hanlon, S.E., Garnett, S.T., Sekercioglu, C.H., Mace, G.M. (2013) Identifying the world's most climate change vulnerable species: A systematic trait-based assessment of birds, amphibians and corals. PLoS ONE, 8, e65427.

タイトル

世界で気候変動に対する脆弱性の最も高い種の特定：鳥類、両生類、サンゴ類の形質に基づく系統的な評価

要旨

気候変動は、絶滅率の増加を含む生物多様性に大きな影響を及ぼす。現在は、気候変動への暴露を測定することに焦点があてられ、脆弱性を大幅に増減させる可能性のある種間の生物的なちがいをほとんど無視している。これに対処するため、気候変動の脆弱性の3つの側面、すなわち感受性、曝露、適応能力を評価するための枠組みを提示する。これは種の形質と、気候変動予測に対する暴露を利用する。そのような世界最大規模の評価として、世界の鳥類、両生類、サンゴ類（16,857種）にこのアプローチを適用した結果、気候変動に対する脆弱性が相対的に最も高い種や、鳥類と両生類にとってのアマゾン盆地やサンゴにとっての中央インド洋から西太平洋洋（コーラルトライアングル）など、脆弱な種が集中している地理的領域が特定された。我々は、感受性が最も高く適応能力が最も低い形質を持つ種が集中する地域は、暴露が大きい種の分布域とは異なることを見出し、曝露に基づく評価のみでは気候変動の影響が過小評価される可能性のある地域を特定した。我々は、608-851種の鳥類（6-9%）、670-933種の両生類（11-15%）、および47-73種のサンゴ類（6-9%）が気候変動に対する脆弱性が高く、すでに気候変動の影響を受けて IUCN レッドリストにおいて絶滅の危機に瀕していることを発見した。残りの気候変動の影響を受けやすい種は新たな保全優先種となる。IPCC SRES シナリオの二酸化炭素低排出シナリオの下では気候変動によって脆弱となる種は少なく、二酸化炭素の排出の低減が気候変動による絶滅リスクを下げる意味している。我々の研究は、気候変動の脆弱性を評価するためのより生物学的かつ生態学的な包括的アプローチの必要性に応え

るものである。気候変動への脆弱性の3つの側面（感受性、曝露、適応能力）に関する独立した評価を行うことにより、我々のアプローチは種や地域特有の保全に対する介入と指標を考案するために利用可能である。我々が特定する優先事項は、気候変動への影響を軽減するための世界戦略を強化するものである。

対象：保全、脆弱性評価

評価：形質に基づく脆弱性評価の実践例。評価に使用可能な形質が詳しくまとめられている

内容

感受性、曝露と適応能力の3つによって脆弱性が生まれるという枠組みを活用し、種を図1に示す4つのカテゴリーに区分した（図1）。感受性が高く、暴露され、適応能力が低い種を気候変動の脆弱性の高い種と判断した。

30人の専門家による2回のワークショップを経て、感受性と適応能力に関する90以上の生物・生態・生理・環境に関する形質を特定し、それらを5つの感受性に関するものと2つの適応能力に関するものにまとめた（表1）。曝露に関しては、種の分布域における気候変動予測の大きさ（鳥類と両生類は、平均気温、気温の変動、平均降水量、降水量の変動と海面上昇；サンゴ類は、高水温による深刻な白化が起こる頻度と海洋酸性化）によって評価した。各項目は、高い/低い、不明でスコアリングした。このことにより、気候変動シナリオごとに脆弱な種と地域を特定することができた。

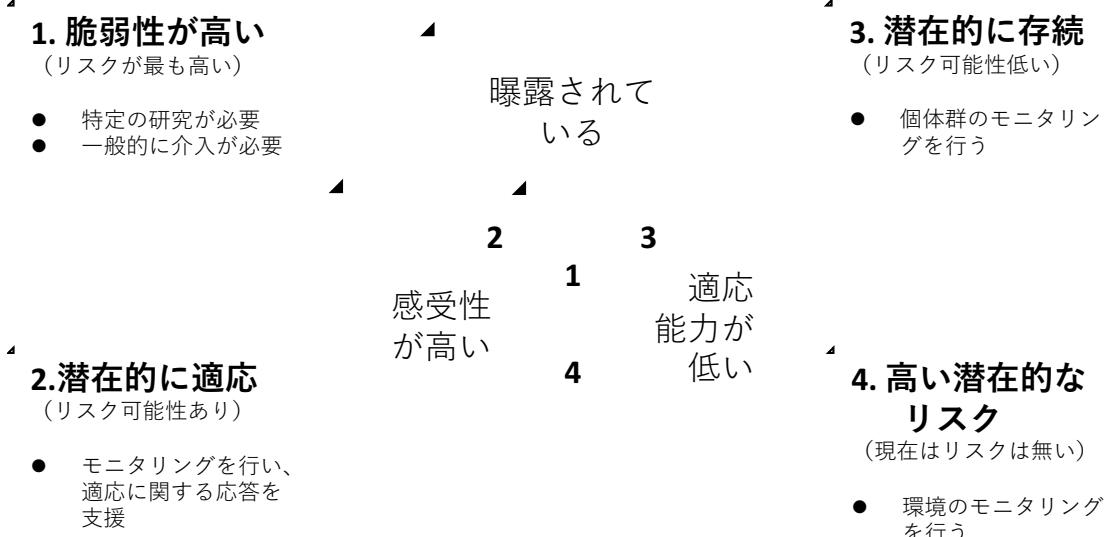


図1．気候変動脆弱性、すなわち感受性、曝露、および低い適応能力の3つの組み合わせにより、気候変動に脆弱な種の4つのカテゴリーを表し、保全の優先順位付けと戦略計画に特に影響する。感受性が高く、暴露され、適応能力が低い「気候変動の脆弱性の高い種」(1)が最も懸念され、気候変動への応答をモニタリングし、必要な介入を評価することが最も優先される種である。「潜在的に適応する種」(2)は、確認のために詳細なモニタリングが必要であるが、感受性が高く暴露されるが適応能力は高く、分散や小進化によって気候変動の負の影響を軽減する可能性がある。「潜在的に存続する種」(3)は、適応能力が低く、暴露されているが、感受性は低いため、その場で気候変動に耐えることができるかもしれないが、その感受性の低さに関する仮定が正しいか監視する必要がある。最後に、「高い潜在リスクを持つ種」(4)は、適応能力が低く、感受性が高いが、曝露されてはいない。気候変動予測と排出シナリオが正確であればすぐには問題ではないが、評価時に想定した期間を超えて曝露された場合、気候変動に対して脆弱になる可能性がある。

表1. 感受性と適応能力に関する生物の形質

感受性

a. 生息地の特異性、微環境の要求性

気候変動に起因する環境変化が進むにつれ、特定の環境要求性の強くない種のほうが、生育環境の選択肢が広いので、回復力があると期待される。

生活史段階ごとに異なる環境要求性をもつ種のほうが、さらに感受性が高くなる。ただし、深海魚のように極端に特異性の高い種は気候変動の影響を免れる場合もある。

b. 環境耐性もしくはいざれかの生活史段階における環境閾値（その中でも気候変動の影響により超過する可能性があるもの）

特異的な環境と強く結びついた、生理的な耐性（気温、降水量、pHなど）は特に気候変動に感受性が高いと考えられる。

ただし、環境耐性の幅が広い種でも、すでに閾値に近いものは急激に減少する可能性がある（砂漠の植物の旱魃への耐性など）。

c. 環境トリガーへの依存性（トリガーが気候変動によって阻害される可能性のあるもの）

多くの種が、生活史段階を開始する合図として環境トリガーに依存する（移動分散、繁殖、産卵、種子発芽、冬眠、春季の出現など）。

日長や月の周期などは気候変動に影響を受けないが、気候や季節に駆動されるものは時期や規模が変化する可能性があり、

環境要因との非同期や非連動が起きる可能性がある（孵化と春季の最も食料がある時期がずれるなど）。

生活史段階や性別によって異なる合図に依存している場合は、影響が複合的になるだろう。

d. 種間相互作用への依存性（その中でも気候変動によって阻害される可能性のあるもの）

気候変動は種の分布やフェノロジー、相対的な個体数の変化を引き起こし、有益な種間相互作用（餌生物、送粉者、宿主、共生者など）

および負の種間相互作用（捕食、競争者、病原体、寄生者など）に影響する可能性がある。

1種もしくは少数の種に資源を強く依存している種は、感受性が特に高くなるだろう。

e. 希少性

アリー効果やカタストロフ、局所絶滅からの回復の遅さなどにより、小さな個体群は本質的に脆弱である。

従って、気候変動に対しても、希少種は普通種よりも脆弱であると考えられる。

希少種には、個体数が少ないもの、および、局所的には個体数が多くとも地理的に分布が非常に限られるものを含む。

低い適応能力

f. 移動分散能力の低さ

内因性の移動能力の低さ：移動分散率がもともと低いあるいは長距離散布の潜在能力がない種は気候の変化に追いつけないと考えらえる（地上生の巻貝や雨滴散布の植物など）

外因性の散布能力の低さ：長距離分散の潜在能力はあるものの、移動分散経路における透過性の低さや物理的な障壁の存在により、移動や定着の成功が妨げられることがある。

これには陸生生物にとっての海洋や川などの自然の障壁、ダムなどの人為的な障壁、不適な環境や条件（潮流や温度勾配など）を含む。

気候変動により好適な気候空間が残らなくなると考えられる種も、これに該当するかも知れない。

g. 進化可能性の低さ

迅速な遺伝的変化の潜在能力がある種は、気候変動による環境変化に十分追いついて進化的に適応することができるかもしれない。

遺伝的多様性の低い種（多くの場合に最近、個体数のボトルネックを受けた種）は、一般に形質も遺伝的にも変異が低い

直接的な（適応的な遺伝子の）遺伝的多様性の指標が得られないことが多いので、繁殖率など、有益な新しい遺伝子型が蓄積しやすい形質に関連した指標が進化可能性の指標として有益な可能性がある。

種によっては 5-30 年と短い期間で進化的に適応する例もあるが、世代時間の長い大型哺乳類や多くの多年生植物は気候変動に適応することは難しいだろう。

④

Butt, N., Possingham, H.P., De Los Rios, C., Maggini, R., Fuller, R.A., Maxwell, S.L., and Watson, J.E.M. (2016) Challenges in assessing the vulnerability of species to climate change to inform conservation actions. *Biological Conservation*, 199, 10-15.

タイトル

保全活動に資する気候変動に対する種の脆弱性の評価における課題

要旨

種に対する気候変動の影響を理解することは、種の絶滅のリスクを正しく推定し、適切な保全活動を選択する上で不可欠である。我々は気候変動の影響を受ける種の保全計画を妨げる4つの共通の課題を認識した。(i) 脆弱性の他の2つの要素（感度と適応能力）を無視して、気候変動への曝露のみを考慮する。(ii) 気候変動が極端気象の頻度と規模を変化させるということを認識せず、長期的かつ段階的な脅威として扱う。(iii) 気候変動を将来の脅威として扱い、既存の変化に対する影響を無視する。(iv) 気候変動の直接的な影響に焦点を当て、他の脅威との相互作用を無視する。本論文ではこれらの課題について説明し、種の脆弱性に関連した管理目標を確立することが、効果的で効率的な保全活動を選択する上で重要であることを主張する。

対象：保全、脆弱性評価

評価：脆弱性評価に関する課題についての概説。具体的な解決方法の提示は少ない

内容

4つの課題の説明

(i) 脆弱性の他の 2 つの要素（感度と適応能力）を無視して、気候変動への曝露のみを考慮する。

図 1 に示されるように、脆弱性は気候変動への曝露に加え、感受性と適応能力からなる。曝露だけに基づく評価だと、脆弱性を過小評価したり過大評価したりしてしまう可能性がある。曝露だけの評価では、同所的に存在する種の脆弱性の違いを評価できない。また、適応能力を考慮しないと、人為影響（伐採や侵入種の拡大など）による脆弱性増加を評価できない。

(ii) 気候変動が極端気象の頻度と規模を変化させるということを認識せず、長期的かつ段階的な脅威として扱う

季節変動は考慮されても、今後ますます増大すると考えられる年々変動や極端現象が考慮されることはない。最近、これらを考慮する研究がいくつかある。過去の気候データとそれに関連する生態学的・物理的な情報を異常気象など気候の短期的変動を組み込んで考えることは非常に有用であろう。

(iii) 気候変動を将来の脅威として扱い、既存の変化に対する影響を無視する。

気候変動はすでに起こっているが、長期的な将来の変化に着目した研究が多い。例えば長寿命の植物の分布域が変化していない場合は、繁殖がすでに成功していないことを意味しており、この場合脆弱性が過小評価されることになる。こうした場合は現在起こっていることを知ることが重要になる。種の分布域と過去～現在の気候イベントや変化を組み合わせることにより、すでに起こっている変化に対する行動を考えることができる。

(iv) 気候変動の直接的な影響に焦点を当て、他の脅威との相互作用を無視する。

気候変動に対する脆弱性に関する研究は、人間の応答という間接的影響を無視している。例えば、海面上昇に対する防波堤建設などは種や生態系への脅威となりうる。社会学や農業経済学などと連携して、気候変動に対する人間の応答を理解し予測することが必要である。保全と人間活動が対立する場所での費用便益分析が必要になるだろう。

種の脆弱性を用いた保全計画には、Shoo et al. (2013)による総合的な管理行動や、Adaptation for Conservation Targets (ACT) (Cross et al., 2012) など、保全行動へとつなげる枠組みがある。気候変動が保全につきつける課題を乗り越えるためには、上記の問題点を解決するための十分なデータとともに、得られる情報を行動につなげるこうした枠組が必要である。

曝露 e

感受性 s

影響

適応能力 r

脆弱性

図1．脆弱性の枠組の主要要素間の関係。感受性および適応能力は種特有の属性で、曝露は例えば気候変動など外部の非生物的要因である。影響は管理行動が可能、影響と適応能力の相互作用により脆弱性が決定される。適応能力は、進化的応答、行動の応答や個体群の増加を含む。

⑤

Hameed, S.O., Holzer, K.A., Doerr, A.N., Baty, J.H., and Schwartz, M.W. (2013) The value of a multi-faceted climate change vulnerability assessment to managing protected lands: Lessons from a case study in Point Reyes National Seashore. *Journal of Environmental Management*, 121, 37-47.

タイトル

土地の管理における複数の側面からの気候変動に対する脆弱性評価の価値：
Point Reyes National Seashore の事例研究からの教訓

要旨

不確実な将来の気候に直面する保護地域の管理は深刻な挑戦である。将来の気候変動に対する生物応答を評価するための様々な予測および分析方法が存在するが、これらの方針のいずれかによってなされた評価はつねに限定的である。したがって、管理上の意思決定を行う際には、さまざまなデータや分析方法に関する情報を入手し、それらの間の整合性と矛盾を比較することが有用である。既存の気候変動脆弱性評価の枠組みに基づいて、a) 専門家の判断、b) 植生の予測マッピング、c) 環境の予測マッピング、および d) 種に特化した評価からなる4つのアプローチを活用した生物群集レベルでの気候変動脆弱性評価の枠組を開発した。Point Reyes National Seashore を例に、単体あるいは複数での各評価の有用性を調査した。その結果、各評価が補完的であり、それぞれが管理目標のために有用であることや、その中でも専門家の判断が最も広く適用可能で柔軟な評価方法であることが明らかとなった。この多面的な枠組みは、不確実な将来の気候変動下での管理の意思決定を促進するため、他の保護地域でも利用できると考えられる。

対象：保全、脆弱性評価、管理計画への見通し

評価：脆弱性評価について4つの方法を紹介し、事例に基づいてそれぞれの特色をまとめた。脆弱性評価とそこから管理計画へつなぐ枠組を提案

内容

a) 専門家の判断、b) 植生の予測マッピング、c) 環境の予測マッピング、および d) 種に特化した評価からなる 4 つのアプローチを活用した生物群集レベルでの気候変動脆弱性評価の枠組を構築した（図 1）。

a) 専門家の判断

Point Reyes National Seashore の 12 の生物群集に対して、多様な背景（政府、NPO、研究者）を持つ専門家に気候変動だけでなく人為影響への応答に関する質問を行い、デルファイ法*を用いて結果を得た。

*技術予測などに用いられる技法。多数の専門家や個人にアンケート調査を行い、その結果を回答者にフィードバックして、さらに予測を繰り返し、予測の正確度を上げながら、全体の答えや意見を絞っていく。（デジタル大辞泉より）

b) 植生予測モデル

6 つの生物群集に対して、気候エンベロープモデル**を用いて SRES A1B あるいは A2 シナリオを用いて 3 つの気候モデルに基づいて 2080-2099 年（一部 2038-2070 年）の生息地予測を行った。その予測と現在の分布域を重ねることによって脆弱性を評価した。空間解像度は 800m である。

**対象とする生物の生息する気候帯が将来どこに位置するかを予測し、そこを将来の生息域とする方法

c) 環境予測モデル

11 の生物群集に対して、海面上昇を考慮して浸水域を予測した。

d) 種レベルの脆弱性評価

過去データとの比較や分布推定モデルを用いる方法があるが、情報が制限されるため、4 種に対して、1)気候変動の直接的曝露、2)気候変動の間接的曝露、3)気候変動に対する感受性、4)記録された気候変動応答に基づいて NatureServe's Climate Change Vulnerability Index（図 2）を用いた評価を行い、脆弱性のランク付けと、影響を与えていたる気候要因の特定を行った。

これらの結果を公園管理者に示してフィードバックをもらった。フィードバックをもらう際には、匿名とし、報告書を受け取ってから1ヶ月以内と10ヶ月後に、管理への有用性と4つの脆弱性評価の側面の比較について議論した結果を報告してもらった。さらに、公園管理者が有用と考えている対象である(1)未開発の海岸環境、(2)海洋環境、(3)野生動物と植物、(4)教育・研究・娯楽の機会、(5)野生の環境、(6)陸と海の遺跡、(7)文化景観と歴史構造物について、脆弱性評価の4つの側面のランキングをしてもらった。

脆弱性評価の結果

4つのアプローチの整合性は高かったが以下の特色があった。

- 専門家の判断は、最も多様な将来の状態を考慮できる唯一の方法であった。気候変動は、山火事、霧、沿岸湧昇流、草地・森林・灌木林の競争に影響を与えるとされた。また、移入種と病原菌、人の公園利用、流出水がいくつかの生物群集に影響を与え、気候変動に対する脆弱性を増加させているとされた。
- 植生予測モデルにおいては、3つの気候モデルの結果は異なるものの、いくつかの共通のパターンが見いだされた。
- 環境予測モデルにおいては、海面上昇による変化に対し、崖や道などの「障壁」が生物の内陸方向への移動を妨げる可能性が示された。消滅する鰐脚類の上陸地も特定された。
- 種レベルの脆弱性評価においては、脆弱性のランキングは「障壁」や山火事や降水量に敏感であることが示された。

脆弱性評価と管理をつなぐ点に関しては以下の知見が得られた。

公園管理者は脆弱性評価を有用と回答した。4つのアプローチはそれぞれ公園管理者が有用と考えている対象のいくつかに対し有用であったが、さまざまな項目を扱える専門家の判断が最も広く有用であった。

それぞれのアプローチは、研究蓄積、気候モデル出力の空間スケールに対する植生分布の空間スケール、管理区域で利用可能なモデル、様々な情報を収集し解析する時間とリソースにより制約を受ける。将来の気候や生物応答が不確実であることを考慮すると様々な情報やツールを用いた4つのアプローチは有用であると言える。以下に Point Reyes National Seashore の事例で得られたそれぞ

れの方法の長所と短所をまとめた。

	専門家の判断	植生変化モデル	環境変化モデル	種レベルの脆弱性評価
長所	多様な要因や群集に適用可能	空間的な判断が可能	視覚的かつ定量的な評価が可能	管理は種に対して行われることが多いので実践的
短所	実現には様々な経験豊富でデルファイ法に慣れた専門家が必要 主観的でバイアスがかかる	ダウンスケーリングが必要 不確実性が高い	元となる空間情報が不足している	空間構造が無い 対象生物に関する詳細な情報が必要 対象種を増やすないと管理には使えない
備考	バイアスの除去には Bayesian belief network modelなどの活用可能性あり	保護地域スケールより大きな空間を扱うのに適している		分布推定モデル（今回使わなかった）は空間構造を持つが、生物間相互作用や特性などを無視してしまう

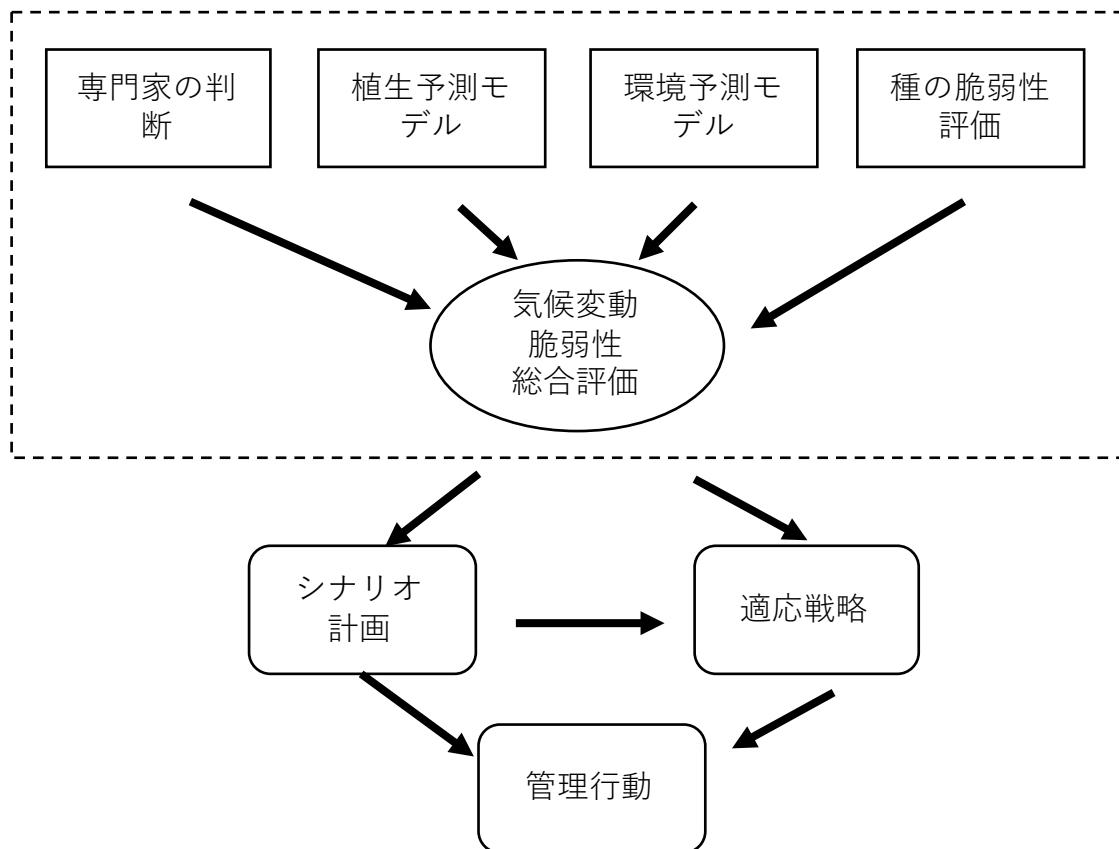


図1．4つのアプローチを活用した総合的脆弱性評価の枠組

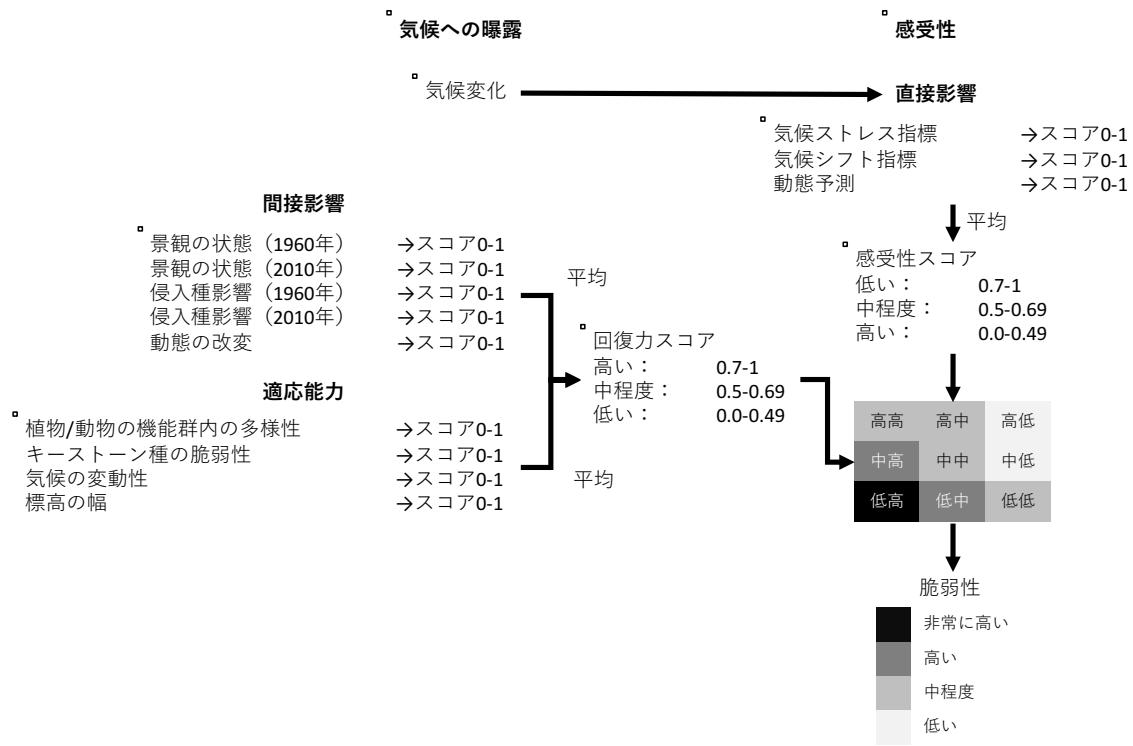


図2. NatureServe's Climate Change Vulnerability Index 評価方法の例 (Young et al., 2010)。

⑥

Willis, S.G., Foden, W., Baker, D.J., Belle, E., Burgess, N.D., Carr, J.A., Doswald, N., Garcia, R.A., Harley, A., Hof, C., Newbold, T., Rahbek, C., Smith, R.J., Visconti, P., Young, B.E., and Butchart, S.H.M. (2015) Integrating climate change vulnerability assessments from species distribution models and trait-based approaches. *Biological Conservation*, 190, 167-178.

タイトル

種の分布推定モデルと形質に基づくアプローチの統合による気候変動に対する脆弱性評価

要旨

気候変動による生物群集の変化に対応するために、種の気候変動に対する反応を予測するモデルが保全計画に盛んに利用されている。今まで、種の分布推定モデルは、気候変動に対する種の脆弱性を評価するために最も一般的に用いられている手法であった。最近現れた種の感受性と適応能力を考慮することを含む形質に基づくアプローチは、代替的ではあるが同時に分布推定モデルを用いたアプローチと対立する可能性があり、保全実施者および計画者がどちらを選べば良いか困難な状況となっている。ここでは、これらのアプローチの目的と強みの違いについて議論し、保全実践者に指針を提供する。また、種に対する気候変動影響を評価するための、伝統的な分布推定モデルに基づく評価と、形質に基づく評価の両方を使用する統合的方法論的枠組みを概説する。これらのモデルを保全のモニタリングと計画の指針のための入力として概念的にどのように使用できるかを示す。

対象：保全、脆弱性評価、管理計画への見通し

評価：脆弱性評価に関して、分布推定モデルを用いた方法と形質に基づく評価方法の二つの長所と短所を比較した。それらの目的は異なっており、それぞれを補完的に用いることにより、脆弱性評価を行って管理計画へつなぐことができる

内容

分布推定モデルと形質に基づく脆弱性評価は表2に示す違いがある。両者を組み合わせることにより、以下のことが可能となる。これらの関係を図2に示す。

- 種の気候変動応答のメカニズムをより良く反映したモデル（すなわち、将来予測）を構築すること
- 分布推定モデルを用いてどの気候要因が最も現在の分布を説明できるかがわかり、曝露評価を形質に基づく脆弱性評価に組み込むことができるため、気候変動への曝露に関して生物学的に意味のある定量化を行うこと
- それぞれの方法の不十分な点や、それぞれの方法で独立に評価を行った場合の相違点に対処すること

分布推定モデルと形質に基づく脆弱性評価結果の、気候変動に対する脆弱性評価と適応計画への統合はさまざまな利点がある。分布推定モデルに分散能力や寿命などの形質情報を考慮することにより、推定結果を向上させることができる。また、分布推定モデルの枠組では直接考慮できない項目でも、図3のような簡易な方法で組み込むことができる。この方法は、最初に、分布推定モデルと形質に基づく脆弱性評価の統合による将来予測結果を得て、それに複雑な追加項目を考慮するもので、管理に対する指針を与えることができる。

表2. 分布推定モデルと形質に基づく脆弱性評価の比較

	分布推定モデル	形質に基づく脆弱性評価
目的	将来の気候に対応した種の分布の変化を予測する	気候変動に対して脆弱な種を、気候変動への曝露と種の形質に基づいて特定する
方法	現在の生物分布と気候を統計的に解析し、将来を予測する	対象種に関して、感受性が増加するあるいは適応可能性が低い形質を特定する。これらの形質に基づいてスコアリングし、曝露を考慮して総合的な脆弱性を評価する
結果	各種に対する最適な気候の分布地図 結果の重ねあわせによる地域における群集構成の変化	各脆弱性に関するランクやカテゴリー等に基づく種ごとの脆弱性評価 結果の重ねあわせによる脆弱な種の集中度
長所	各種に対する現在と将来の最適な気候の空間明示的な地図の作成	気候変動に対する脆弱性を低減するために重要な形質の把握
短所	気候以外の要素を考慮していない（現在の生息地が気候要因を完全に反映したものである） 地域的な適応や行動応答は無いと仮定している 生息域が限られる種に対しては適さない	現在種が分布していない地域の将来の管理には適さない 種の将来の分布や群集構成の予測はできない 結果は脆弱性の相対的な評価であり制限要因を特定することは困難 種の応答の観測に基づく検証が必要。地域的な適応を無視している
脆弱な種の特定への活用	大きく生息範囲が変化し、現在の分布域との重なりが小さい種を特定	大きな曝露や感受性、小さな適応可能性を示し、脆弱性が高い種を特定

順応的管理への情報提供	<p>種の管理を行うべきサイトの特定に基づいた、サイトからネットワークからされたサイトのける保全優先順位や適切な対応指針</p> <p>変化しないと予測されるあるいは新しい保全対象種を含む地域に基づいた、活動のための地域の特定</p>	<p>個別の脆弱性に基づいた、保全優先順位や適切な対応指針</p> <p>脆弱な種を多く含む地域に基づいた、活動のための地域の特定</p>
体系化された保全計画への活用への課題	<p>詳細な空間解像度の保全ユニットに対し、気候変動予測データの空間解像度が粗い</p> <p>将来の気候が適する地域に定着するか不明で、体系的な保全計画に対し不確実性がある</p>	<p>分布推定モデルと同様に、気候変動予測データの空間解像度が粗いことが制限となる</p> <p>将来の分布予測ができないため、将来の保全計画立案がほぼ不可能</p> <p>空間明示的でないため、動的な空間配置計画への適用に問題がある</p> <p>いくつかの生物群（両生類や鳥類）に対する脆弱性評価が示されるが、それらの間の相対的な関係は不明</p>

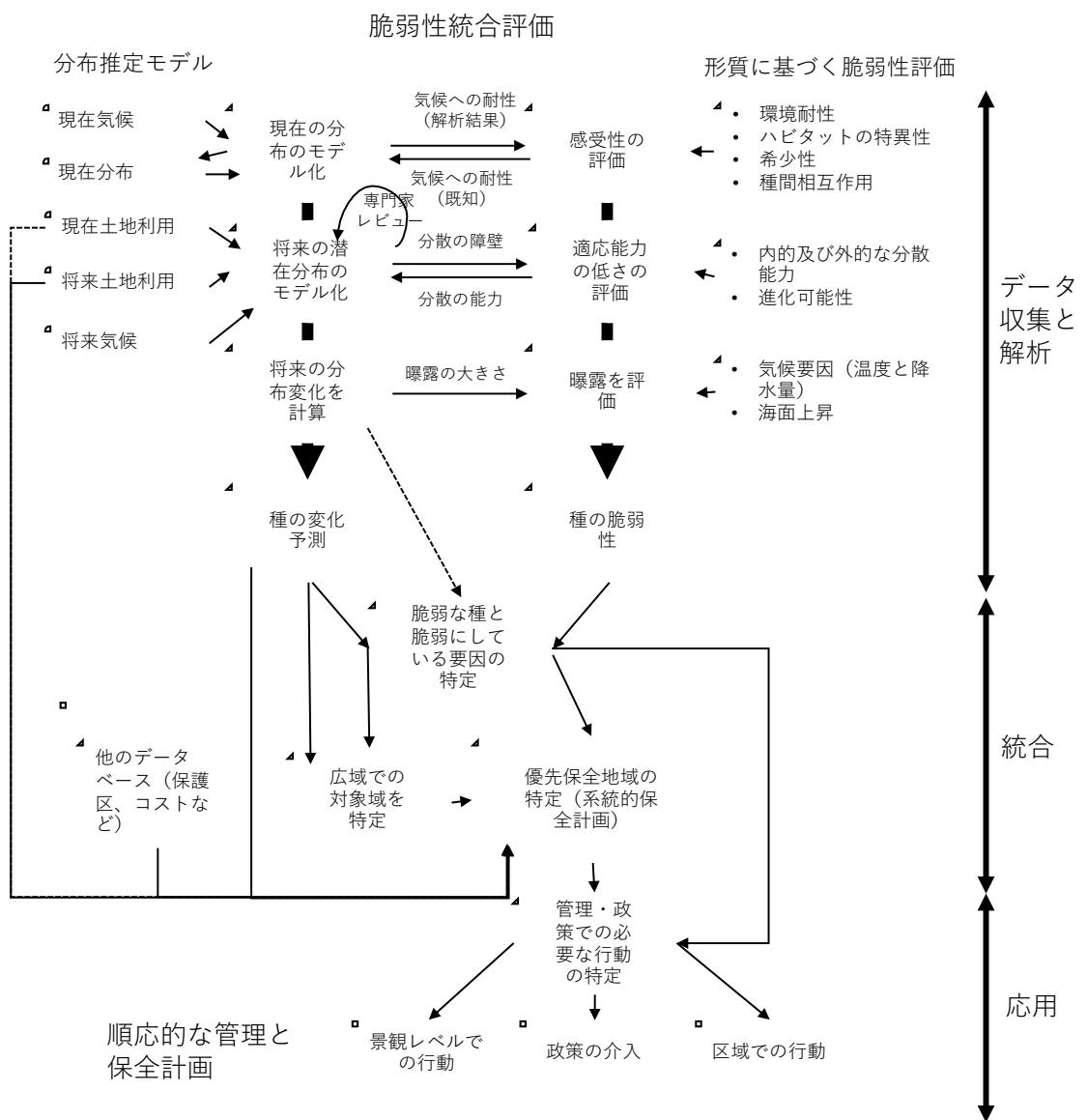


図2. 分布推定モデルと形質に基づく脆弱性評価の統合、そして体系的保全計画と順応的管理への道筋の概念図

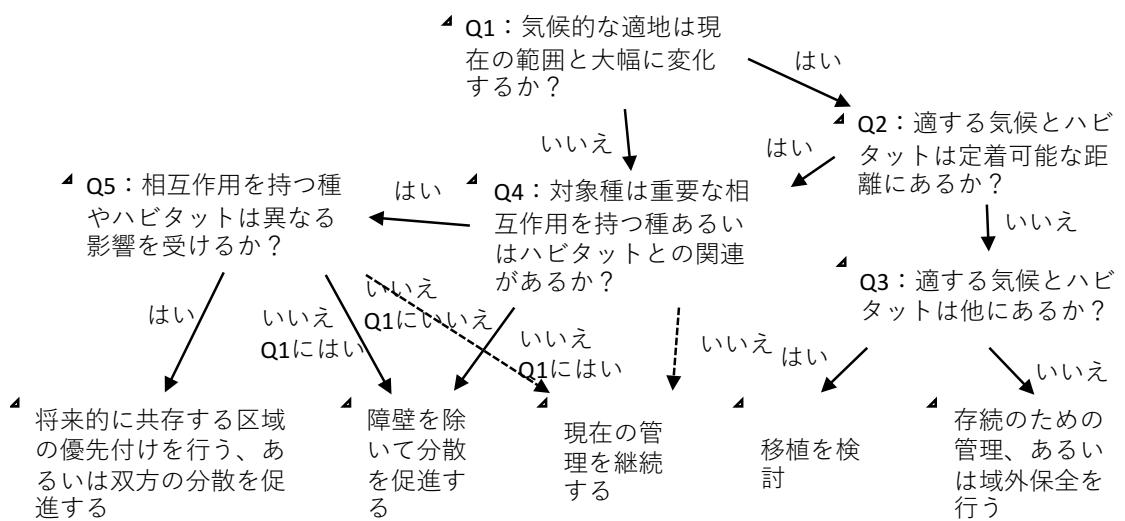


図3. 実用上の分布推定モデルと形質に基づく脆弱性評価の統合のフローチャート。Q1-3は分布推定モデルと形質に基づく脆弱性評価に基づくもので、Q4-5は形質に基づいて追加した要因

(7)

Shoo, L.P., Hoffman, A.A., Garnett, S., Pressey, R.L., Williams, Y.M., Taylor, M., Falconi, L., Yates, C.J., Scott, J.K., Alagador, D., and Williams, S.E. (2013) Making decisions to conserve species under climate change. *Climatic Change*, 119, 239-246.

タイトル

気候変動下で種を保全する決断を下す

要旨

気候変動による生物多様性への深刻な影響が予測されている。これらの影響は、従来の保全策では適切に対処できない可能性があり、新たな管理方策が検討されている。しかし、意思決定者にとって、脆弱であると考えられる種を対象として最も適切な一連の行動やその順序を選択するために役立つ指針は現在のところ限られている。ここでは、既存の避難地において行われている保全から、様々な移動性の向上や自然環境外での域外保全などを通じ、気候変動に伴う種の保全を目的とした行動を補完する意志決定の枠組みを提示する。我々は、保全の資源配分は、個々の種の脆弱性に加えて、成功の可能性、コスト、非対象種へのコベネフィットの可能性などの要因によって左右されることを明確に認識している。そのため、我々は資源配分において起こりうるトレードオフについて専門家の判断を活用し、管理の介入に関して一連の評価を行う。

対象：保全、管理計画

評価：脆弱性評価結果に基づく管理計画のデザインに関する枠組を提案。脆弱性と管理に関してコストや成功可能性の点からまとめられており、適用可能性が高い

内容

特定の種に対する行動、様々な行動の相対的なコストと成功可能性、対象以外の種に対するコベネフィット、適応策を向上させるために重要な知識のギャップなど明確な枠組が管理者に必要である。本論文では、気候変動に対して種が遺伝的な適応を行ったり分布域を変化させたりする可能性と保全行動とをつなぐ枠組を示す。

最初に、生息適地の劣化可能性が高い脆弱な種を、IUCN レッドリスト種の選定方法や実際の観察結果等によって特定する。

それらの種の脆弱性評価の結果に基づき、低次の介入から始め、高次の介入を行う構造的な枠組みを提案する（図1）。高次の介入はコストが高く、成功可能性が低く、対象以外の種に対するコベネフィットが見込めず、保全すべき種の選定と社会的価値との対立が存在すると考えられるためである。

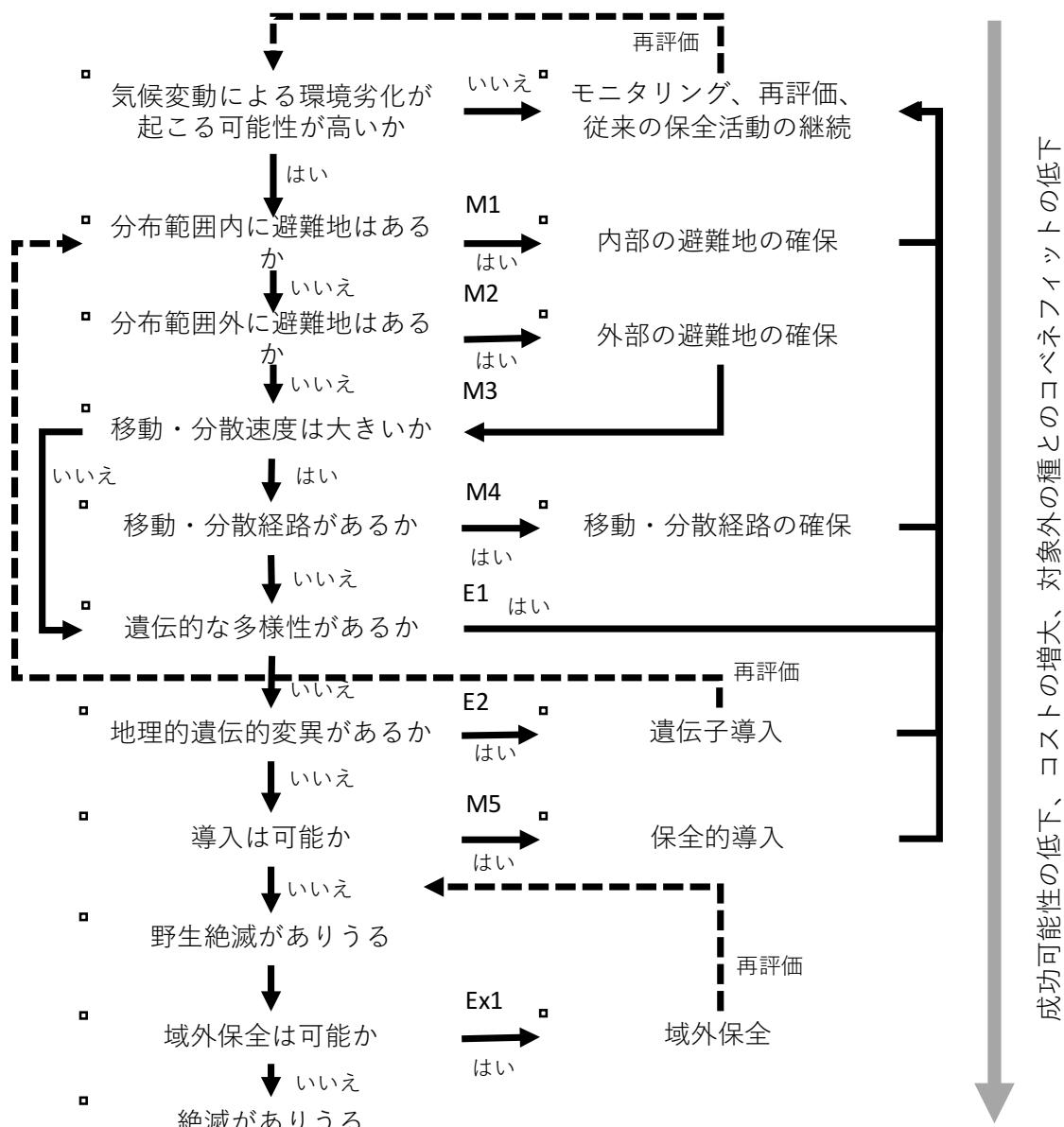


図1. 野生生物に対する気候変動の影響の低減のための管理行動決定の枠組み。Mは種のに対する行動の特定、Eは進化的なことを考慮したオプション、Exは域外保全のオプションを示す。

(8)

Cross, M.S., Zavaleta, E.S., Bachelet, D., Brooks, M.L., Enquist, C.A.F., Fleishman, E., Graumlich, L.J., Groves, C.R., Hannah, L., Hansen, L., Hayward, G., Koopman, M., Lawler, J.J., Malcolm, J., Nordgren, J., Petersen, B., Rowland, E.L., Scott, D., Shafer, S.L., Shaw, M.R., and Tabor, G.M., (2012) The Adaptation for Conservation Targets (ACT) framework: A tool for incorporating climate change into natural resource management. Environmental Management, 50, 341-351.

タイトル

保全対象の適応（ACT）の枠組み：気候変動を考慮した自然資源の管理ツール

要旨

自然資源を管理保全する団体が気候変動への対応についての指針を探求するに付れて、自然システムのいくつかの属性について長期的な持続可能性を高める可能性のある多くの行動と戦略が提案されている。管理者は、ある場所で特定のターゲットに適合する管理策を開発するため、多くの行動や戦略の中から適切なものを選択する実用的なツールを必要としている。我々は、対象とする種、生態系および生態的機能の管理において気候変動の影響を考慮する参加型適応目標（Adaptation for Conservation Act; ACT）枠組を開発した。私たちの枠組みは、気候変動に対する管理の効果的な適応は生態系の現地での知識に依存し、必ずしも気候変動またはその影響の詳細な予測を必要としないという前提に基づいている。本論文では、米国モンタナ州、ワイオミング州、アイダホ州の Greater Yellowstone の生態系と Yellowstone 川の水流への適用例を示して ACT の枠組みを説明する。ACT の枠組みは、ますます変化しつつあるが不確実な気候を考慮し適応計画を始めるために、また管理の介入を形作り伝達するために実用的なツールである。

対象：保全、管理計画

評価：脆弱性評価結果に基づく管理計画のデザインに関する枠組を提案。個別対象には有用であるが、汎用性が課題

内容

Adaptation for Conservation Act (ACT) アプローチ：場所ごとの、特定の種・生態系・生態系機能の適応アクションに関して、以下のステップに基づいて行動の優先順位付けを行う（図1）。

ステップ1：保全対象とその管理目的の特定

最初は一つの対象に絞り、その後状況に応じて追加していくのが良い。

ステップ2：将来の気候変動の影響可能性の評価（図2）

気候、生態、社会、経済の駆動要因に関する概念モデルを作成する

気候変動シナリオを作成する。可能であれば他の要因についてもシナリオを作成する。

シナリオに対して、対象と気候変動以外の駆動因の応答の解析を行う。可能であれば予測に関する定量的な解析があると良い。

ステップ3：シナリオに対する管理行動の特定（図4）

介入可能な点の特定を行う

ステップ4：管理行動の優先順位付け（表1）

- ・気候変動シナリオすべてに活用可能なもの
- ・特定の目的達成に対する相対的貢献度
- ・経済・社会・政策的な実行可能性
- ・可逆性
- ・現在の管理からの発展性

等を考慮することにより優先順位付けを行う。

ステップ5：優先度の高い行動の実施

ステップ6：効果と目的に向けた進捗のモニタリング、行動の修正や計画の見直し

ACT アプローチは複雑なモデリングを必要としないが、地域の知識、管理の

経験、気候予測とその制約に関する基礎知識を必要とする。一つの解決策を提示するものではないが、いくつかのオプションを提示できる。気候と生態のモデル化は不確実性が高いため、行動の後はステップ6に示すモニタリング、行動の修正や計画の見直しが非常に重要である。

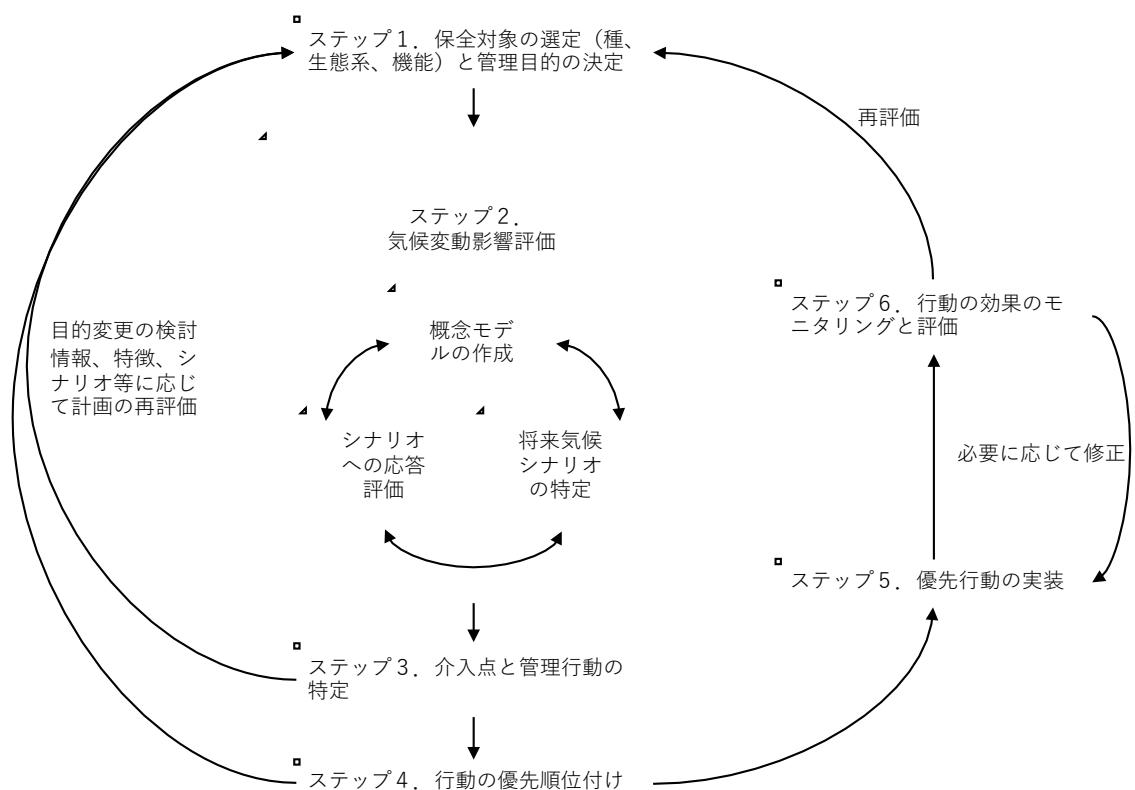


図2．ACTの枠組。ステップ1-4はACTによる計画。ステップ5-6はその結果に基づく実装

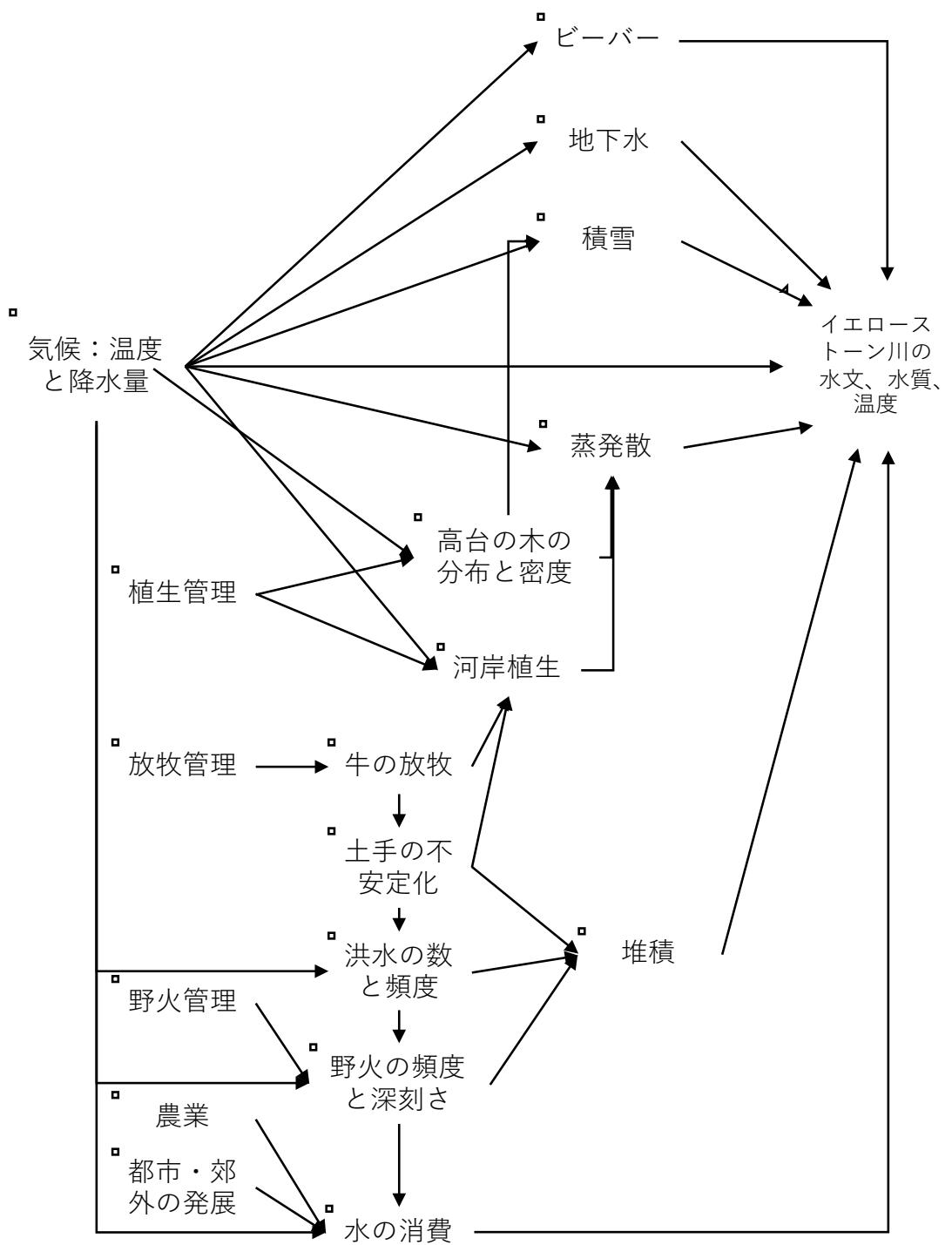


図3. 気候変動とその他の要因がイエローストーン川の流量に与える影響の概念図

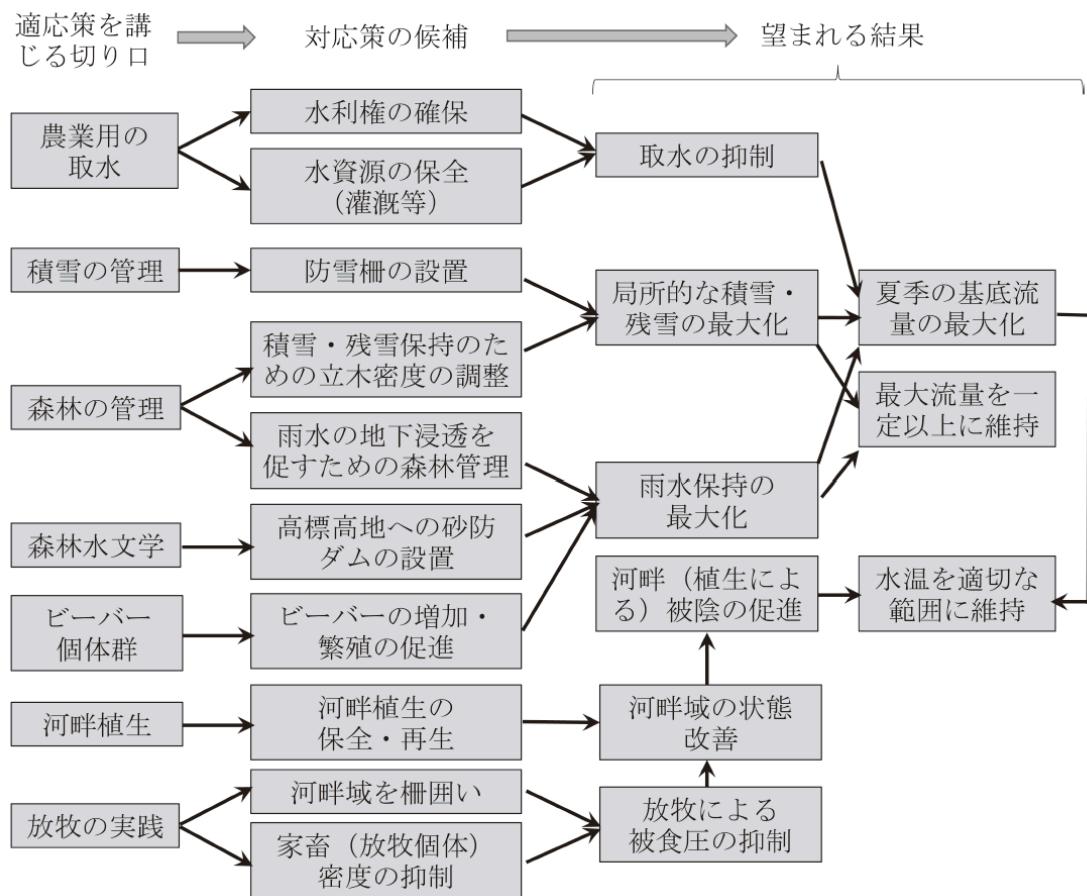


図4. アメリカのイエローストーン国立公園におけるニジマスを気候変動下でどう保全していくかについて、ACT（特定の種を保全するための適応策）の考え方を用いて適応策を抽出する過程（和訳は大澤, 2015による）。

表1. 温暖で乾燥した気候条件におけるイエローストーン川の流量管理に関する3つの行動の費用便益

		管理行動		
		防雪柵の設置	砂防ダムの設置	ビーバーの増加
優先順位付け	管理目的達成への貢献	基底流量に間接的に正の影響を与える	上流の流量に直接的に正の影響を与える	上流の流量に直接的に正の影響を与える
	実現可能性			
	経済	低コスト	比較的コストは高いが障害になるほどではない	比較的低成本
	規制	イエローストーン国立公園のいくつかの集水域では許可されない	イエローストーン国立公園のいくつかの集水域では許可されない	イエローストーン国立公園では禁止されていない
	社会	下流との対立はほとんど無い	下流との対立が考えられる	場所ごとに異なるが土地所有者との対立可能性がある
	非意図的な結果を招く可能性	魚の通過への影響は無い	濁度の増加や魚の通過を阻害する恐れがある	個体群管理が必要、魚の通過を阻害する恐れがある、他の河川に侵入する可能性がある
	他の管理目的との相乗効果	春の流出ピークを遅らせ、夏の基底流量	—	河川システムの状態を向上する

		を増加させる		
除去や改変の可能性	高い	さらに困難、長期的な影響がある	困難、長期的な影響がある	
現在の管理との整合性	他の目的すでに存在する	すでに存在する	すでに存在する	
気候変動予測の不確実性に対する頑健性	基底流量はまだ増加する可能性がある	基底流量はまだ増加する可能性があり、流量増大時に決壊するリスクが高まる	基底流量はまだ増加する可能性があり、流量増大時に決壊するリスクが高まる	

行動と優先順位付けにおけるトレードオフを比較でき、実装すべき行動を決定可能

⑨

Shaw, W.D. and Loomis, J.B. (2008) Framework for analyzing the economic effects of climate change on outdoor recreation. Climate Research, 36, 259-269.

タイトル

気候変動が野外レクリエーションに与える経済的影響を分析する枠組み

要旨

気候変動は、屋外環境のレクリエーション利用に影響を与える主要な要因として認識されるようになっている。気候変動の広範囲にわたる影響はよく認識しているにもかかわらず、屋外レクリエーションへのその影響は最近になって詳細に研究され始めたに過ぎない。本研究では、レクリエーション資源の利用者に対する気候変動の直接的および間接的影響に関して、野外レクリエーションが依存する自然資源への影響を介してモデル化を可能にする経済的枠組みを検討する。また、気候変動に敏感に応答するレクリエーション活動に関連した結果を紹介する。短期的な気候変動による比較的小さな気温の上昇でも、ボート、ゴルフ、ビーチレクリエーションなどの屋外レクリエーション活動に参加する人の数は14%から36%増加すると予測される。一方、他の活動に参加している人（特にスキーのような雪上スポーツ）は減少する可能性がある。将来の気候変動から生じる可能性のあるレクリエーション活動や関連する経済効果の変化のより詳細な予想を行うために必要な将来の研究の方向性について議論する。

対象：利用、脆弱性評価

評価：気候変動がレクリエーション活動に与える影響についての枠組み

内容（枠組み構築部分抜粋）

需要側では、気温と降水量は多くの人間活動に影響を与え、いくつかはある種の気象条件下では不可能となる。供給側では、気候変動によりある種の生息地が失われ、その種に依存する活動（動物観察や狩りなど）が消えてしまう。あるいは、その逆に活動が増加する場合もある。これらを直接的影響と間接的影響としてフローチャートにまとめた（図1）。また、表2に、気候変動によるレジャー全般へ影響を与える要因（上半分）と、活動に影響を与える要因を例示した。

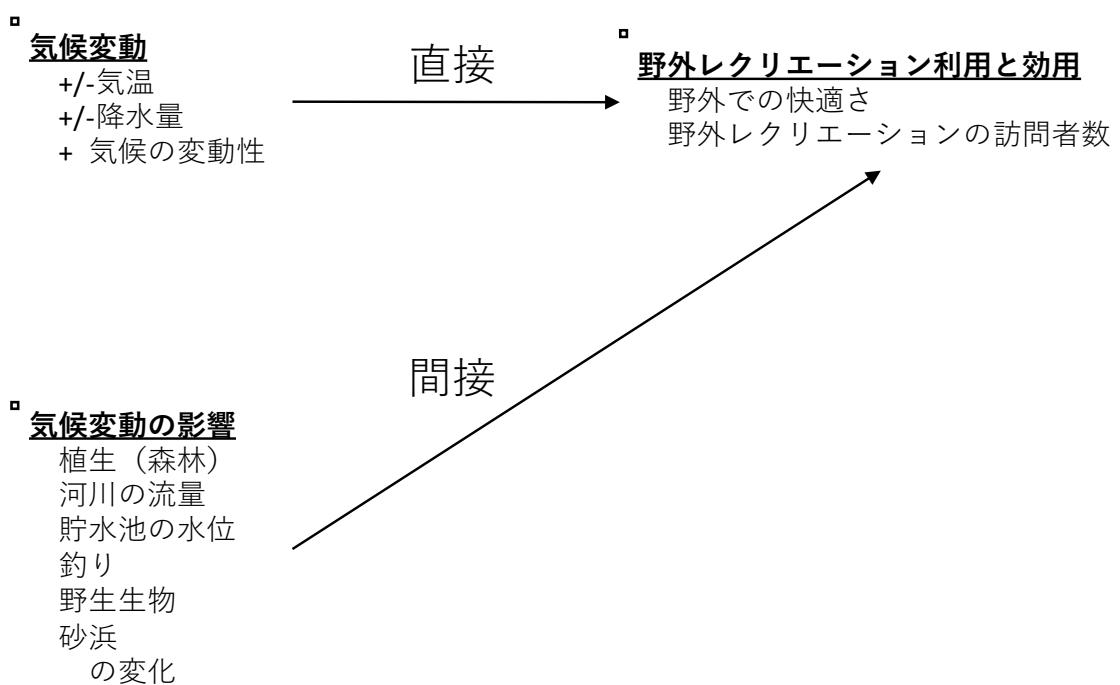


図1．気候変動がレクリエーションに与える直接的、間接的影響。

表2. 気候変動に影響を受けるレジャー・レクリエーションのタイプと特徴

活動	特徴
レジャー一般	
都市域での野外活動（テニス、ゴルフ、ジョギング、自転車、公園の訪問など）	日ごとの気温 降水量/湿度 日射 極端現象（ハリケーン、竜巻）
場所特有の野外レクリエーション	
ハイキング、自転車	森林の構成種、植生被覆、密度
釣り、ボート	水質、量、魚の生息地と獲りやすさ
狩り	動物の生息地、狩りの可能性
鳥・動物の観察	動物の分布、観察可能性
砂浜でのレジャー	海平面、砂浜の侵食
スキー、ウィンタースポーツ	雪の消失
ロッククライミング	嵐の密度、頻度

付録2 有識者ヒアリング結果

1.

工藤 岳（北海道大学 地球環境科学研究院 環境生物学部門 陸域生態学分野 准教授）

1.1. 大雪山国立公園について

＜他の国立公園との共通点＞

- 明瞭な高山帯（ハイマツ帯）の存在（北アルプス）
- 寒冷多雪環境（北アルプス・八甲田山）
- 多様度の高い高山植生（北アルプス等、本州ではチョウノスケソウの遺伝的多様性が低い）
- 多くの固有生物種の生育（北アルプスなど）

＜大雪山国立公園の特徴＞

- 広大な高山生態系と亜寒帯林の存在
- 周氷河地形と永久凍土の存在（ただし、富士山にも存在）
- 多くの固有種・希少種の生育（ナキウサギ、高山蝶、高山植物）
- 著しい多雪環境（豊富な雪渓）と多様な立地環境
- 高山植物の種多様性・遺伝的多様性が高い（北極圏との類似性が高い）

1.2. 着目すべき項目と将来予測

＜気候変化＞

- 気温変化：温暖化の進行（ $0.33^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ 。ヨーロッパアルプス、ピレネー山脈、ロッキー山脈と同程度のスピード）¹⁾
- 融雪時期の早期化（ $4.1\text{日}/10\text{年}$ ）¹⁾
 - ※「融雪」＝雪がなくなったとき（融け始めではない）
- 異常気象（集中豪雨）の頻発
- 雪の降り方の変化（春（3月）に降る。雪の少なかった十勝側で降る。吹き溜まりのできる位置も変化）

＜植生変化＞

- ・ 植生の変化は、過去の航空写真との比較によってもある程度把握できるが、低木や湿生植物（チングルマ、ハクサンイチゲなど）は、きちんと測定できていない。
- ・ 高山植物は風衝地～雪田に応じて（種毎に）モザイク状に分布。植生の変化は、全体で変化するというより、「モザイク構造の変化」と捉えるべき。
- ・ チシマザサの分布拡大が急速に進行中(空中写真からの変化分析による)。雪解けの早期化による無雪期間の増大や土壌乾燥化により、高山帯の広い範囲で生育可能となったと推定される。ササは全国各地の山岳域で急速に広がっている。100m幅のクローンを形成し（現存量多い）、リター蓄積を加速し、他の高山植物種を被圧して種多様度を低下させる。また、蒸散作用により土壌乾燥化を加速するなどの特徴がある。^{2,6,8)}
- ・ 湿生お花畠の縮小・消失(特にエゾノハクサンイチゲ個体群の消失は、土壌乾燥化の可能性大)²⁾
- ・ ハイマツの分布拡大(気温上昇の可能性大)⁷⁾
- ・ 高山植物の分布は「雪解け時期」と「土壌水分量」で決まる。

＜動物の分布や行動変化＞

- ・ 高山帯におけるエゾシカの増加と、それに伴うシカ道の増加・高山植生の食害やダメージの増大(気候変動との関連性は不明。伐採や林道などの土地利用の影響で、高山帯へのアクセスが容易になった可能性もあり。以前は子連れを見たが、2008年以降は群れで移動しているのを見る)
- ・ 外来種(セイヨウオオマルハナバチ)の高山帯への侵出(ただし、高山帯での営巣定着は未確認。温暖気候により高山帯への移動が加速される可能性あり)⁴⁾
- ・ 外来植物は今のところそれほど脅威ではない。人の手が入っている場所では見られるが、気にするほどではない。

＜生物季節の変化とミスマッチ＞

- ・ 春の温暖化に伴う開花・開葉時期の早まりと凍害のリスク拡大¹⁾（4～5月に暖かくなって開花。その後に再び低温となり花が全滅することもある。特に風衝地周辺で雪解けが早まる傾向）
- ・ 雪解けの早まりに伴う開花時期の短縮³⁾

- ・ 9月の気温が高くなっていて、それが急に下がる印象がある。紅葉のメカニズムである糖分転流がうまくいかなくなる可能性がある。
- ・ 植物群落の開花期の短縮に伴う、訪花性昆虫（マルハナバチ類）との季節的ミスマッチのリクス拡大⁵⁾。昆虫の越冬への影響も考えられる。
- ・ ハイマツは気温が高くなると伸びるので、豊凶の周期が変る可能性があり、食物として利用するホシガラスやヒグマに影響があるかもしれない（北海道で通常2~3年周期）。
- ・ 永久凍土が融解することにより土壤崩壊が発生しており、一度に広い面積の植生が失われるため問題。
- ・ ヒサゴ沼では、土砂が流入しエゾサンショウウオが減少した。

＜公園施設・利用者への影響＞

- ・ 豪雨による林道・登山道崩壊に伴うアクセスの遮断
- ・ 豪雨による登山道侵食と植生破壊の拡大¹⁾
- ・ 豪雨(ならびにオーバーユース)による土壤侵食に伴うキャンプ指定地の利用制限
- ・ 異常気象に伴う遭難のリスク増大(避難小屋などの施設の老築化もリスクを拡大)

1.3. 対策可能性

＜気候モニタリング＞

- ・ モニタリングサイト1000高山帯の気象観測(温度のみ)が、2011年より赤岳コマクサ平で進行中。また、ヒサゴ沼では1990年代より北大による気象観測(気温・日射・降水量など)が継続中(利用可能。降水量データに欠損あり)。モニ1000では気温と地温以外の気候モニタリング項目が抜けている。長期データ収集を前提とした観測体制の強化が必要。
- ・ 積雪環境の変化については、情報が著しく不足¹⁾。

＜植生モニタリング＞

- ・ モニタリングサイト1000高山帯の定点植生調査(各地点で1×10mメッシュを設定。4~5年毎に調査。各メッシュは更に1×1m、更に0.1×0.1mメッシュに分けて植物の有無を見る)が、2011年より赤岳(コマクサ平と第4雪渓の2地点)と黒岳(風衝地と雪田サイトの2地点。1地点1日以上かかりボ

ランティア実施は無理)で進行中。しかし、これらの調査で植生変化の全容(多様性の変化)を把握するのは、地点数が少なく不可能。大雪山ならば、数十地点必要。

- 航空写真を用いた過去30年間のチシマザサとハイマツの分布拡大の定量化が北大による調査によって公表されている^{6,7,8)}。ササ、ハイマツの分布、森林限界の移動については、空中写真で、ある程度明らかにできるだろう。

<動物の分布や行動変化>

- 高山帯におけるエゾシカの密度変化や植生へのインパクトについては、ほとんど定量化できる情報がない。情報収集が急務。
- セイヨウオオマルハナバチの侵入については、モニタリングサイト1000高山帯の目視調査による観測が、赤岳と黒岳で続けられている³⁾。しかしその調査はボランティアに依存しており、長期モニタリング体制は整っていない。さらに、モニタリングサイト1000高山帯調査では、インターバルカメラによる画像解析から開花時期を解析する試みが始まっているが、まだ試行検討段階にある。

<生物季節の変化とミスマッチ>

- 高山植物群落の開花時期の変化については、モニタリングサイト1000高山帯の目視調査による観測が、赤岳と黒岳で続けられている³⁾。しかし、その調査はボランティアに依存しており、長期モニタリング体制は整っていない。さらに、モニタリングサイト1000高山帯調査では、インターバルカメラによる画像解析から開花時期を解析する試みが始まっているが、まだ試行検討段階にある。
- モニタリングサイト1000高山帯の調査データを基に、高山植物とマルハナバチの季節性のミスマッチに関する解析が北大により行われている⁵⁾。温暖年に両者のミスマッチが助長される可能性が示されている。

<植生管理の対策可能性>

- チシマザサの高山植生への侵出が進行している五色ヶ原で、ササの刈取りによる高山植生復元実験が2008年より北大により進められている。ササの刈取りにより、湿生高山植生が急速に回復する結果が公表されており、温暖化における高山植生保全対策として、人為的植生管理の有効性が示唆されている⁹⁾。

- ・ 湿生植物群落においては、ササにとっても生育にぎりぎりの環境なため、ここで積極的な介入としてササ刈りすることは有効。土壌水分も上がり、4～5年で10×10mの範囲では回復することがわかっている。この間毎年刈払いを行ったが、登山道の草刈り管理の周期と同じ4～5年毎でも効果は期待できる。
- ・ もともと草本植生だった箇所に侵入したササを刈払うことで、草本植生が急速に回復し、更に種子による分布拡大が見られるが、埋土種子は少ない（高山植物は休眠性が高くない）。
- ・ この刈り払いは、ササ層で安定させないための緊急的な対応と考えるべき。結果を得るまで4～5年かかるため、手法として効果を確認する場合は早めに始める必要がある。ササについては、空中写真で30年間の分布変化は把握できるため、そこまで元に戻すというイメージ。

＜推定に関する情報＞

- ・ レフュージアについては、夕張岳やアポイ岳は狭くて難しいが、大雪山の場合は面的に広がりがあり、可能性はある。また、湿原植生や高層湿原は、レフュージアになり得る（八甲田のシラビソ林内の例）ただし、植物毎にその条件は異なる。
- ・ 10mメッシュでは、マイクロハビタットは入りきらない。1/25000植生図では落としきれない（北海道の植生図進捗率50%）。1/50000植生図では粗すぎ。
- ・ 斜度については、10mメッシュで入力の予定。

＜参考文献＞

1. 工藤岳 (2014)気候変動下での山岳生態系のモニタリングの意義とその方向性、地球環境 19:3-11
2. 川合由加・工藤岳(2014)大雪山国立公園における高山植生変化の現状と生物多様性への影響、地球環境 19:23-32
3. 工藤岳・横須賀邦子(2012)高山植物群落の開花フェノロジー構造の場所間変動と年変動:市民ボランティアによる高山生態系長期モニタリング調査 保全生態学研究 17:49-62

4. 工藤岳・井本哲雄(2012)大雪山国立公園におけるマルハナバチ相のモニタリング調査、保全生態学研究 17:263-269
5. Kudo G. 2014. Vulnerability of phenological synchrony between plants and pollinators in an alpine ecosystem. Ecological Research 29: 571-581
6. Kudo G., Amagai Y., Hoshino B & Kaneko M. 2011. Invasion of dwarf bamboo into alpine snow-meadows in northern Japan: pattern of expansion and impact on species diversity. Ecology and Evolution 1: 85-96
7. AmagaiY., Kaneko M. & Kudo G. 2015. Habitat-specific responses of shoot growth and distribution of alpine dwarf pine (*Pinus pumila*) to climate variation. Ecological Research 30: 969–977
8. Winkler D.E., AmagaiY., Huxman T.E., Kaneko M. & Kudo G. 2016. Seasonal dry-down rates and high stress tolerance promote bamboo invasion above and below treeline. Plant Ecology 217: 1219–1234
9. Kudo G., Kawai Y., Amagai Y. & Winkler D.E. 2016. Degradation and recovery of alpine plant community: experimental removal of an encroaching dwarf bamboo. Alpine Botany (in press) DOI: 10.1007/s00035-016-0178-2

2.

渡邊 悅二（北海道大学 地球環境科学研究院 環境地理学分野 教授）

2.1. 大雪山国立公園について

<他の国立公園との共通点>火山ベースの山岳国立公園

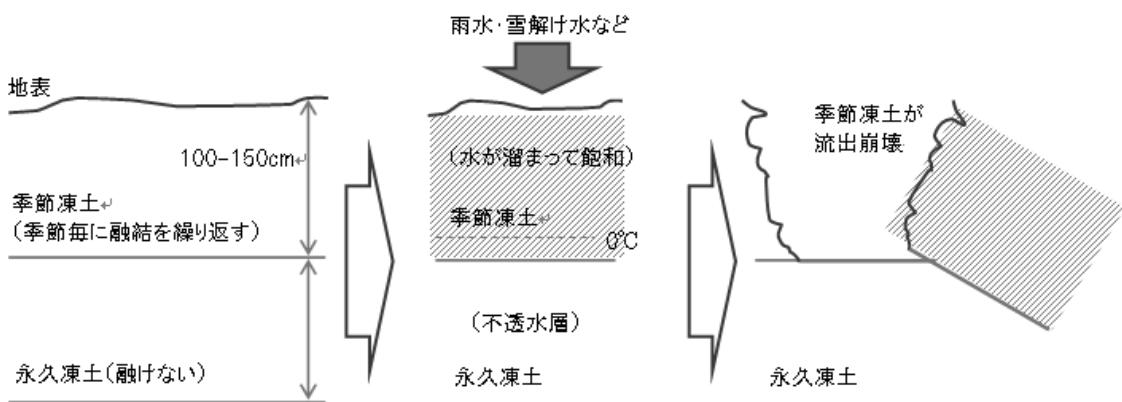
<大雪山国立公園の特徴>

- 火山ベース、かつ、なだらかな山岳空間を持つ国立公園
- 地形「パルサ」は大雪山にしかないが、研究者などが歩いただけで壊れる（ドローンの活用は有効）。この地形の保全は、高山植物の保全にもなる。
- 永久凍土と季節的な凍土の存在：季節的な凍土とは、初冬までに融解してしまう凍土で、大雪山ではしばしば永久凍土の上層にあり（この部分を「活動層」と呼ぶ）、厚さ 1~1.5m 程度。夏に季節的な凍土層が融解する過程で底部に残った凍土層が不透水層となるため、あるいは永久凍土分布域では不透水層である永久凍土の上方にあるため、水が溜まりやすく過飽和になりがちなところ。
- 永久凍土の場所は、標高と積雪量（冷気が土中に入るよう、積もりすぎず、ある程度積もる量）と地形を考慮すると、どこにあるかはだいたいわかる。

2.2. 着目すべき項目と将来予測

<気候変化>

- 1990 年代～これまでにない極端な豪雨を大雪山でも観測：登山道沿いに一気に水が流れ、その先の地形を変えてしまうほど。協働型管理で対応できる限度を超えており。グレーインフラを用いるのか、放っておくのか、合意形成が必要。降雨が流れる先の環境にも注意を払う必要あり。登山道を作った影響は大きいが、その線形を変更しても植生の回復は期待できない。
- 凍土の融解：とけたところを人が歩くと大規模な侵食がおこる。今後侵食がひどくなると予想。季節的な凍土でも大規模な侵食は起こり得る。ただし、まだデータがない。
- ここ 10 年くらいで、季節凍土の流出が顕著。



<植生などの変化>

- 植生がないところの土砂が流出して登山道が荒廃して、さらに一部では流出した土砂が植生を覆っている。
- 季節的な凍土層の融解時に過飽和になった土層は、土壤侵食や小規模崩壊だけではなく、植生破壊につながっている。
- 地形・地質と植生は対応している。将来の化石地形の保全保護が必要であり、人の活動による間接的な影響を鑑みると高山植物の保護にもつながる。
- 生物多様性と「ジオ多様性（地形地質の多様性）」は一緒に考えるべき。ジオ多様性を考えないと生物の基盤もない、という点で重要
- 研究者による破壊がある：事前の許可など、マナーの改善を。

<登山道について>

- 今まで、人が歩いて土が掘れたところに、多雪・融雪水などの影響を受けて登山道が荒廃すると考えていたが、この10年、とくに5,6年、今まで侵食がなかったところで一気に侵食が起こっている。雨水や融雪水の影響があまりないところなので凍土の融解が関係していると推測。経験的に侵食が進みそうなところは予測できている。
- 登山道のグレードがあることが利用者に知られていない。50~100年後の国立公園ビジョンを持ったうえで、現状に合せた改訂が必要。
- これまで今後の登山道の状況変化は、経験者と研究者の予測で一定程度把握できた。風衝地は90年代まで変化はなかったが、それ以降変化が見られる。
- 対策の事例は少ない。スイスの国立公園100年ビジョンでは、崩れたらそのまま、火事もそのまま、植生の変化もそのままとしている。管理当局に

は学位を取得した担当者が配置され、研究者と連携して普及啓発に努めている。

2.3. 対策可能性

<地形・地質などのモニタリング>

- 永久凍土の分布をとらえる。
- 凍土の融解の調査：来年からモニタリングをはじめる予定。凍土がどういうときに融解しているのか。どこで融解しているのか。問題が起こっている登山道のそばで起こっているのか調べる必要がある。
- 侵食速度を堆積物の深さから予測：貫入試験装置 PANDA を使ってコンパクションを測定。基盤に達すると深さが分かる。ただし、季節的凍土でまだ溶けきっていない部分があると、計測にミスが生じる。
- 地下水のモニタリング
- 現在、ドローンで等高線間隔 1cm 刻みの地形図をつくっている。

<気象モニタリング>

- 局所的な豪雨が多くなっているので、相当多地点で豪雨についてのデータをとらないといけない。3次元的に捉えることが重要。
- 冬場の降雪量と気温との関係
- アメダス・標高などのデータから将来を予測するシステムが現状ベスト。モデリングできる方が精度上げて作れると良い。
- 積雪スケールバーを設置して、登山客にサイエンスボランティアとしてメモリを読んでもらって情報を集約してはどうか

<植生モニタリング>

- ドローンによるモニタリングで、登山道の脇にある植被階状土周辺で生じている崩壊（植生消失）や植生変化がわかる

<登山道管理の対策可能性>

- 必要に応じて登山道を閉じる：登山道があることが問題でもある。一度登山道を作ったところはなかなか植生が回復しない
- 登山道の利用規制：雪解けとの対応でいくと、1ヶ月間通行止にするのは有効だろうが、一番景色がきれいなときなので利用者の理解を得るのは難しいだろう。

- ルートを変える：湿原の中を通る木道は止めるべきという意見がある。より積雪が少ない地表面にルートを変えることが考えられるが、その際は、ハイマツ林やナキウサギ等の繁殖地を通ることがあるため、検討が必要。
- グレードの改定：専門家によりグレードの見直しを行い整備してきている。情報交換は行っている。脆弱性の評価に対応するには現状に合せた改訂をしていくことが必要。グレードを高くすると、利用者が自主的に登山を控えることを期待できる。
- トレイル自体の変化に対して、理想にあわせるのか、変化に合わせるのか、管理策を作るにあたり、国立公園の中長期的なビジョンを考えることが必須。目指す姿については、現状よりも悪化させたくない、できれば少し前の今より良い状態に戻したい。雨水、融雪水、人に加え、凍土や豪雨の影響も考えないといけないので複雑。
- きめ細やかな協働型管理はコントロールが難しい。自然のままに放つておくのか、コンセンサスを持たないと今後問題になる。今まで登山道は協働型管理でコストを抑えて、現状維持をしてきた対処療法。中長期的な視野での位置付けを考える必要がある。協働型管理に落とすかどうかの合意形成をしないといけない。まだできていない。
- 業務についても発注して終わりではなく、途中でチェックをして対応する必要がある。ただし、利用者意見は様々でみんなが満足するのは難しい。
- 登山道の現状に関する評価：ユーザーの評価は集約できない。特にヘビーユーザーと初心者ではぜんぜん違う。
- 登山道含め地形の状況を調べるにはドローンレベルのスケールが必要。

3.

庄子 康（北海道大学 農学研究院 森林科学分野 准教授）

愛甲 哲也（北海道大学農学研究院 生物資源科学分野 准教授）

3.1. 着目すべき項目と将来予測

<気候変化>

- 大雨、台風、登山道や林道の破壊が問題
- 豪雨：登山道が流されて、通行止めも。観光に影響。登山道は閉じている日がわかる。
- 天候の動きが読みづらくなつた：スキー場のオープンした日とクローズした日のデータを見てはどうか。

<動物の分布や行動変化>

- シカが増えている

<生物季節の変化とミスマッチ>

- 紅葉の時期がはかりにくい：観光に影響する可能性

<利用について>

- 他地域の研究について：アルプスの事例などレクリエーション分野での気候変動の影響についての研究がある。*Journal of Outdoor Recreation and Tourism* で“climate change”と検索するといくつかでてくる。なだれのリスクに関する研究も。知床では、流氷の到達日数に関連させて、今観光で海外からオオワシを見に来る方がいるが、観察機会が将来減るかも。
- マイカー規制は混雑へのクレーム対応。自然環境への対応よりも駐車場が混雑するなどの物理的な理由が多いよう。高原温泉は車が落ちるので規制。
- 「社会通念」は管理の上で大きく影響（奥入瀬事故の例）。適応として整備のレベルを落とすことも同じ。どこを利用してどこを利用しないかも同じ。加えて維持コストも影響する。人数のコントロールだけでは対応できない。

3.2. 対策可能性

<登山道など利用について>

- 旭岳は火山で、何人登っても良いが、黒岳には高山植物が多く、人は少ない方が良い。ただ、すでに人が多く、道ができている。30人ほど歩くと道

になることが決まる。人数把握は意味があるのか、人数と登山道の荒廃との関係は不明。道が掘れるのは大雨（気象条件）によるところが大きい。キャパシティを考えるよりも LAC (limits of acceptable change)、合意形成などで許容値を設定して、問題が起きなければ現状維持、目標値と現状を鑑みて利用を止めるなどの対策をとる方が良いのではないか。

- 利用者人数の調査：過去に入林届けを書いた率をだして赤外線カウンターと合わせて計測を試みたが、誤差が多くて大変。利用人数が多い登山道はロープウェーと関連させてなんとなくわかるが、人が来ない道はわからない。入林届けも出さない人が多い。記入率 60%程度。何百人～何千人単位でデータ欲しい。岐阜・長野では入林届け義務化、赤外線カウンターの利用も増えている。
- 地元の人にとって人数の把握は重要。歩道整備などの合意形成において、納得する材料になる
- 人を引き付けるものの変化が人数（入込数）に影響するが、入込数と地域の収入は直接関係ない。例えば、登山道には特に 9 月に多いルートなどがある。
- 古くからある道は、景観の良いところを通っている。生態系の観点からは避けたいところに道がある。湿原の道をハイマツにまわす対応策もあり。
- 谷地形で湿地を突っ切る木道には、環境には悪影響を与えている。ぬかるみを避けるルートは必要。現状、ぬかるみをよけて新たな道ができてしまう。
- 登山道の放棄や手当しないことは許されるのか、ほったらかしにしたらみんな適当に歩いて荒れるのか。維持コストを考慮。登山道で想定以上の崩壊が起きていることは現場から声が上がっている。
- 登山道の整備ボランティア：高齢者ばかりで間に合わない。今後維持できる体制ではない。登山道の補修を測る際は、ボランティアで行われる箇所もあるため、金額だけでは程度を測ることはできない。
- 大雪山グレードの考え方：たて軸は利用の強度、横は森林限界生物・景観、生態系へのインパクト
- ブランドや魅力の方が観光には影響するかも。

- 道路に注目する：アクセスの問題。利用面の脆弱性をアクセスからみる。実際、大雨、台風により施設、林道は崩壊。森林管理署が施業しない箇所はゲートを閉めてしまったのでアクセスルートがなくなっている。管理計画（事業道路）も評価に使える。道ごとに生物、地質で評価してはどうか。

4.

深澤 圭太（国立環境研究所 生物・生態系環境研究センター 生物多様性評価・予測研究室　主任研究員）

4.1. 国立公園への脅威・問題点について

＜国立公園の獣害問題＞

- 標高の高いところでシカによる食害の被害あり。
 - 例：南アルプスでは、夏場は標高 3000m くらいの場所に常時シカがいて高山植物が食害を受けている。登山道を通って移動している。大台ヶ原は林床植生が衰退している。シカとは別の要因で、樹木の立ち枯れもあり、植生が変化している。尾瀬では湿地帯にシカが入り込んでいる。量的にはわかっていない。笹は好きで、よく食べる。笹の防除にシカが使えるかというと、管理しきれないため難しい。
- 北海道ではシカ以外の獣害として、イノブタが確認されている。大雪山ではシカがメインである。

＜シカ対策＞

- シカは気候変動が起こらなくても管理がうまくいっていない。まずは、適応以前の問題である。
- 公園内でのシカ管理は、標高の高いエリアでの捕獲（銃を使った駆除が多い）を行う。しかし、低いところから次々と侵入する。蛇口をあけっぱなしで水をふくようなもの（五箇さん）。高山帯での捕獲は効率的ではない。大元をなんとかしなければ解決しない。シカの被害は、下（標高の低いところ）で増えて、上に上がっている。下の個体数を減らせば、標高の高いところにはいきにくいうだろう
- シカは平坦なところにあつまっているのが一般的。場所を特定してプロのハンターに頼み、そこにいるシカは根絶くらいの勢いでとってしまうと良い。大雪山であれば、どこにシカがいるのか現地の人聞くと良い。
- 夏場、低標高域でシカの餌資源がまかないきれていなかったために、標高の高いところへと移動してくる。
- シカの分布について、論文では気温は考慮されていない、気温が重要な факторではないというのが研究者の考え方。積雪が問題である。雪がふることはシカにとってマイナス、大雪に弱い。雪が降ると標高の低いところ

に移動するため、越冬地がどこにあるのかを見る必要がある。シカの分布には、土地利用も影響する。

- 低標高域の農地周辺では、シカに亜硝酸塩を食べさせる対策がとられているところがあり物議を醸している（五箇さん）。
- 高山帯は生物多様性のホットスポットで、他にくく（代替がきかず）、観光としての価値も高い。そのため、低標高域よりは高標高域の方が保全する優先順位が高い。
- 取り返しがつかず、なくすとやばそうなものから保全する。下は面積があるから、まだなんとかなる。守る上でも限られたところから守る方が戦略はたてやすい。まずは、入り込むのをふせいでから、元をたたくのが鉄則。

（五箇さん）

＜シカに関する調査・研究＞

- シカは夏と冬で分布が異なる。標高差については、GPS テレメトリを使用して個体の動きを計測するなどして、今後評価する必要があるかもしれない。冬の分布に対応して調査していくと良い。
- エゾシカとニホンジカは個体の大きさが異なるため、積雪時に奥へと進める距離が異なる。よって、基本的には種単位でシカの分布調査を行う。まずは当面は種で調査し、その後、場所ごとなど詳細な調査へ。
- 狩猟のデータは基本冬場のもの。データは、5km メッシュの情報がある。国でとっている。その中で平坦なところの割合や降雪を考慮すると分布がわかる可能性。ただし、シカは数十キロは歩く。
- 農工大の斎藤さんがシカの分布について、直前からの距離（夏と冬の違い）と環境要因で推定した論文を出している。ただし、夏と冬の違いについては、個体群の位置を見ている。同一個体かはわからない。個体ベースでみるのは難しい。パッチごとにいるいないを調査する。個体ベースは GPS テレメトリをつけるしかないが、エリアの大きい北海道では、適当に GPS をつけたシカが高山帯に行く確率は低いのではないか。もし高山帯で見つかったらすぐに駆除されてしまう。ドローンで個体識別は難しいが、いるかないかの判断は可能かもしれない。ただし、データの質は捕獲データと変わらない可能性も。大量の GPS をシカにつけて調査ができたら研究者としては魅力的である。

- 獣害のモデリング、予測について。分布データが時系列でとれていれば可能。ただ、5km メッシュではある。（景観スケールで考えれば 5km でも折り合えるかもしれない）
- 全国規模でのシカに関する調査を大橋さんが行った。5km, 10km メッシュのデータを使っている。時間解像度が荒い（基礎調査があったときのみ）。捕獲数に関しては毎年まとめている。
- 空間解像度は 5km が限度。ハンターの報告義務がこのレベルなため。行政事業で GPS をついている場合も多い。かなりのデータ量になる可能性がある。行政ではデータを持余しているかもしれない。
- 気候変動シナリオに狩猟者による捕獲のシナリオを考慮する必要性について。狩猟がどこでどれくらいされているのかわからないので、捕獲の影響と気候変動の影響を識別した分析や予測は困難。荒い空間スケールなら狩猟の効果を入れられるが、捕獲に予算を投じている現況を維持した状態での予測やモデルにはなるだろう。まずは捕獲の効果も入れ込んだモデルをまわすことで、概要は把握できるのではないか。

<チョウについて>

- 一つの生息地だけを保全してもよくない。生息地の分布、周囲にどれくらい分布可能域が広がっているのかが重要。メタ個体群としてみる。荒いスケールなら植生と関係が高いので評価可能。考えやすい。
- レスキュー地域の存在。環境条件の良いところが周囲にあれば、ある地域のチョウが減っても、そこから供給されることがある。ただし、逆に良いところから（本能に従って）出でていってしまうこともある。

5.

五箇 公一（国立環境研究所 生物・生態系環境研究センター 生態リスク評価・対策研究室 室長）

5.1. 国立公園への脅威・問題点について

＜国立公園への侵入種問題＞

- 外来種は北上している。亜熱帯域のものが北上。節足動物や、デング熱、ウイルスをもった蚊も入りやすい。温暖、冷温問わず、外来種は入りやすい状況。基本的には南のものが北に上がり、定着する。ただし、北極圏で氷が溶けて、（侵入種が）南下するというリスクもいずれ考える必要がある。
- アルプスにススキが増えている。また、上高地レベルだと、雑草での景観変容がおこっている。外来植物の多くは、花が咲けば綺麗で、変容しているのを問題と捉えていない観光客が多いのが問題。
- 雜草は、靴底の種子や荒地が増えることで侵入しやすくなる。空き地ができるか、土壌の質が変容すると植生の優先順位が変わる。侵入種が入り込みやすいのは道路沿いの環境。アメリカやラテン、アフリカなどの乾いた土壌での相対的な適応度が高い植物の侵入が懸念される。対策を考慮するならば、道の情報と登山客の人数、降雪量がポイントになる。気温は関係ない。道路沿線の植生と人が歩くことによる土壌への影響、靴やリュックからの持ち込みを考慮。植生の変化については、道路は決定的、林道レベルでも影響がある。登山道をシカが利用したり、マングースが林道を使っていたりすることもある。それがわかれば、例えばマングースであれば林道に罠をかけて効率的に捕まえられる。今は野ネコが問題。罰金などをしたら良い。

＜大雪山国立公園の侵入種問題＞

- セイヨウオオマルハナバチが北上してきている。標高も低いところから高いところへ。ただし、年変動が大きい。温暖化の影響は 100 年 200 年のスパンだが、その間の環境変化の方が影響が大きいだろう。例えば、人が土地を荒らし、雑草がどんどん入り込んでいる。道路つくれば、その脇にアザミやシロツメクサなどが増える。セイヨウオオマルハナバチにとって是一斉開花する雑草が増えるほど繁殖のチャンスとなる。下（標高の低いと

ころ)での密度が上がり、上へ移動する。食料資源、餌があるかどうかと、冬の越冬覚醒が必要。もともと北方のものがおりてきている。セイヨウオオマルハナバチに関しては、観光にはあまり影響ないのでないか。高山植物への影響についても、野外では受粉が妨げられる環境にはあまりならない。花の形態によるが、セイヨウオオマルハナバチがいた方が繁殖しやすいだろう。正と負の効果が考えられ、ポリネーターによる生態系のリスク評価は、操作実験のレベルならあるが、野外ではほとんど実証されていない。

- 観光資源への影響に関しては（害獣は自然豊かなエリアには入りにくいこともあり）雑草の方が景観変容という意味で深刻であろう。セイヨウタンポポは、花が咲けば美しい。観光客が文句を言うことは少ないのでないか。
- 南からは、アルゼンチンアリなど越冬できなくとも夏場だけでも入り込む種がある。
- 大雪山では雑草の侵入とセイヨウオオマルハナバチが想定されるリスク。冬が過酷だから、そう簡単に大きな変化はないと考えられる。ただし、雪が減ったら、アライグマなどが増える可能性もある。全ての動物にとって、積雪か餌が問題、気温はあまり問題ではない。
- 対策としては、セイヨウオオマルハナバチは化学的防除のテストを地元と協力して実施している。見つけ次第なくす。（標高の）上から下へ対策をとり、そして下も減らす対策をとる。恒常に抑える戦略をしつつ、根本への対策も行う、それが適応策にあたるだろうか。

<国内外来種の扱いについて>

- 法律的には人や農業被害がないと対策はしにくい。
- 北海道なり、各自治体が判断して自然保護などの理由で許可を出し、駆除を行うと良い。
- 公園への持ち込みは野ネコや野良犬のリスク、ペットの放逐のリスクが一番危険。もはやシステム論、管理計画が必要。
- 観光地での螢の放流、それによる定着が問題になっている。しかし観光資源として定着している面がある。今後も温泉宿など注意しないといけない。上高地でも螢が生きられる。
- 山小屋周辺では排泄物による富栄養化で植生が変化することがある。

- 国内外来種の適応策は、基本、入れない、入れさせない、早期発見、早期排除。登山者への宣伝、バラエティ番組で宣伝するなどの教育効果も期待。国民の総意や意識を高める教育ができなければ、ものの流れと人の流れは変わらない。ただし、合意形成は根拠を示さなければ、理解されず、うまくいかない。希少性や固有性をいかに価値のあるものと考えられるか。希少性や固有性を可視化する。「リスク」と「もったいない」をわかりやすく伝えることが有効である。宣伝がうまい国は他にない。どこ国も同じ課題をかかえている。アメリカは強制発動 EPA でやるのか、
- 適応計画でのコンフリクトについて。計画を持って住民に話しに行くと反対にあう。話を聞いてから計画をもっていくのが鉄則。農業や、生態系において全滅などの被害が出ないと課題が解決しない。何を普及啓発に使うのか、キャッチャーな種や一部でもショッキングなものを準備すると良い。(肱岡さん)
- (外来種に関する普及啓発で) 象徴すべきはアイコン。エモーションに訴えるのが良い。例えば、日本バーションのシロクマのようなアイコンを設定すると良い、可愛いのが良い。

<産業との関連について>

- win-win な答えをみつける話し合いが重要。
- 長期的には豊かな自然が経済効果を生み出すことが、ちゃんとはじきだされると良い。
- 春節の中国人旅行客は、観光スポットに散っている。総合的なビジョンとして、公園のエリア拡張もあり得るが、お金が問題。どう説得するのか。温暖化だけでなく、経済や人の動きを考慮すべき。環境改変は観光など、別の要素も含めた視点で考える必要がある。生き物のサイクルは短いから、温度だけで考えてはいけない。
- インバウンドにアンケートをとると世界遺産エリアと北海道など、雪がある、食べ物がおいしい、スキーができるところが人気。実際、北海道に中国人が多く、観光客数が倍増している。観光客による影響として、顕在化するかもしれない外来種のリスクの想定をする必要がある。(例: 真鯛の病気、厚労省ではタイプが違うといっているが。)
- 感染症のリスクが一番大きい。全てのリスクが同時に起こる。中国や日本は東アジア共通の特性をもった種が多く、アジアのものは同じような環境

のところに入り込む。日本の森林エリアに（同じ生態系ニッチで）入ってくる。

- 空港で殺菌消毒ができればよいが、反発があるだろう。人自身がお金だから止められない。靴底と荷物の影響は大きいだろうが、検疫は難しいだろう。
- 靴底の泥はそう簡単にとれない。それを洗うのは大変。相当洗わないと土は落ちない。防げない。

＜気候変動の要素を考慮する調査・研究について＞

- 今の管理計画は気候変動を意識しているわけではないが、適応している。利用のあり方は議論しやすいかもしれない。気候変動の生態系への影響は難しい。公園管理の枠ではどうしようもない可能性も。どこにポイントを置くのか。温暖化と言うキーワードを後押しにしてリスク管理を行うといい。
- 気候変動の結果、割と最後まで残るところや、固有性がわかれば優先順位をつけて戦略地として設定をする。その評価を優先してやる、その方が良いのではないか。
- 気温はどうしようもないで、火山などローカルな要因を考慮する方がよいのではないか。

6.

肱岡 靖明（国立環境研究所 社会環境システム研究センター 地域環境影響評価研究室 室長）

6.1. 脆弱性評価と適応計画策定の枠組について

- （高山植生と紅葉の時期がずれる、登山道の侵食が気になっているという点について）脆弱性はよく点数化しているが、それだと何してよいのかわからないので、具体的な適応策がとりやすい方が良いだろう。指標は他との比較による点数化が多い。他との比較には使えるが、もっと細かい適応オプションを考える。
- 日本全国の評価をした上で、大雪山に注目していくときには、具体的な項目（営業日数を出すなど）を洗い出したやり方がよい。ボトムアップ的にもよいのではないか。
- 大雪山国立公園を対象とした脆弱性評価と適応計画策定の枠組の妥当性について。個々の農家、国、世界の視点で違うので、局地的な解は出てくる。分担の考えも色々ある。組み合わせをすべて出して決めて貰えばよい。手順からまとめていけば、ガイドラインやマニュアルになる。

6.2. 将来予測について

- 適応計画を考えるべき時間スケールは分野で異なる。最大 2100 年。いつから考えるかは対策を打てる時間による。（例：ダムならば建設のための時間を差し引く）今から考えて、2100 年にどうなるのかを考えるのが現実的。影響評価を揃え、今できることを議論する。自分のことと思える適応策を考える。時間スケールが 30 年だと小さい。
- 気候シナリオは毎回新しいものが出ている。誤差が大きいので、観測データを増やして、そこから 1,2 度上がったらどうなるのか、というものを考えるべき。今の状態から 1 度上げるシナリオで何ができるのかを並べる。（例：テムズ川では 4m の水の上昇にどう対応するのか高潮への対策を検討している。）今、何ができるのかを段階を経て提示する。気候変動が起きてても、これをしておけば影響が少なくなるというスタンスの方がわかりやすい。
- データが不十分な対象の取扱や、不確実性評価などについては、出し方による。ポテンシャルと地域のモニタリングで補正をする。モニタリングに注力していけば良い。

- ・ 人口減少や土地利用変化など気候変動以外の要素は、できる限り考慮すべき。気候変動の影響がどの程度大きいのか、その割合を知りたい。社会と気候の影響を分けて考えればまだ論文になる。まだ少ない。
- ・ 全国～全国規模の予測と国立公園の区域など小さな面積での予測と、シナリオを組み込んでいくことの妥当性について。全国は目安である。そこに一手間かけられれば、地域へおとせる。例えば、土砂災害は m 単位の予測を行うが、雨のデータは 1km メッシュであり、土質や雨の量などを考慮する。計算はできるが、手間と現状データ次第、目的による。時間と人手がかかる。
- ・ 日本では画一的なアメダスなどのデータはあるが、大雪山レベルでのデータについては、整備を行っている状態で手元にはない。

6.3. 適応計画策定に際して

- ・ 適応計画の事例について、世界には適応計画はたくさんあるが、実装できていない。日本も同様。スタンプを押すのに山小屋に入れさせるとか、消毒させるにも、やり方を考える。適応という視点でやってるところは少ない。山形では、今はさくらんぼがメインだけれども、県の試験場では柑橘類を作ろうとしている。農業分野は適応策をがんばっている。今の気候変動の中でいっぱいの状況。茨城は次に備え耐性のあるコシヒカリをすでに準備中とのこと。また、各県別の一等米を作って適応している。国交相による高潮への対策など、色々な影響を見越してフレキシブルに作るなどの事例はある。それも含めて、対策をやっているというアピールにも使えば良い。科学の不確実性ととらえ方には乖離があってもよいだろう。
- ・ こちらが提供するツールとして、観測値をいれたら逆計算で気温がでるようなものを考えたとき、予測とモニタリングの誤差を考慮して改良したらどうか。全国計算だと近隣県の違いを考慮しないが、それはできた方が良い。細かい違いについての指摘があるかというと、例えば、浸水ナビは、出してみたら非難などはほとんどない。
- ・ 科学的なデータの蓄積が重要。将来の話だけれども預言者ではないので、この条件なら何が起こるのかを示して、何をするのかはステークホルダーが考える。反復のプロセスが必要。適応計画は不確実だが、条件と優先順位によって変えれば良い。分岐が増えると不確実性が増えると捉えるのか、

選択肢が増えると捉えることもできる。いっぱい考えて、影響が小さうことや確率の低さなどは後回しとか、因果関係は専門家が洗い出すべきだが、何か決めるわけではない。そこで色々な人が入れば良い。一度分析して評価して終わりではなく、進歩していくべき。五年に一回直すとか、やり直しが重要。

<その他>

- 地域適応コンソーシアムは 6 つの地域と全国で展開。連携を。情報として蓄積するためのタイアップ、情報の共有をしていくたい。
- 適応策の導入の仕方は難しい。一度作ると変えるのは大変。やれることをやる。