

平成 29 年度環境省請負業務

平成29年度生物多様性分野における気候変動への
適応策検討業務

報告書

平成 30 年 3 月

国立研究開発法人国立環境研究所

目次

1. 本業務の目的	p.1
2. 本業務の実施内容	p.2
3. 平成 28 年度モデル保護区での追加評価・予測及び成果還元	
3.1 大雪山国立公園における追加評価・予測の実施内容と追加データ	p.4
3.2 大雪山国立公園における高山植生の分布予測	p.7
3.3 大雪山国立公園における紅葉の将来予測	p.29
3.4 登山道の荒廃要因と将来予測	p.47
3.5 大雪山国立公園における適応オプションの抽出と管理計画の立案に向けた解析 (適応策の提案)	p.52
3.6 地元関係者への成果報告とアンケート調査	p.60
3.7 モデル保護区での追加調査・予測及び成果還元のまとめと今後の課題	p.64
4. 沿岸生態系に関する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	
4.1 空間基盤情報	p.72
4.2 我が国の地域スケールの気候変動シナリオのデータ	p.74
4.3 地域規模の海洋環境の現況再現・将来予測	p.75
4.4 具体的適応策の検討に向けた手順	p.77
4.5 モデル保護区での情報収集及び施行に向けた課題の抽出	p.80
4.6 今後の課題	p.90
5. 海外の適応策に係る情報収集	p.96
付録 1. 大雪山国立公園登山道関係者による情報交換会にて用いた説明素材	p.125
付録 2. 大雪山国立公園登山道関係者による情報交換会にて用いたアンケート票 および単純集計	p.130

1. 本業務の目的

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、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。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。

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。

本業務は 2 年目となるが、昨年度は高山帯・亜高山帯における調査を実施したことから、今年度はその追加評価等を行うとともに、海外の適応策に関する情報収集、沿岸生態系における情報収集を実施するものとする。

2. 本業務の実施内容

本業務では以下の内容の調査を実施した。

（１）平成 28 年度モデル保護区での追加評価・予測及び成果還元

平成 28 年度の本業務のモデル保護区とした大雪山国立公園について、試行結果の更なる精緻化及びその結果の現地関係者への還元を図ることを目的として以下の業務を実施した。

①気候変動が自然環境に及ぼす影響について、必要なデータの追加収集・分析及び分析結果の精度検証（不確実性の考慮を含む）を行った。そのために、2017 年 7 月 10 日から 14 日に 5 名により東川町、旭岳及び白雲岳周辺の現地調査及び情報収集を行った。

②気候変動が同国立公園の保全と利用に及ぼす影響について、①の成果を考慮に入れながら分析及び将来予測を行った。

③平成 28 年度の本業務並びに上記（１）及び（２）①②の成果を踏まえた適応策の提案を行うとともに、現地関係者に対して、気候変動が大雪山国立公園に及ぼす影響及び適応策をどのように示したら対策への理解や協力を得やすいかを検証した。大雪山国立公園登山道関係者による情報交換会にて、現地関係者への説明及びアンケート調査のために、旭川市（2017 年 12 月 13 日）及び帯広市（2017 年 12 月 25 日）にそれぞれ 2 名で出張を行った。

④上記③を踏まえつつ、気候変動が大雪山国立公園に及ぼす影響及び適応策について分かり易く解説した説明素材を作成した。

（２）沿岸生態系に関する適応策の実施に資する既存ツール・手法の収集・整理

（３）で収集する情報を含む「沿岸生態系に関する保護区での適応策」の実施に必要な、気候変動に対する脆弱性評価及び変化シナリオ予測について情報収集し、我が国の保護区に適用するのに有用な手法を検討した。ここで有用と考えられる評価・予測手法の抽出に当たっては、気候変動シナリオの時空間スケール、非気候的圧力（地元産業を含む）の考慮、地域間の比較可能性、地元の関心事項、必要なデータの有無（入手可能性）等の観点を考慮して整理した。

その上で、将来的にモデル保護区での評価・予測及び適応策検討の試行をすることを見越し、沖縄県の慶良間諸島国立公園を対象に自然保護官へのヒアリングを含め、現地関係者へのヒアリング、サンゴの生息状況把握及びホエールウォッチングの状況把握のために 2017 年 6 月 21 日から 24 日に 5 名、2017 年 10 月 16 日から 19 日に 2 名、2018 年 2 月 21 日から 3 月 1 日に 4 名による現地調査を行った。

（３）海外の適応策に係る情報収集

山岳生態系及び沿岸生態系の適応策（気候変動下での保全）に関して、海外の情報源か

ら、とりわけ以下の情報・事例を整理した。

- ・面レベルの保全（例：どのような場所が将来の逃避地と考えられ、それをどのように選定し、現時点からどう保護管理しているか又はしていくべきか。その効果はどの程度か。）

- ・種レベルの保全（例：気候変動に脆弱な種の生息域外保全を、誰がどのような体制・予算で行っているか又は行うべきか。種の選定をどのように行っているか。その効果はどの程度か。）

3. 平成 28 年度モデル保護区での追加評価・予測 及び成果還元

3.1 大雪山国立公園における追加評価・予測の実施内容と追加データ

平成 28 年度の本業務のモデル保護区とした大雪山国立公園について、試行結果の更なる精緻化のため、28 年度業務における課題として挙げられた、①高山植生の分布予測における積雪に関連するデータの追加による再解析、②将来予測における不確実性評価のための複数シナリオ、気候モデル、分布推定モデルによる解析、③登山道の浸食に関する調査、を実施した。

3.1.1. 大雪山国立公園を対象とした基盤情報

対象地域の基盤情報として平成 28 年度業務で整備した地形や気象等のデータを用いた（表 3.1.1.）。

3.1.2 気候変動予測データ

気候変動に伴う将来予測の不確実性を構成する要素として、①将来の温室効果ガスの排出量、②将来気候の予測の不確実性、③将来の気候に基づいた生物分布など変化のモデリングに起因する不確実性、の 3 つがあげられる。これらによる不確実性の幅を推定するためには、複数のシナリオ、気候モデル、分布推定モデルを用いた将来予測を行う必要がある。温室効果ガスの排出量については、IPCC 第 6 次報告書で用いられた 4 つのシナリオのうち、RCP2.6 および 8.5 を用いた。RCP2.6 は 2100 年における世界平均気温の上昇を 2 度以内に抑えるシナリオ、RCP8.5 は、2100 年における温室効果ガス排出量が最大のシナリオである。1986～2005 年を基準とした、2081～2100 年における世界平均地上気温の変化は、RCP2.6 では 0.3～1.7℃、RCP8.5 では 2.6～4.8℃ の範囲に入る可能性が高い。

気候変動予測については、1km 解像度にダウンスケーリングした積雪期間の予測値が入手可能である、3 つの全球気候モデル（GCM）として MIROC5、MRI-CGCM3、IPSL-CMA5A-LR を気候変動プラットフォームから提供を受けた。また、これらのシナリオ・気候モデルに対応した積雪データは国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所から提供を受けた。

将来予測の時期としては、2046～2050 年、および 2096～2100 年の 2 時期、各 5 年間の平均値を将来予測に用いた。整備した気候変動予測データを表 3.1.2. に示す。

表 3.1.1. 大雪山国立公園を対象とした基盤情報一覧

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	区域内	https://www.env.go.jp/park/common/data/05_daisetsu_map_j.pdf	
管理計画案	管理	環境省	モニタリングサイト1000	地点	モニタリングサイト1000報告書	点やラインを地図から読み取り
管理計画案	管理	環境省	生物多様性センター 国立公園区域等	全国	http://gis.biodic.go.jp/webgis/sc-026.html?kind=nps	
	管理	環境省	生物多様性センター 国指定鳥獣保護区区域等	全国	http://gis.biodic.go.jp/webgis/sc-026.html?kind=nwp	
管理計画案	利用・管理	環境省	大雪山登山道グレード	区域内	http://www.daisetsuzan.or.jp/enjoy/grade/	
管理計画案	利用・管理	環境省	登山道荒廃状況	区域内	平成25年度大雪山国立公園整備計画策定等基礎調査業務資料編	
管理計画案	利用	論文	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	国土交通省	国土数値情報 平年値気候メッシュ	北海道	http://nlftp.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/known/amedas/kaisetsu.html	csvをポイントデータに変換、区域中の閉鎖された点については手入力追加
紅葉日	気象	気象庁	日別値：気温、降水、雪	上川、白滝、ぬかびら源泉郷、麓郷、層雲峡	http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php	層雲峡は気温なし
	気象	気象庁	日別値：降水	白金、三股、三国山*、軍艦山*、西ヌブカウシ山*、旭岳*、前富良野岳	http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php	冬季をのぞく現在閉鎖されている
	気象	気象庁	年別値：気温、降水、積雪	旭川、ぬかびら源泉郷	http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php	
	気象	気象庁	年別値：降水	層雲峡	http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php	
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.dc.affrc.go.jp/mesh/mesh.html	
分布推定・ 紅葉日	地形	国土地理院	10mDEM	区域周辺	http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html	
	地形	国土交通省	河川	北海道	http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html	
	地形	国土交通省	主要水系調査（一級水系）	十勝川水系 釧路川水系	http://nrb-www.mlit.go.jp/kok-jo/inspect/landclassification/download/index.html#sw	
	地形	国土地理院	湖沼図	然別湖 釧路湖	http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/koshouchousa-list.html	
	地形	国土地理院	水涯線	北海道	http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html	
	他	国土交通省	行政区域	北海道	http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html	
	他	国土地理院	道路線	北海道	http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html	
	地質	産総研	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	植生調査（第2 - 5回）	北海道	http://gis.biodic.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.biodic.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.biodic.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.biodic.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.biodic.go.jp/webgis/sc-023.html	

3.1.3 将来予測の不確実性の評価

本業務では、対象地域における高山植生の分布、紅葉の色づきと時期、登山道を対象とし、2つのシナリオ・2時期・3つの気象変動予測データを組み合わせることにより将来の気象を予測し、それに対する評価対象の変化予測と不確実性をそれぞれ求めた(図3.1.1.)。

表 3.1.2. 整備した気象変動予測データ

気候モデル	開発元	期間		時間解像度	空間解像度	シナリオ	項目
MIROC5	東大/NIES/JAMSTEC	2031 ～2050	2081 ～2100	日	3次メッシュ	RCP2.6/8.5	T2,TN,TX,PR,RS
MRI-CGCM3	気象庁	2031 ～2050	2081 ～2100	日	3次メッシュ	RCP2.6/8.5	T2,TN,TX,PR,RS
IPSL-CM5A-LR	IPSL Climate Modelling	2031 ～2050	2081 ～2100	日	3次メッシュ	RCP2.6/8.5	T2,TN,TX,PR,RS

◆項目の詳細

日平均地上気温 (T2)	℃
日最低地上気温 (TN)	℃
日最高地上気温 (TX)	℃
日降水量 (PR)	mm/day
日積算日射量 (RS)	W/m2
(下向き短波放射)	



図 3.1.1. 将来予測のためのシナリオ・モデルの組み合わせと不確実性の評価

3.2 大雪山国立公園における高山植生の分布予測

3.2.1 目的

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、高山植生の気候変動に関する適応策の検討を行うため、高山植生および高山植生と競合する可能性のあるササ群落・亜高山帯森林植生の分布について、将来予測を得る。

3.2.2 方法

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、積雪期間、降水量)に基づいて分布予測を行った。

● 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)のデータに基づき、各3次メッシュ内の雪田草原、高山ハイデ及び風衝草原、高山低木群落、ササ群落、亜高山帯森林植生、ササ群落の三次メッシュ内の面積を分布推定モデルの従属変数とした(表3.2.1.)。ササ群落は、環境応答が異なる可能性があるため、低標高と高標高に分けて分布推定を行った。

表 3.2.1. 従属変数とした植生に含まれる自然環境保全基礎調査に基づく植物群落

従属変数名	含まれる群落
雪田草原	ミヤマキンポウゲ群落、ミヤマクロスゲーチシマクモマグサ群集、雪田草原、ツルコケモモミズゴケクラス
高山低木群落	高山低木群落、コケモモハイマツ群集、ダケカンバーハイマツ群落、ミヤマハンノキダケカンバ群集
高山ハイデ及び風衝草原	高山ハイデ及び風衝草原、コマクサーイワツメクサクラス、コメバツガザクラミネズオウ群集、エゾマメヤナギエゾオヤマノエンドウ群集、風衝草原
ササ群落	(低標高) ササダケカンバ群落、チシマザサークマイザサ群落、ササ群落、(高標高) ササ自然草原
亜寒帯森林植生	アカエゾマツ群集、エゾマツダケカンバ群落、ダケカンバーイワノガリヤス群落、ダケカンバ群落、エゾマツトドマツ群集、ヤマハンノキ群落

説明変数には、昨年度の本業務の結果を受け、気象、地形、地質に関する変数を用いた。気象に関しては、夏季(6-7月)の平均気温、年降雨量、積雪期間を用いた。年平均気温や、昨年度の本業務で説明変数として用いた寒さの指数は、積雪期間と強い相関(相関係数

0.85)がみられたため、説明変数として用いなかった。また、有識者ヒアリングにおいて、積雪および融雪時期の重要性が指摘されていたが、融雪時期と積雪期間の間には強い相関がみられたため、積雪期間を説明変数とし、水分条件に関しては年降雨量を説明変数に含めた。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。

地質に関しては、産業総合技術研究所地質調査総合センターの20万分の1日本シームレス地質図および平成25年度大雪山国立公園整備計画策定等基礎調査業務報告書(2014)の資料4. 参考・表計算ソフトウェアファイル・登山道地点データの集計・凡例に基づき、表3.2.2.のように大雪国立公園内に含まれるシームレス地質図での地質凡例について、崩壊しやすさを整理し、非常に脆弱な地質および脆弱な地質が三次メッシュ内に占める割合を説明変数とした。超塩基性の地質は一般に植物の生育に大きく影響するとされるが、大雪国立公園内には該当する地質は含まれないので、説明変数としなかった。

表 3.2.2. 大雪山を構成する地質とその脆弱性

シームレス地質図凡例	崩壊しやすさ
チャートブロック, 付加コンプレックス	その他
メランジュ基質, 付加コンプレックス	その他
火山岩屑	非常に脆弱
花崗岩	脆弱
花崗閃緑岩	脆弱
苦鉄質火山岩類, 付加コンプレックス	脆弱
苦鉄質深成岩類	脆弱
珪長質火山岩, 非アルカリ貫入岩	その他
玄武岩ブロック, 付加コンプレックス	その他
湖水, 河川, 海など	その他
高位段丘堆積物	脆弱
砂岩優勢砂岩泥岩互層, 海成	脆弱
砂岩優勢砂岩泥岩互層, 付加コンプレックス	脆弱
湿地	その他
石灰岩ブロック, 付加コンプレックス	その他
扇状地, 地滑り, 崖錘堆積物	非常に脆弱
堆積岩類, 海成及び非海成層	脆弱
中位段丘堆積物	脆弱
超苦鉄質岩類	その他

低位段丘堆積物	脆弱
泥岩優勢砂岩泥岩互層. 付加コンプレックス	その他
非アルカリ火砕流堆積物	非常に脆弱
非アルカリ苦鉄質火山岩類	その他
非アルカリ珪長質火山岩類	その他

夏季の平均気温と積雪期間は交互作用がある可能性が考えられるので、これら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

気候変動に伴う将来分布予測では、不確実性が大きいことが多く、不確実性の大きさを考慮にいたった評価が欠かせない(Heikkinen et al. 2006; Lawler et al. 2006; Hulber et al. 2016)。不確実性を構成する要素として、将来の温室効果ガスの排出量、将来気候の予測の不確実性、将来の気候に基づいた生物の分布推定におけるモデリングに起因する不確実性、の3つがあげられる。

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 RandomForest (RF)、Boosted Regression Trees (BRT)、を用いた。GLM の誤差分布にはポアソン分布と tobit モデル、GAM はベータ分布および tobit モデルを用いた。

GLM では、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 で最適な推定値を得るためには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。

上記での2つのシナリオ、2時期、3つのGCM、6つの分布推定モデルに基づいて72の将来予測を行い、同じ時期・シナリオについて、予測値のGCMおよびモデル間の平均値・中央値・標準偏差を求めた。植生の分布予測に用いた将来の気候値を図3.2.1.に示す。

3.2.3 結果

いずれの植生タイプでも、夏季の平均気温および積雪期間が、分布決定に大きな影響を与えており、降雨量、地質、地形の寄与は限定的であった(図3.2.2.)

夏季の平均気温と積雪期間のいずれが重要であるかは、モデルによってばらついたが、これは、この2変数間で中程度の相関があるため、効果が完全には分離できなかったため

と考えられる。

雪田群落は、夏季の気温が特に低く、積雪期間が長い場所、高山低木群落も雪田群落に類似した条件、高山ハイデ及び風衝草原は夏季低温・長い積雪期間に加え、傾斜の急な条件を好む傾向が見られた。これらの植生タイプでは、積雪期間と夏季の気温の交互作用はあまり強くなかった。これに対し、ササ類は、積雪期間が長く、気温があまり低くない範囲に生育する傾向であった。積雪期間と夏季の気温の正の交互作用もあることから、気温が低すぎると生育確率が低下する。高標高のササと低標高のササは気温以外の説明変数については回帰係数がほとんど変わらなかったことから、気温によって棲み分けていると解釈された。

亜寒帯森林植生の分布に影響する要因は、積雪期間と夏季の気温の交互作用が大きく、気温が高く、かつ積雪期間が長い場所を選好していた。

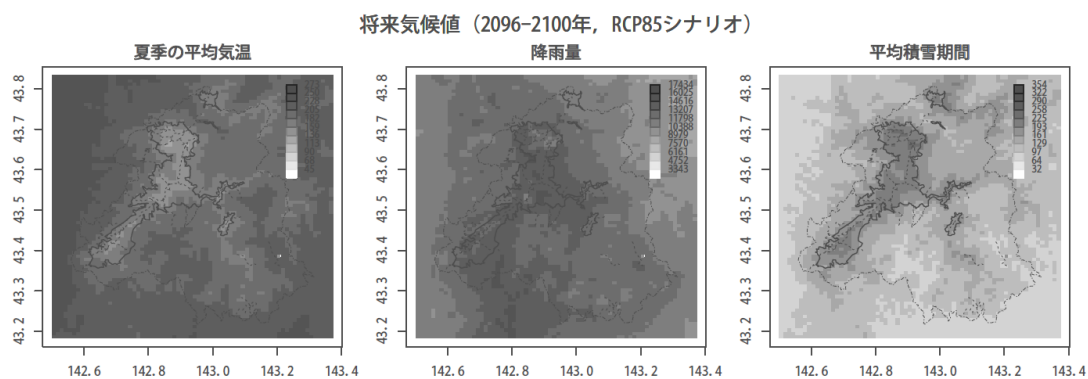
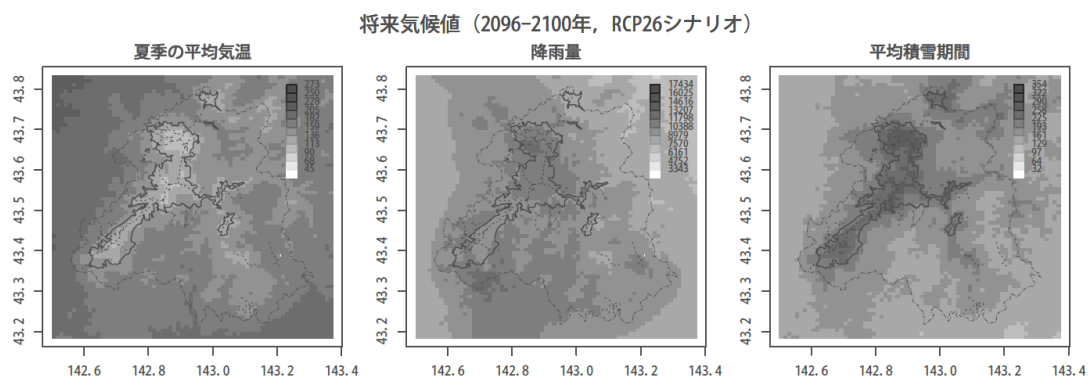
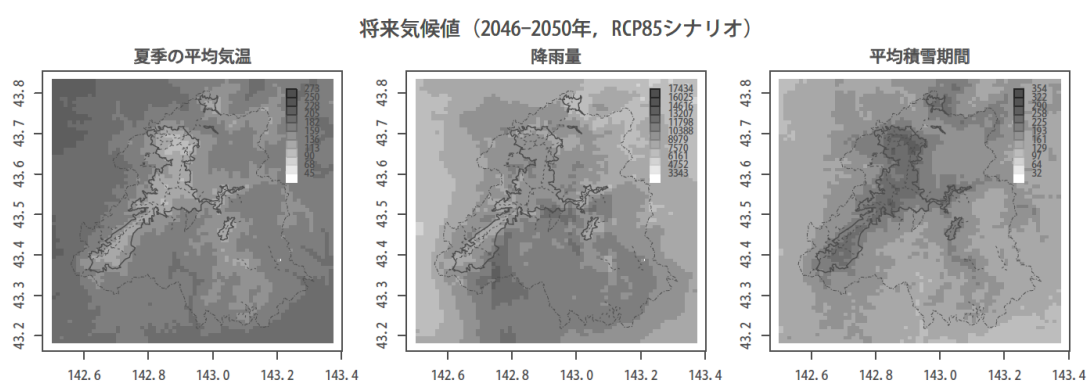
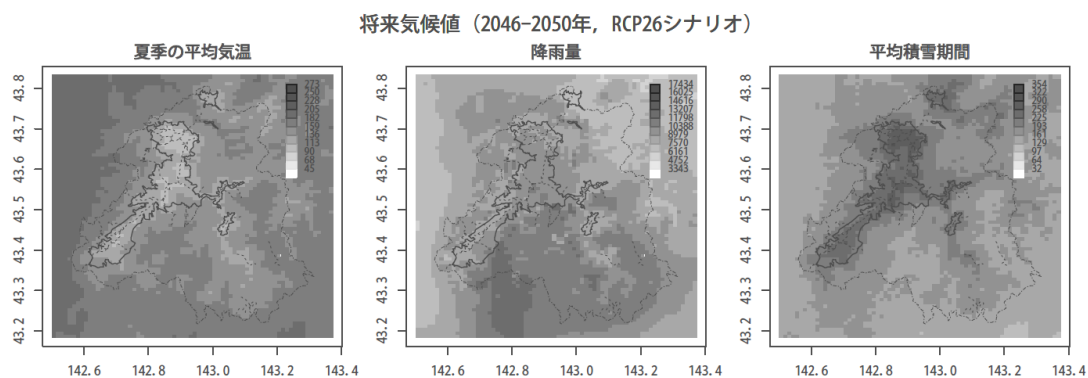


図 3.2.1. 植生の分布予測に用いた将来の気候値

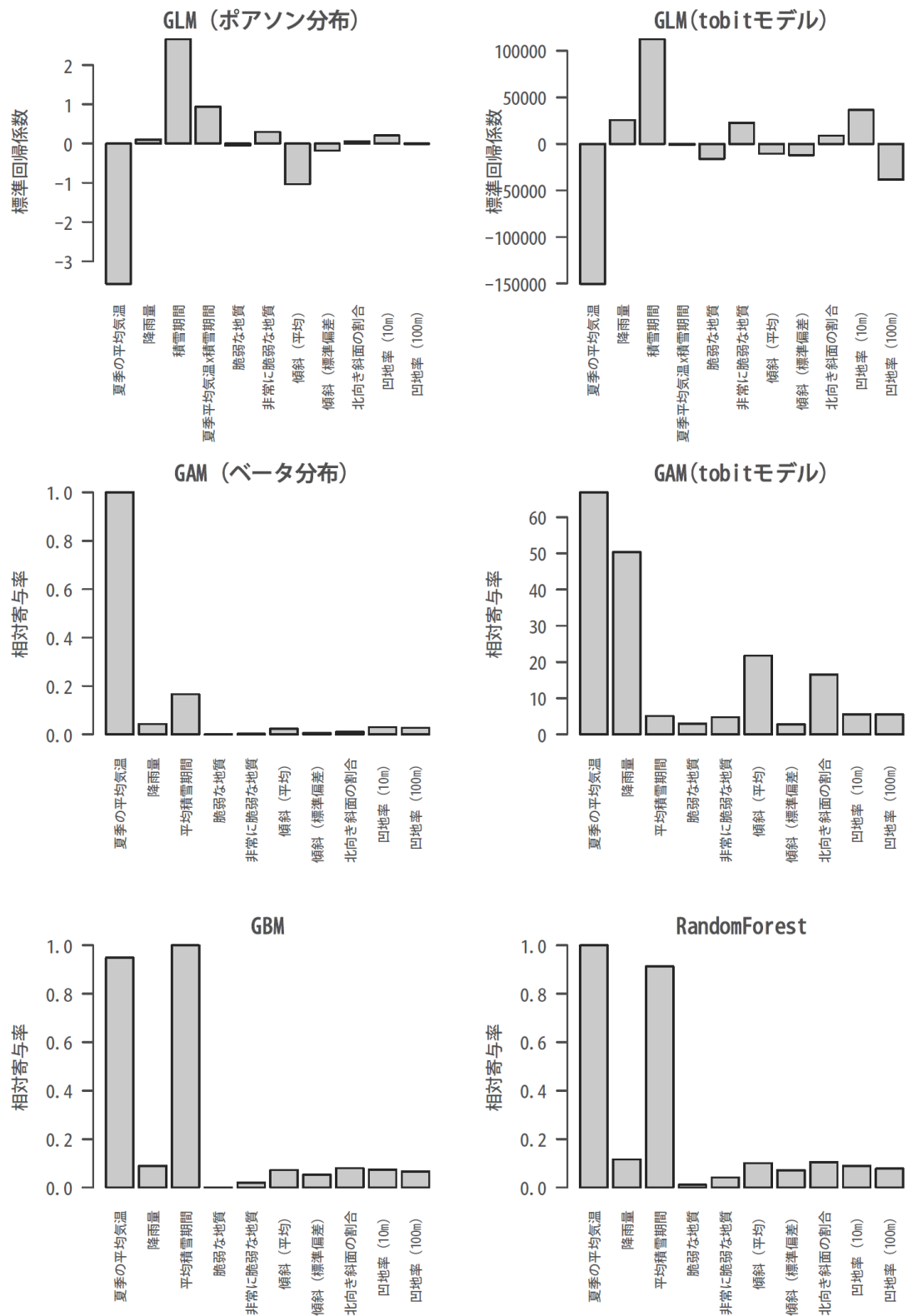


図 3.2.2 (a). 各統計モデルにおける、雪田群落の分布に対する各要因の寄与

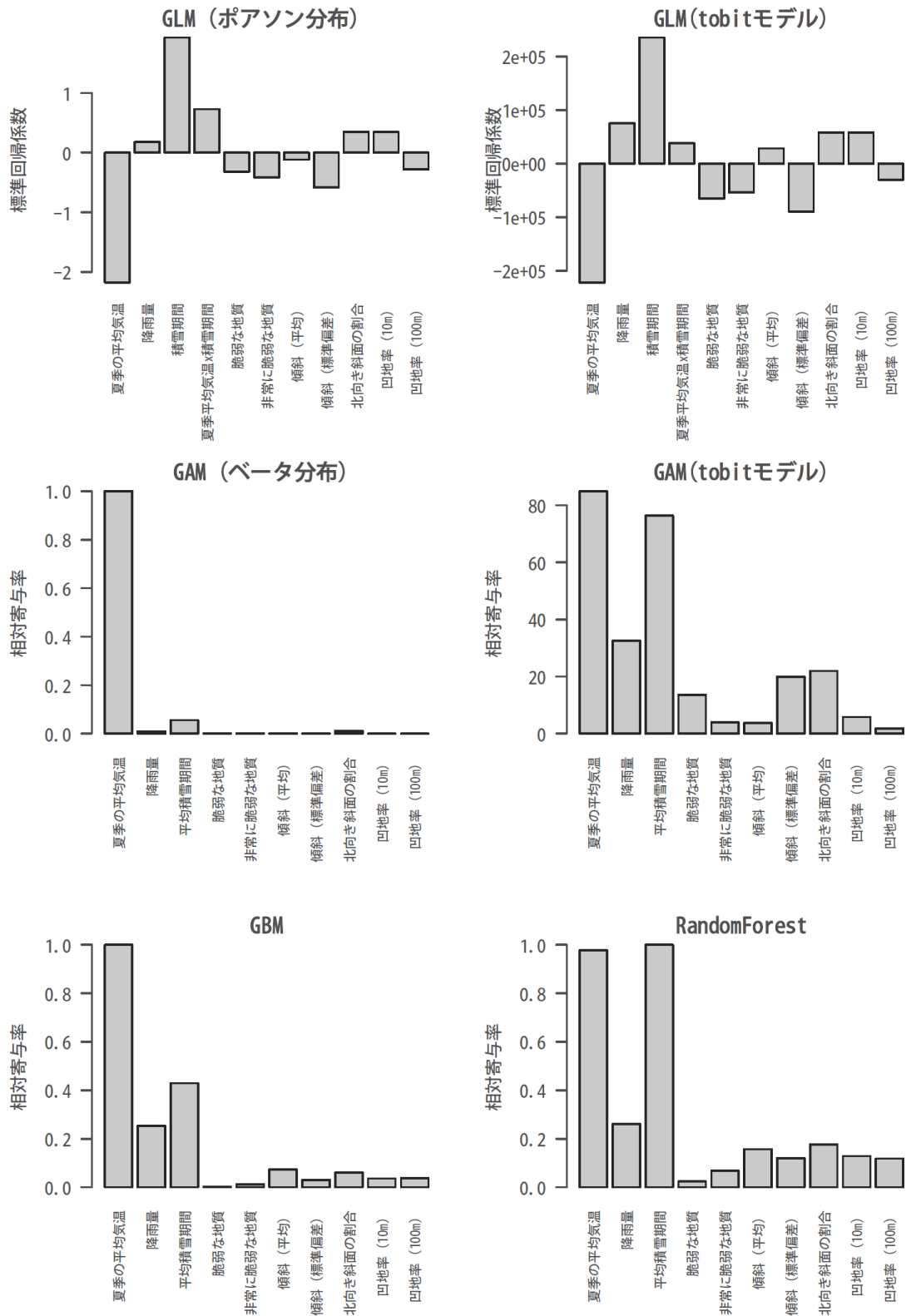


図 3. 2. 2 (b). 各統計モデルにおける、高山低木群落の分布に対する各要因の寄与

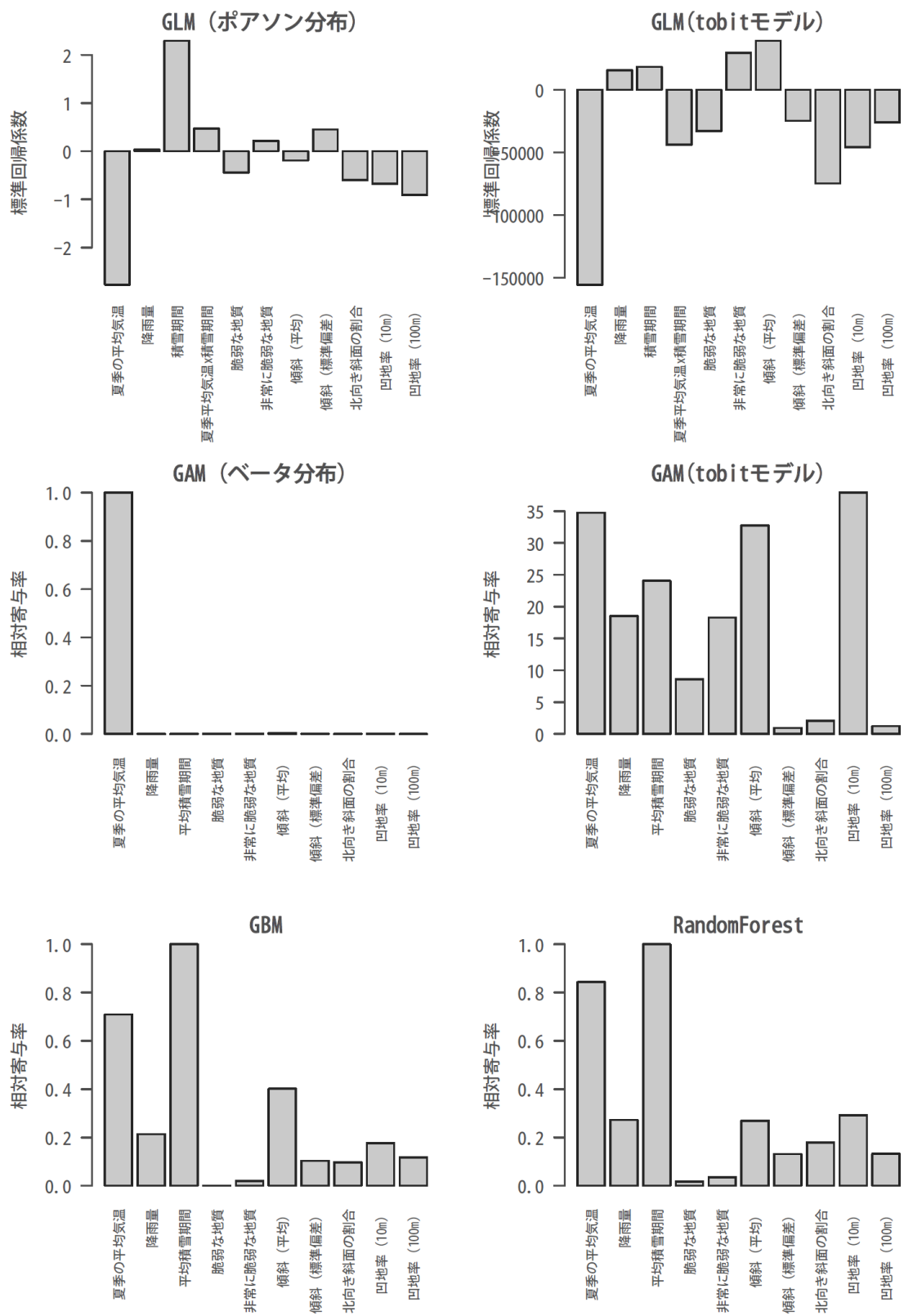


図 3. 2. 2 (c). 各統計モデルにおける高山ハイデ及び風衝草原の分布に対する各要因の寄与

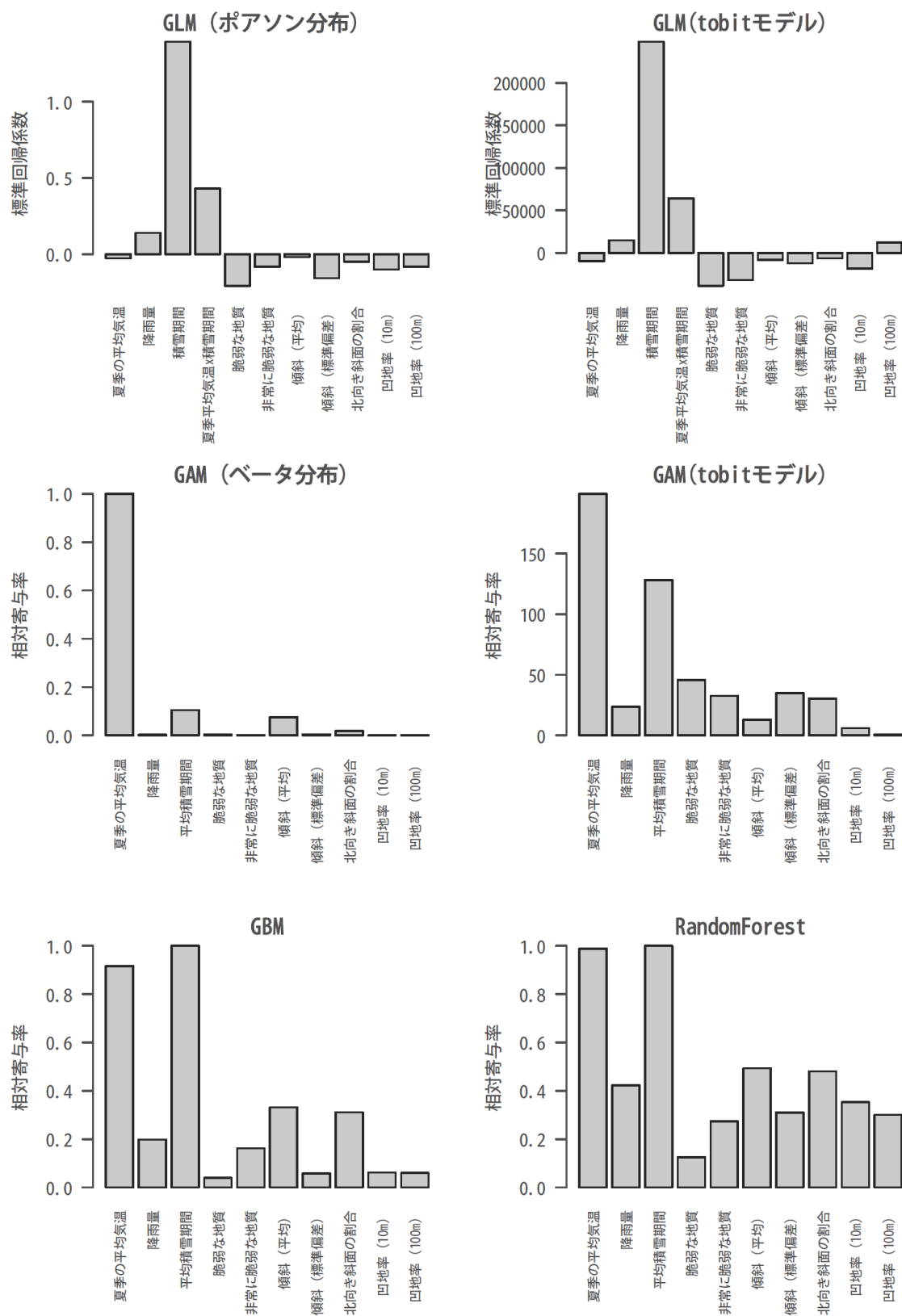


図 3. 2. 2 (d). 各統計モデルにおける低標高ササの分布に対する各要因の寄与

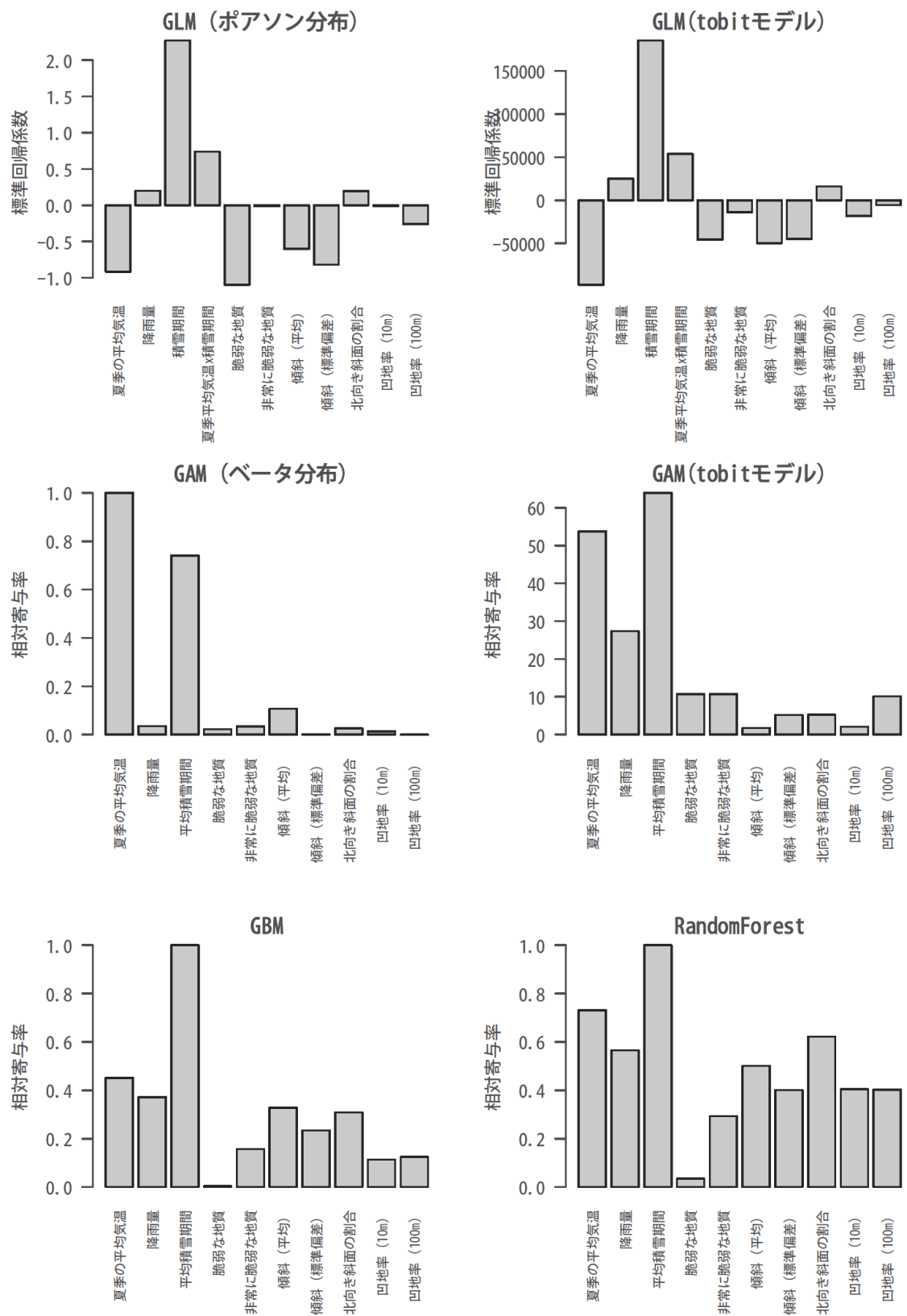


図 3. 2. 2 (e). 各統計モデルにおける、高標高ササの分布に対する各要因の寄与

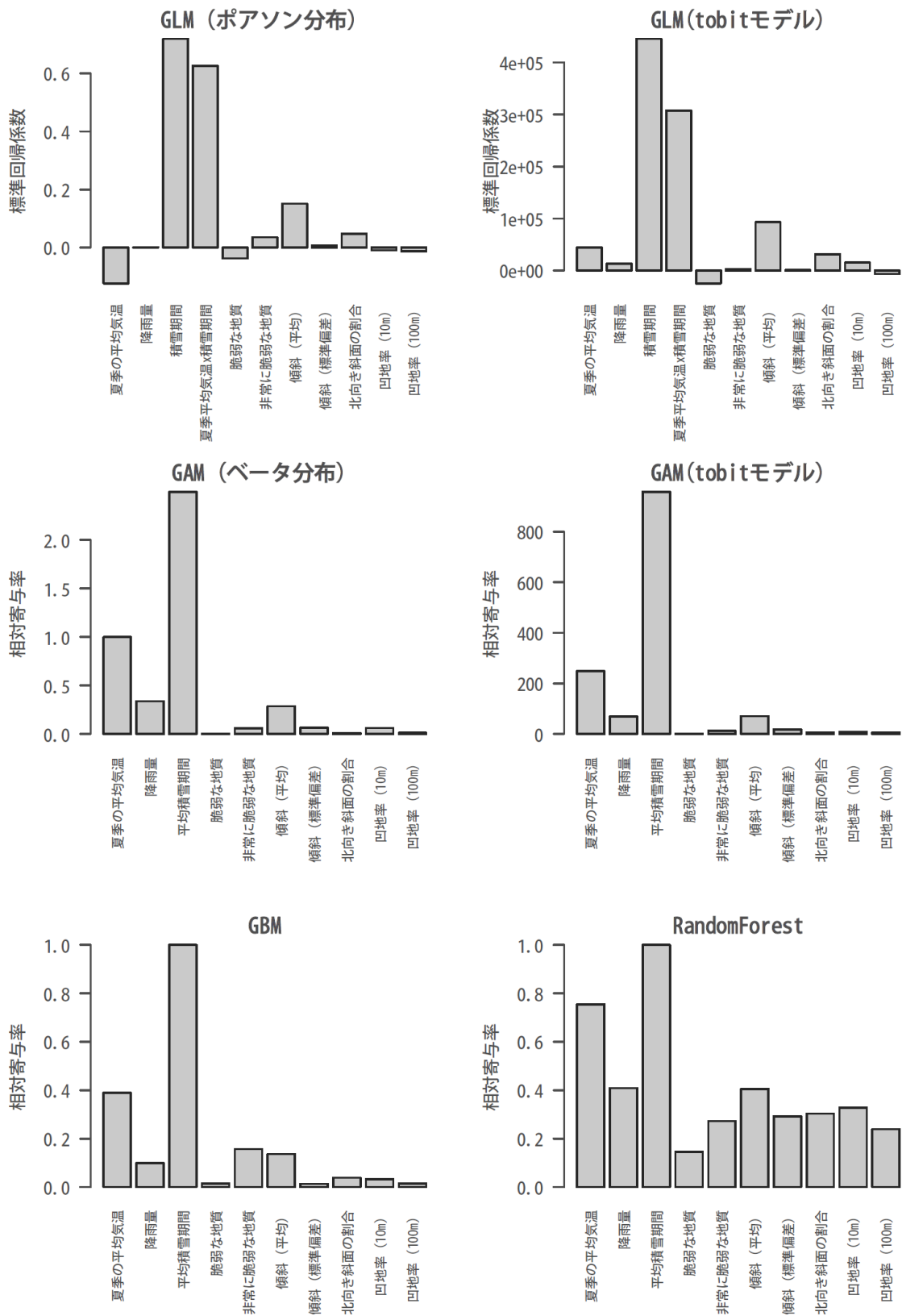


図 3. 2. 2(f). 各統計モデルにおける、亜高山帯森林植生の分布に対する各要因の寄与

雪田草原、高山低木群落、高山ハイデ及び風衝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、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（図 3.2.3.）。ササ群落（高標高・低標高）および亜高山帯森林植生の分布については、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ササ群落では 15～40%、亜高山帯森林植生では 20～30%の説明力に留まった。

将来の平均的な気候条件における各植生タイプの分布予測については、以下のとおりの結果だった。RCP2.6 での 2046～2050 年および 2096～2100 年の気候条件においては、雪田草原、高山ハイデおよび風衝草原、高山低木群落については、分布面積がかなり減少するものの、比較的広い範囲に生育可能な条件が残ると予測された（図 3.2.4.）。これに対して、RCP8.5 では、2046～2050 年の平均的な気候条件においては、雪田草原および高山低木群落はわずかに生育可能な条件が残るものの、高山ハイデは生育可能な条件がほとんどなく、2096～2100 年の平均的気候においては、高山植生はいずれも残らないという推定結果となった。高山植生に侵入し、その減少要因となる可能性が指摘されているササ群落についても、RCP8.5 ではほとんど残らず、亜高山帯森林群落が優占するという推定結果となった。いずれの植生タイプについても、GCM および分布推定モデル間の違いは比較的小さかった（図 3.2.5.）。

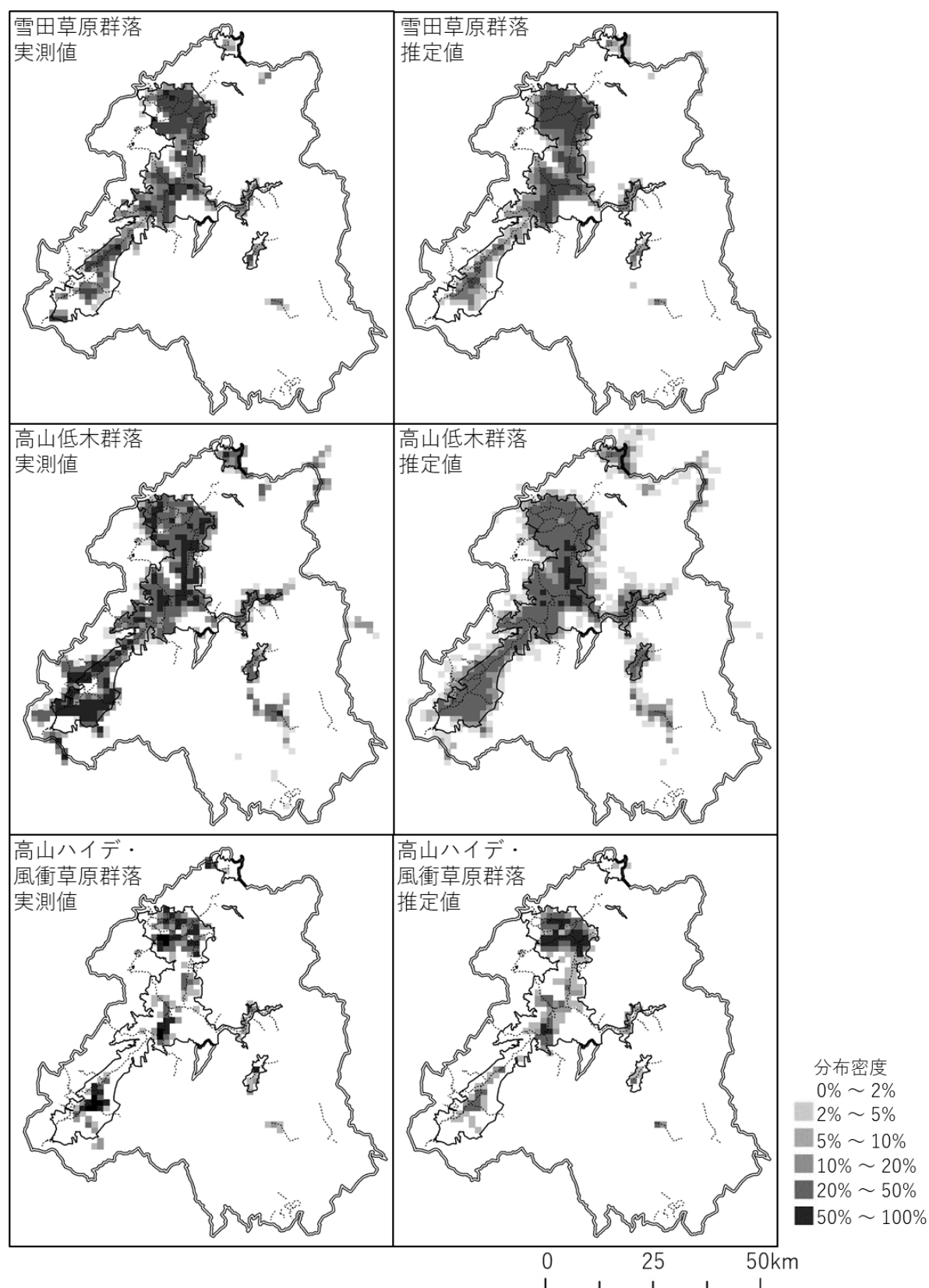
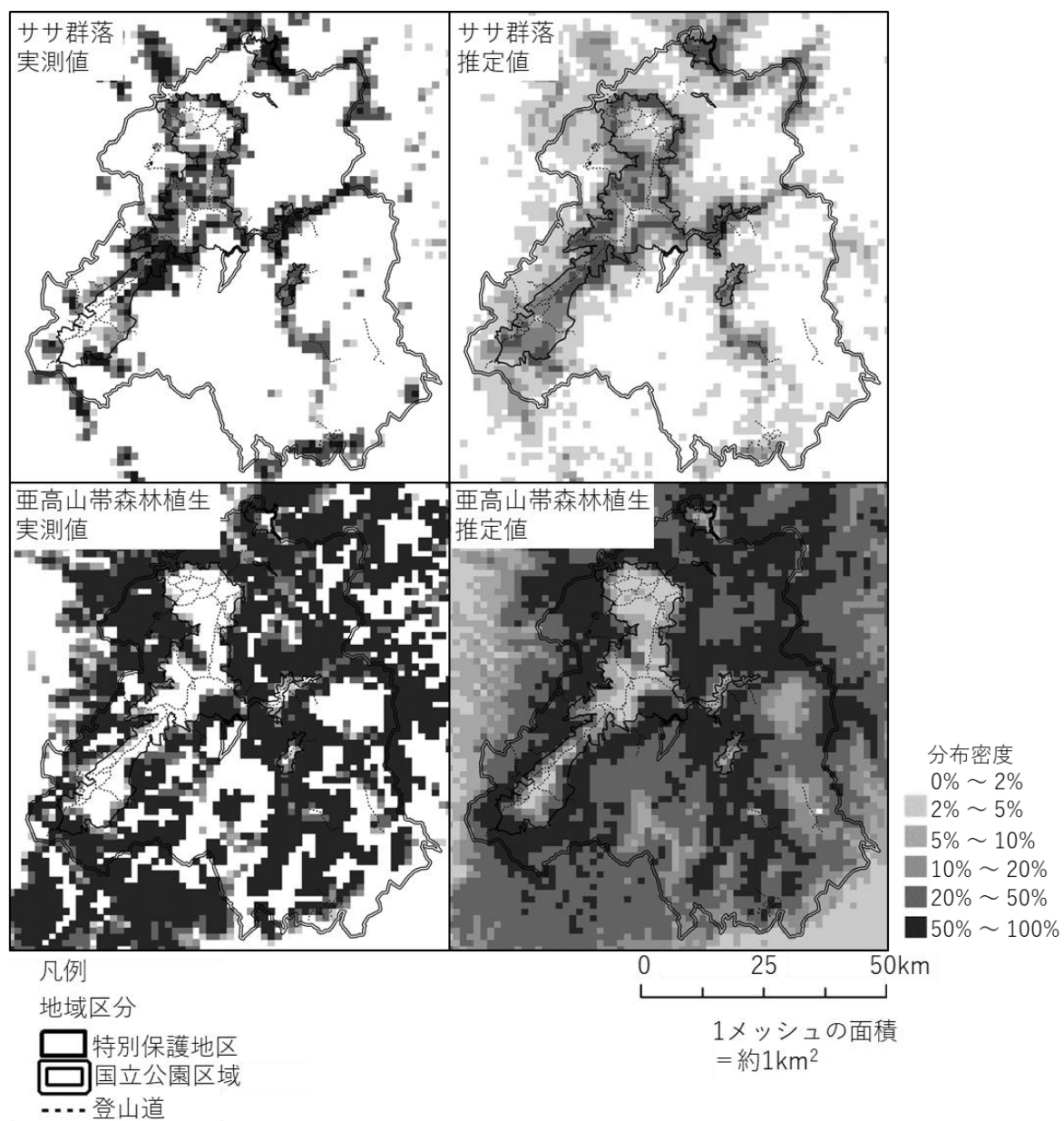


図 3. 2. 3. 各植生の分布密度の実測値とモデル推定値の比較図



3.2.3. 各植生の分布密度の実測値とモデル推定値の比較 (つづき)

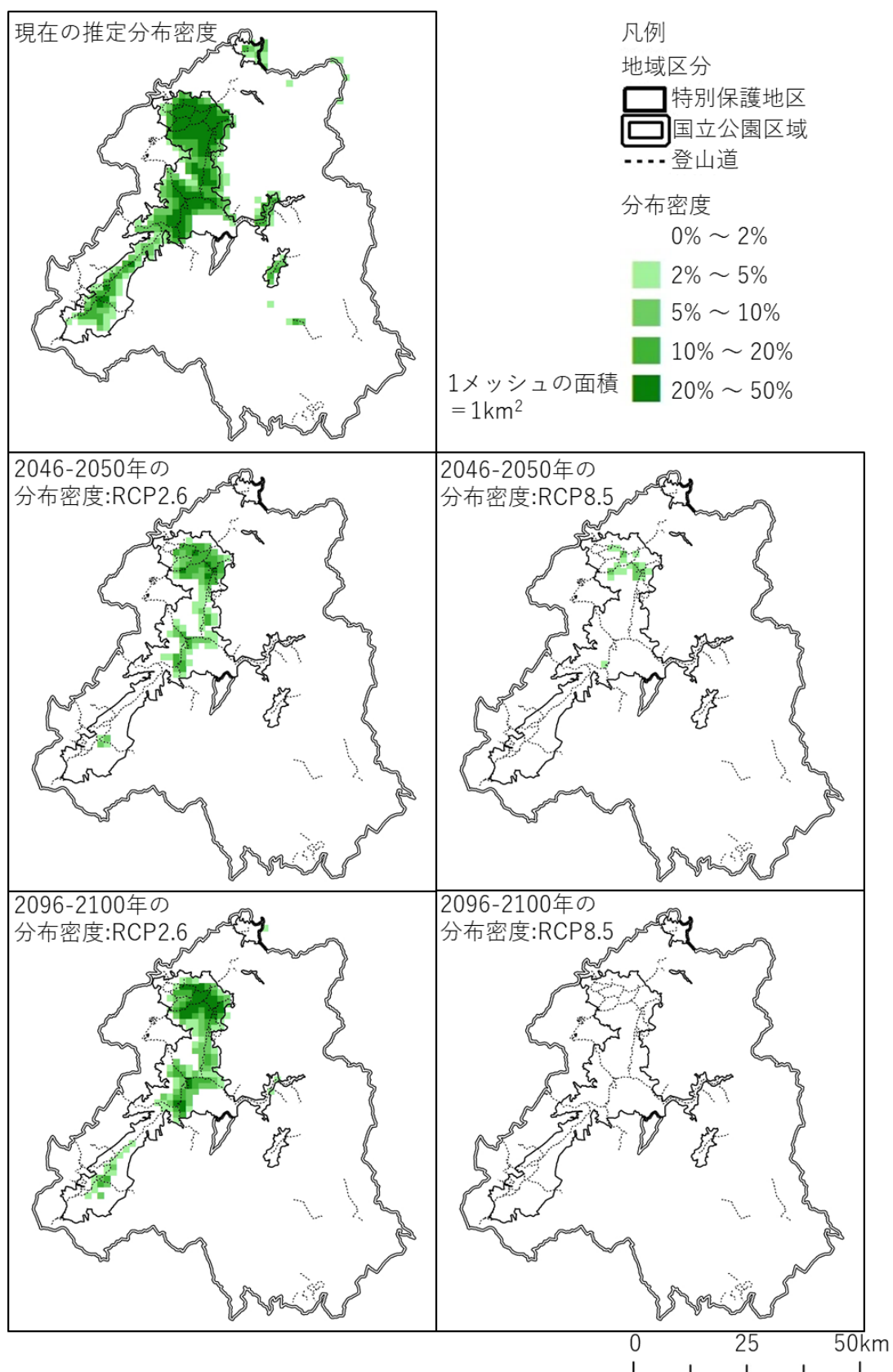


図 3. 2. 4(a). 雪田草原群落の現在と将来の分布密度（統計モデル間の平均値）

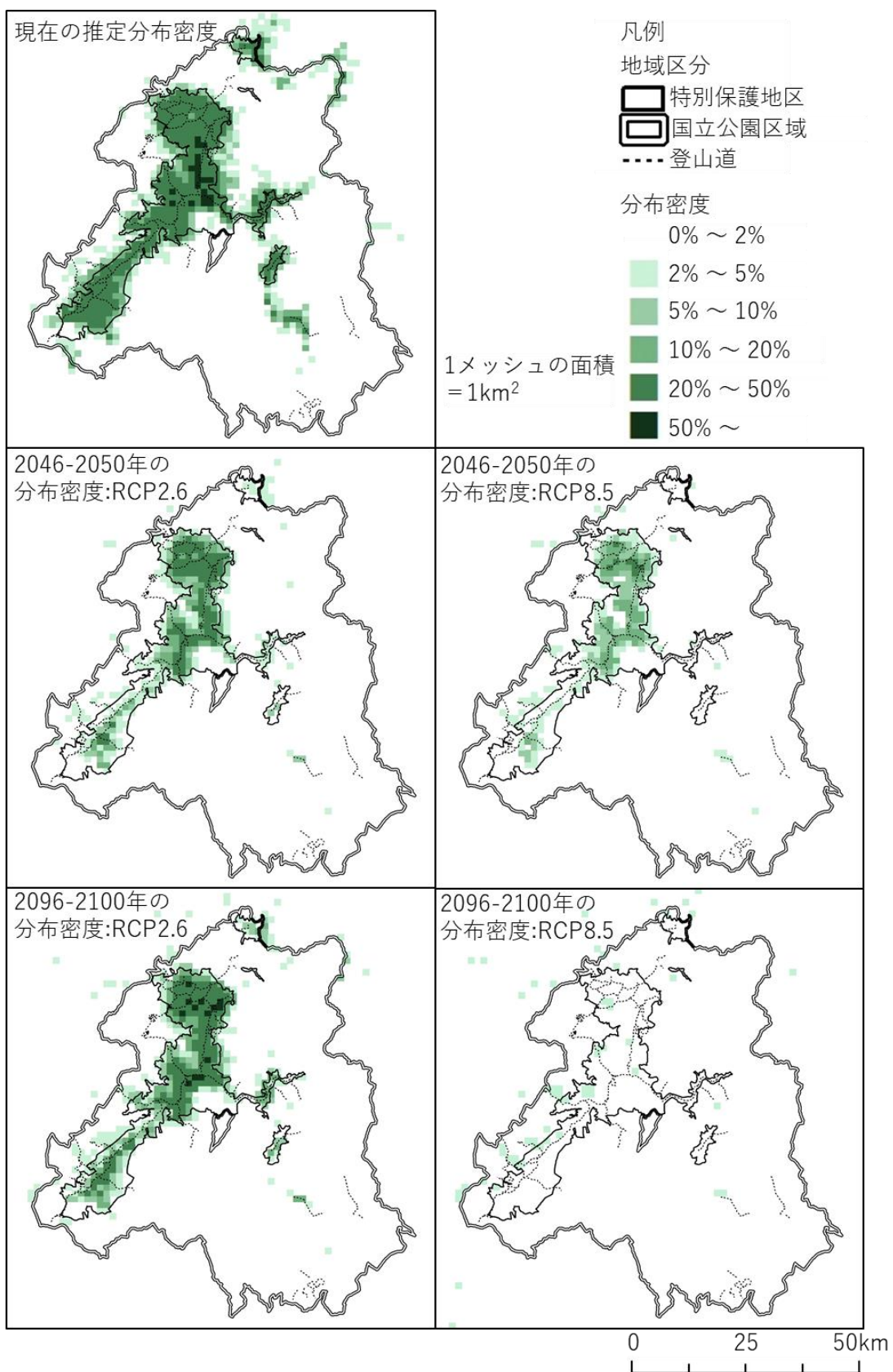


図 3. 2. 4 (b). 高山低木群落の現在と将来の分布密度（統計モデル間の平均値）

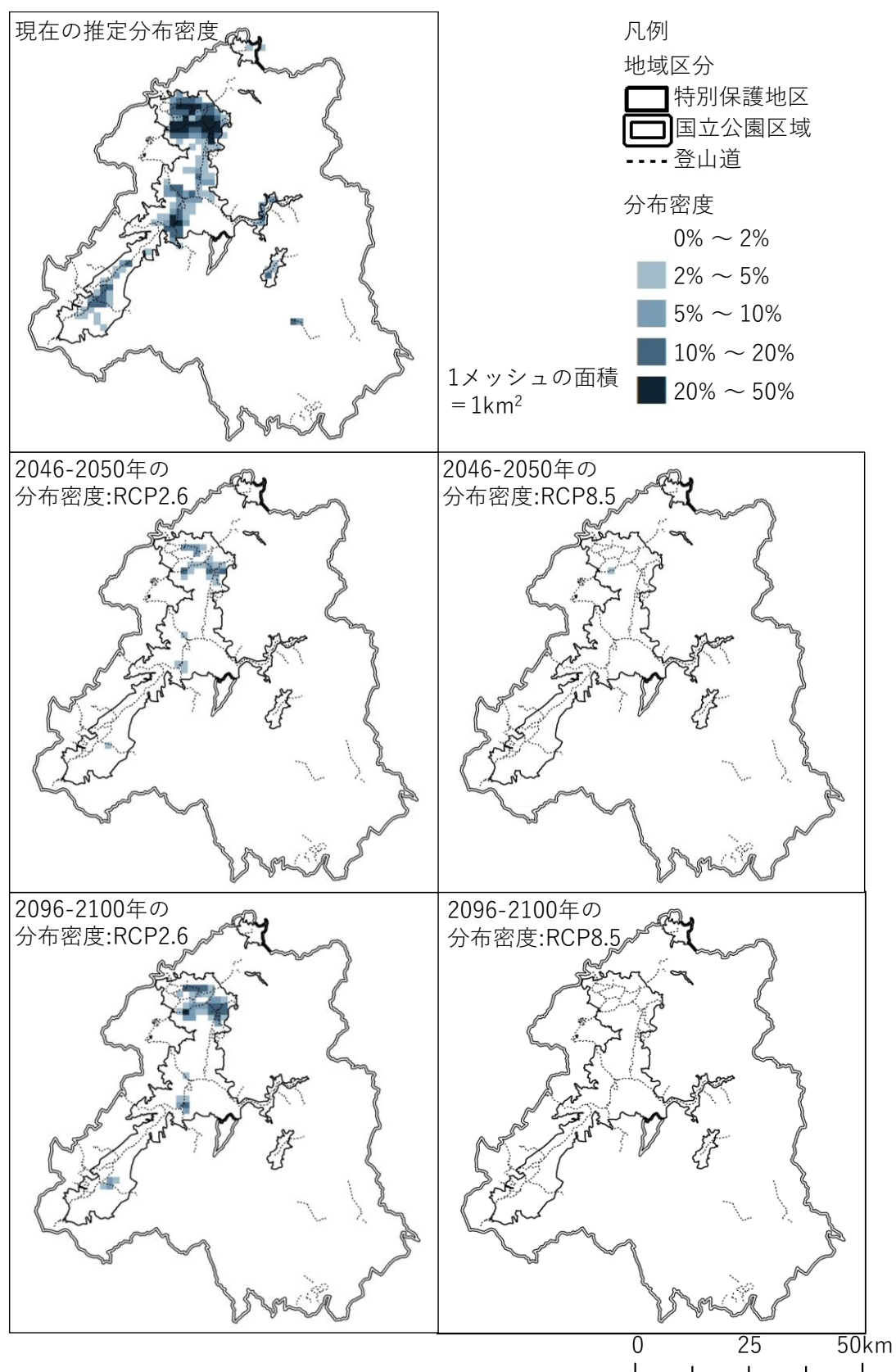


図 3. 2. 4(c). 高山ハイデ及び風衝草原の現在と将来の分布密度（統計モデル間の平均値）

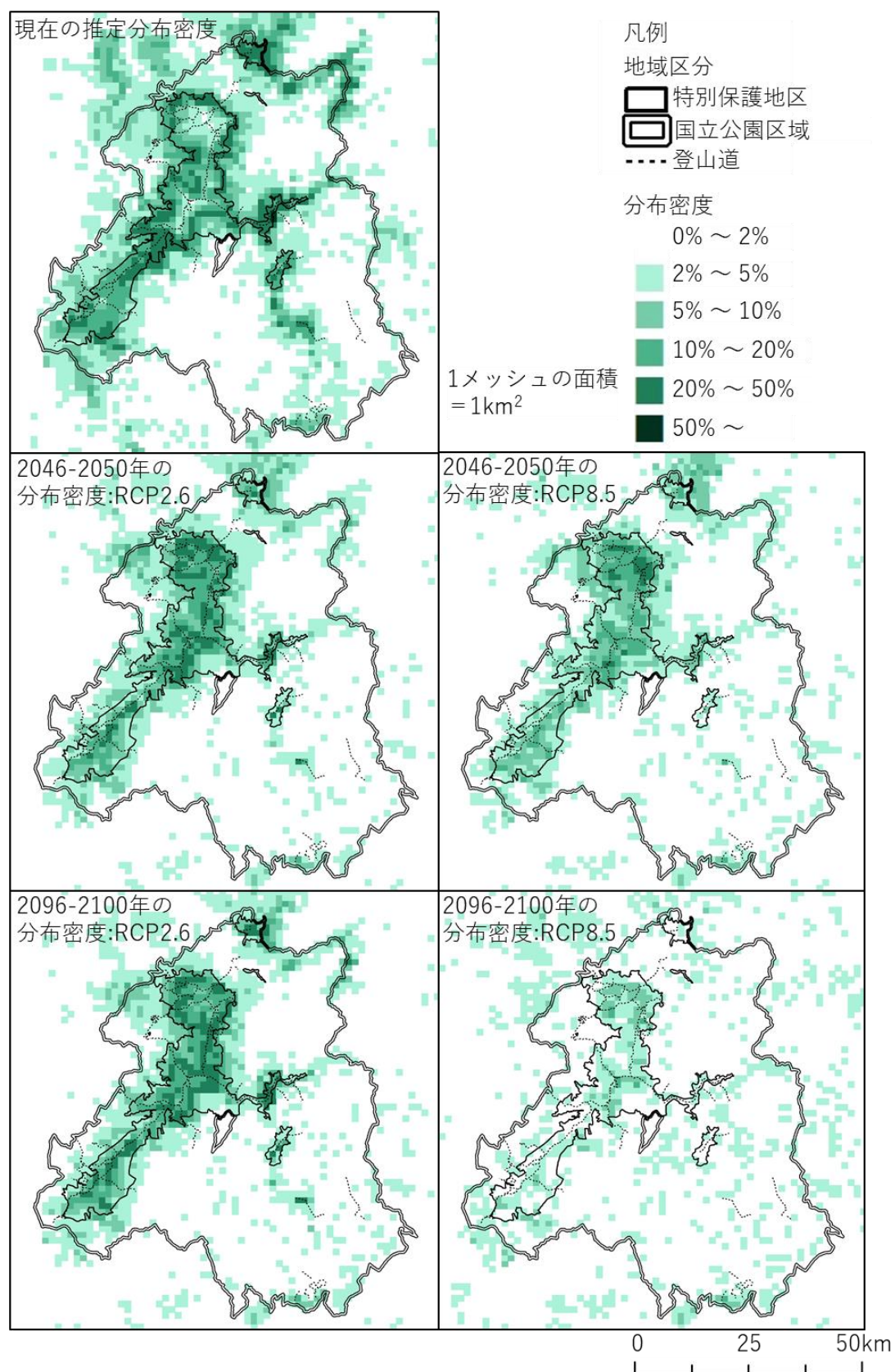


図 3. 2. 4(d). ササ群落の現在と将来の分布密度（統計モデル間の平均値）

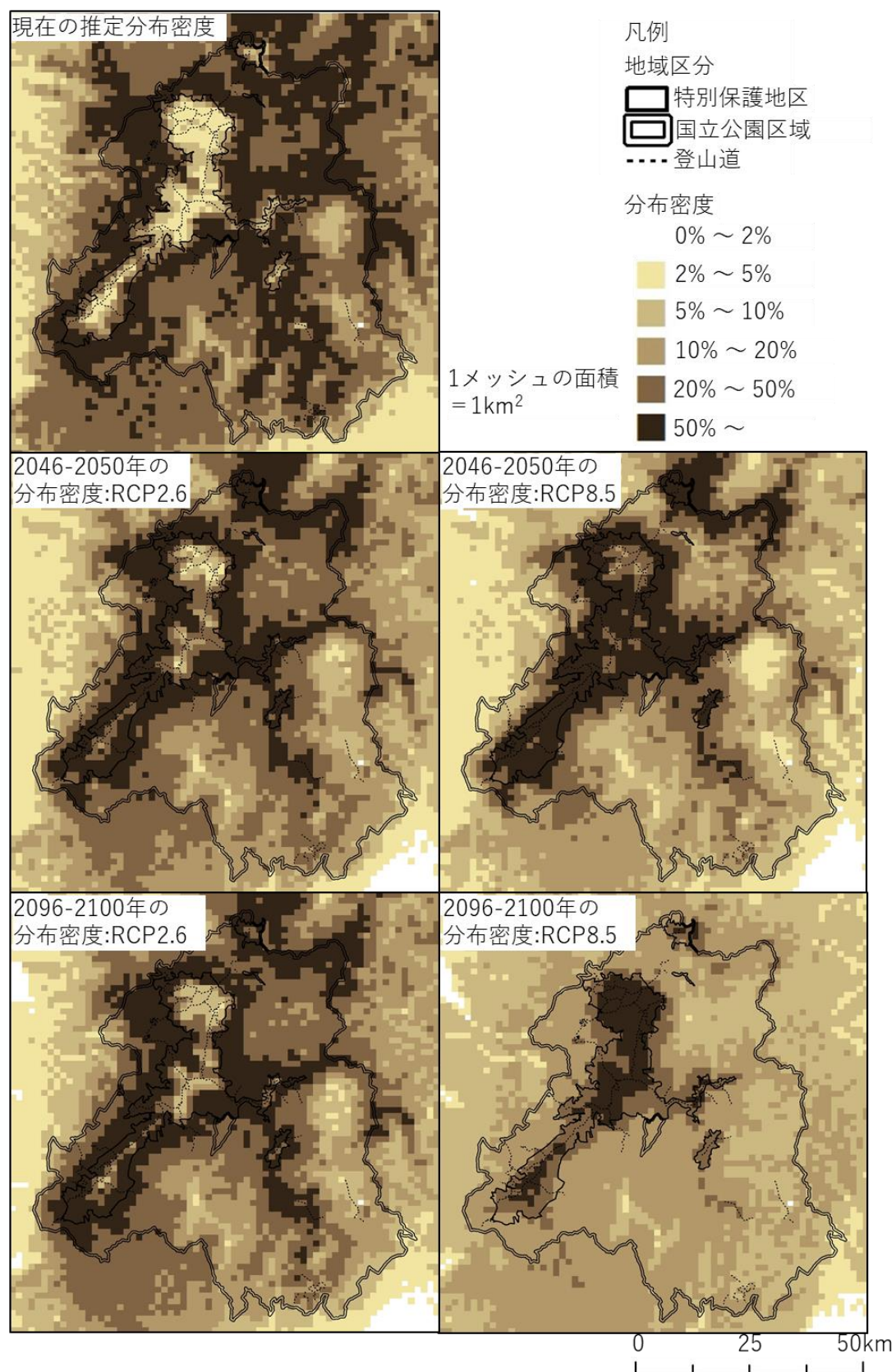


図 3. 2. 4(e). 亜高山帯森林植生の現在と将来の分布密度（統計モデル間の平均値）

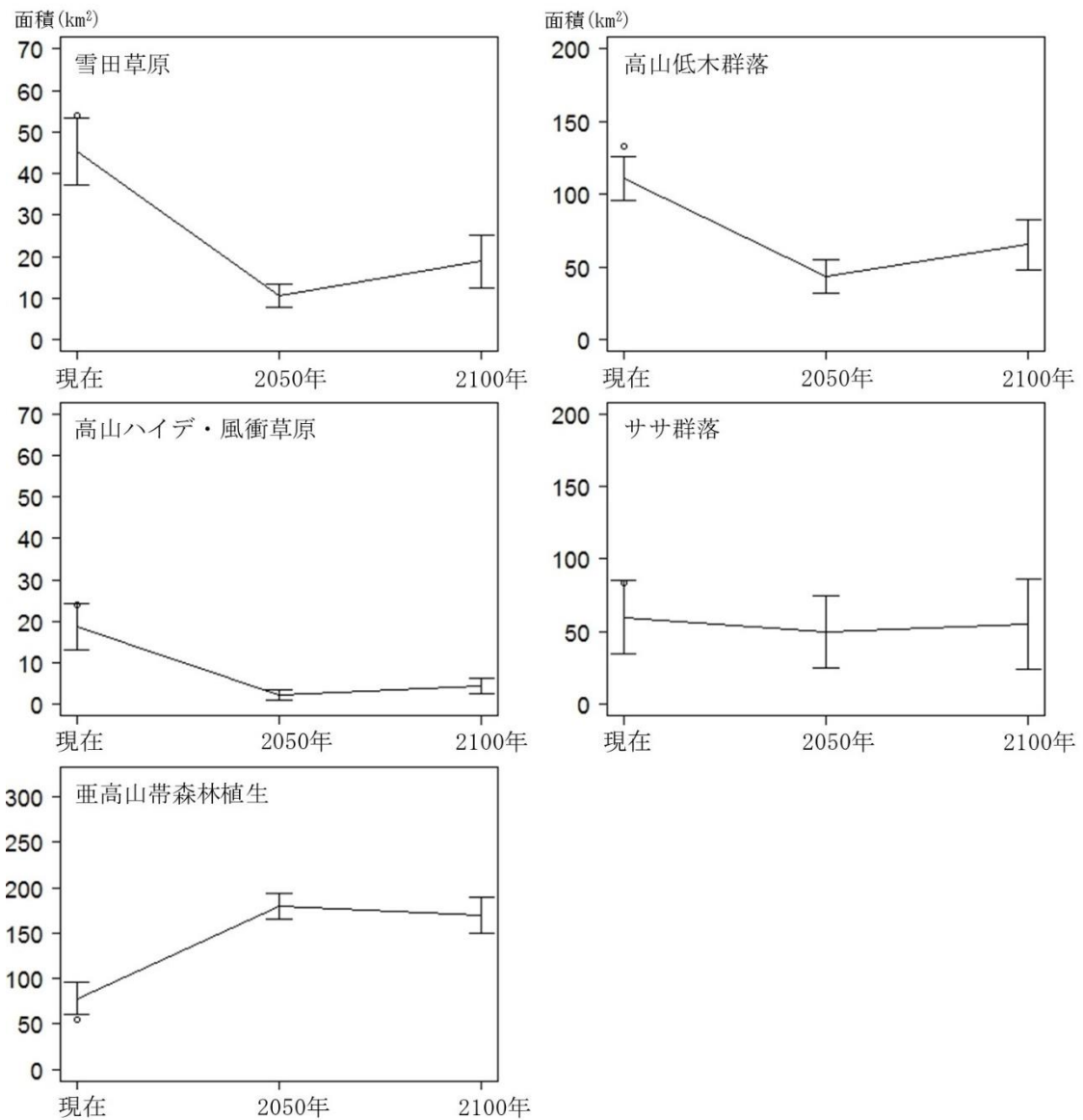


図 3.2.5(a). 特別保護地区内における各植生タイプの推定面積。将来シナリオは RCP2.6、値は三つの気候モデル (MIROC5、MRI- CGCM3、IPSL-CMA5A-LR)、および六つの分布推定モデルの間の平均値 (エラーバーは SD)

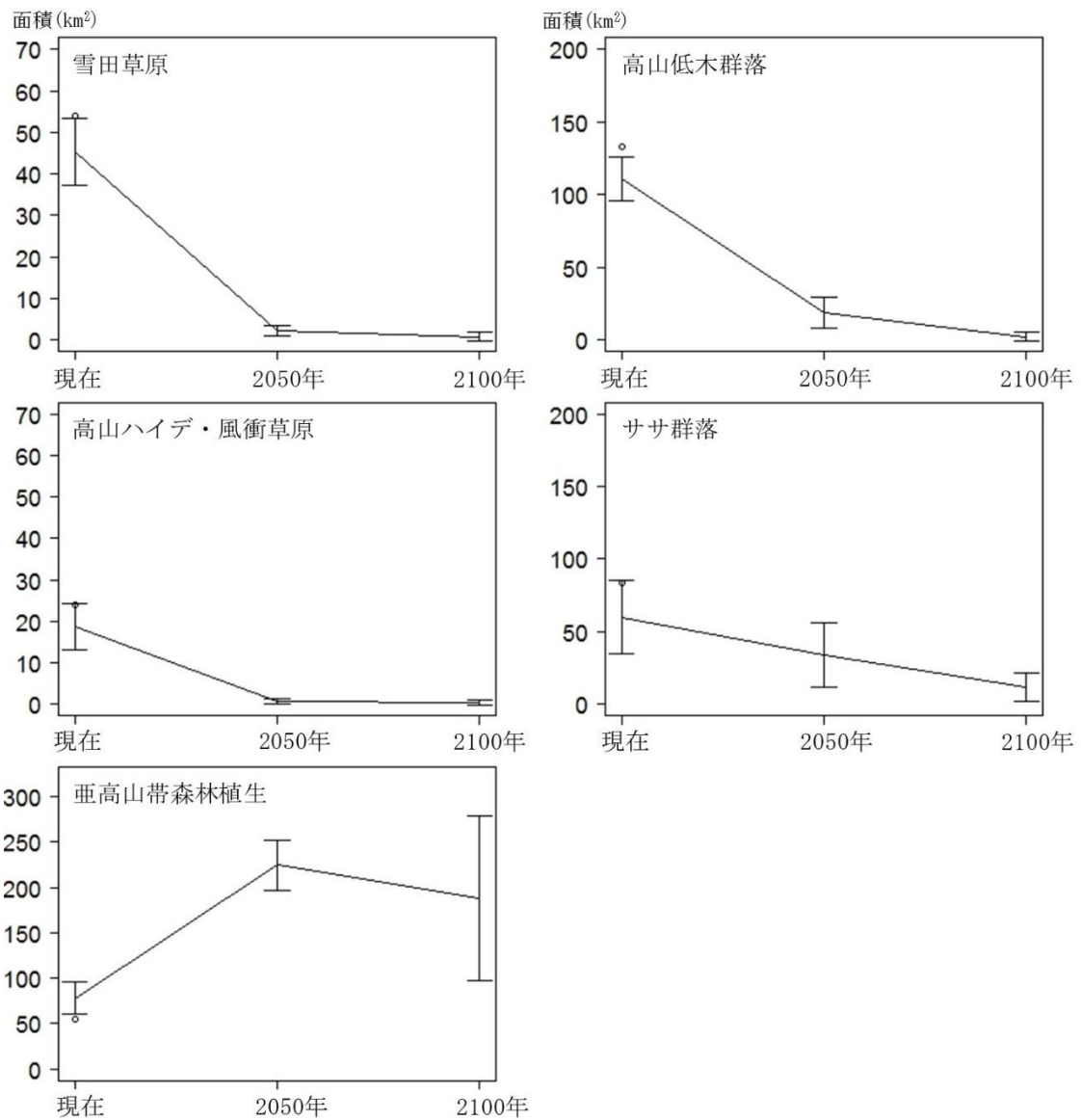


図 3.2.5(b). 特別保護地区内における各植生タイプの推定面積。将来シナリオは RCP8.5、値は三つの気候モデル (MIROC5、MRI-CGCM3、IPSL-CMA5A-LR)、および六つの分布推定モデルの間の平均値 (エラーバーは SD)

3.2.4 考察

将来シナリオの RCP2.6 と 8.5 について 3 つの気候モデル、6 つの分布推定手法を用い、将来の 2 時期について、大雪山の植生分布予測を行った結果、シナリオ間での結果の違いは大きく、RCP2.6 ではいずれの年代でも雪田草原、高山ハイデおよび風衝草原、高山低木群落（以降、高山植生と総称する）が面積を減らしつつも、比較的広い範囲に生育可能であると予測されたのに対し、RCP8.5 では、2096～2100 年には高山植生は亜高山帯森林群落に入れ替わる予測となった。RCP8.5 での予測結果は、現在に比べ 4 度近い平均気温の上昇および積雪期間の半減など大きな気候変化に伴うものと考えられ、気候変化の大きさから考えれば、妥当な予測と考えられた。

その一方で、今回用いた分布推定モデルでは、移動分散制限や種間競争を考慮していないという課題がある。現実にはササ群落や森林植生が現在の高山植生帯に侵入するまでには、地下茎の伸長、種子散布、稚樹の定着・成長などのプロセスがあり、実際の変化は、今回の予測結果よりも時間遅れを伴う可能性が高い。これらのプロセスに掛かる時間を推定するためには、伸長速度や散布距離を考慮したモデルが必要である。

また、今回の推定では種間競争を考慮していないため、高山植生が気候や地質条件的に生育できる範囲を過小推定している可能性がある(図 3.2.6.)。

更に、気候変動予測、特に積雪に関して、空間解像度の制約から、今回の分析では小規模な逃避地を見逃している可能性がある。今回の分析では 3 次メッシュ（約 1 km×1 km）の解像度の気温・積雪期間のデータを説明変数としてもちいたが、現実の積雪範囲は 1km×1 km のメッシュの中でも不均一であり、この空間スケールよりも小さい規模の逃避地を特定することが出来ない。

これらの、RCP 間の結果の違いの大きさや、分布推定モデルおよび GCM の空間解像度等の制約に起因する不確実性を考慮し、脆弱な環境として抽出された場所でのモニタリングの強化、モニタリング結果を踏まえた予測技術の高精度化、対策効果の評価と改善を循環させる順応的管理の概念に基づいた適応策の検討を行うことが望ましいと考えられる。

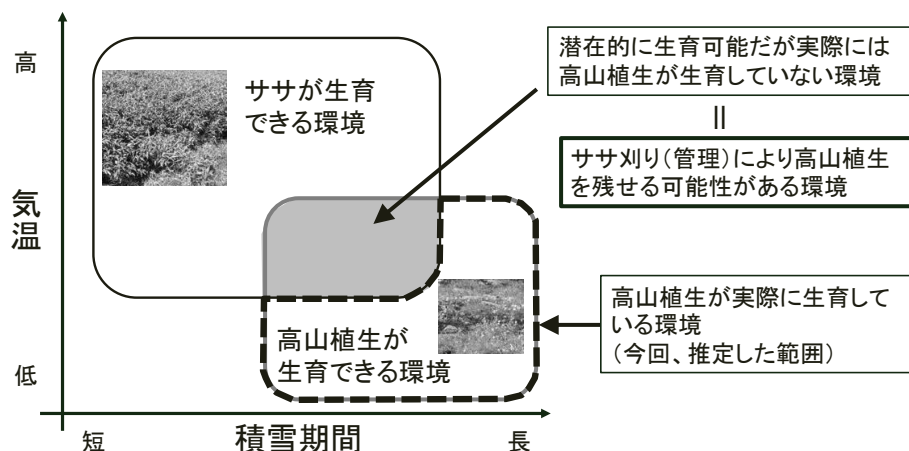


図 3.2.6. 種間競争を考慮しないことに伴う高山植生が生育できる環境の過小評価

3.3 大雪山国立公園における紅葉の将来予測

3.3.1 目的

大雪山国立公園では、秋の紅葉景観は重要な観光資源となっている。この紅葉景観における将来変化を評価するため、紅葉の(1)色づき、(2)開始日、(3)最盛日、(4)終了日、に関して現在の気候条件との関係をモデリングし、将来気候下における紅葉景観の質や期間の変化を予測した。

3.3.2 方法

解析の概要は図 3.3.1. に示した通りである。紅葉の時間変化を抽出するため、国内3箇所における高山帯域での定点カメラデータを用いた。カメラデータに対応した現地気候値を用いて、紅葉の各要素を説明する統計モデルを構築した。構築したモデルと、現在・将来における大雪山域のメッシュ気候値を用いて紅葉の各要素に対してポテンシャルマップと潜在的な将来気候下での変化量マップを作成し、紅葉の将来変化を予測した。

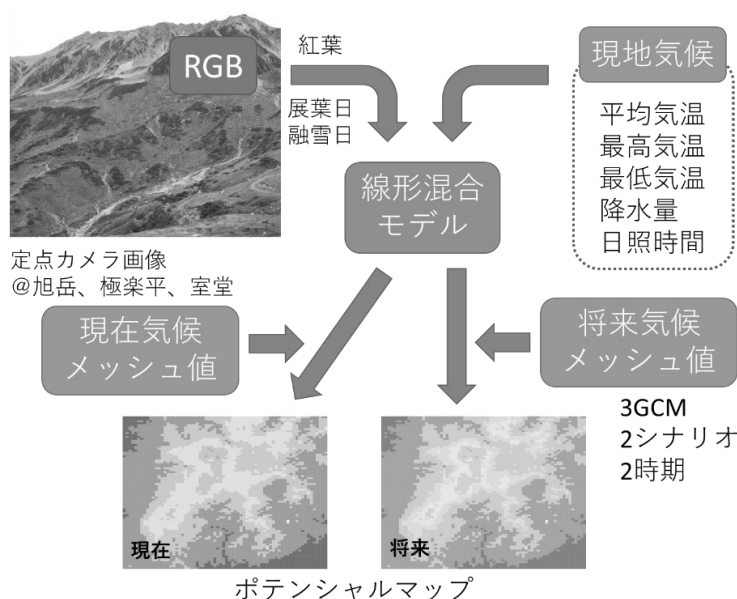


図 3.3.1. 紅葉のモデリングおよび将来変化予測のフローチャート

● 定点カメラ画像データ

インターネット自然研究所及び国立環境研究所高山帯モニタリングによる国内3カ所の高山帯における定点カメラ観測データを用いて(図 3.3.2.)、紅葉の時間変化を画像から抽出した。いずれの調査地においても紅葉する箇所は高山帯域のナナカマド類(ウラジロナナカマド、タカネナナカマドなど)が分布している。旭岳における観測は、2012年から画像の蓄積があるものの、2015年までの画像では全体に紫がかかった色調で紅葉の解析に問題

が生じる可能性があったため、2016 年 6 月にカメラを交換した後の 2016～2017 年における観測データを使用した。大雪山地域のみでは定点カメラ画像データの蓄積が少なすぎたため、北アルプスの立山室堂、中央アルプスの極楽平サイトにおける画像データを加えて解析を行った。解析の際は、紅葉が色づく 9 月から 10 月の画像データを使用した。詳細なカメラ観測サイトの情報を表 3.3.1. に示す。

定点カメラ画像の撮影範囲内で、代表的な個体・個体群を選出し、それらが写っている領域（AOI: Area of Interest）における RGB 画素値を抽出した。解析対象とした AOI は画像の撮影範囲の違いを考慮して、旭岳では 5 箇所、極楽平、室堂では 10 箇所を選出した。

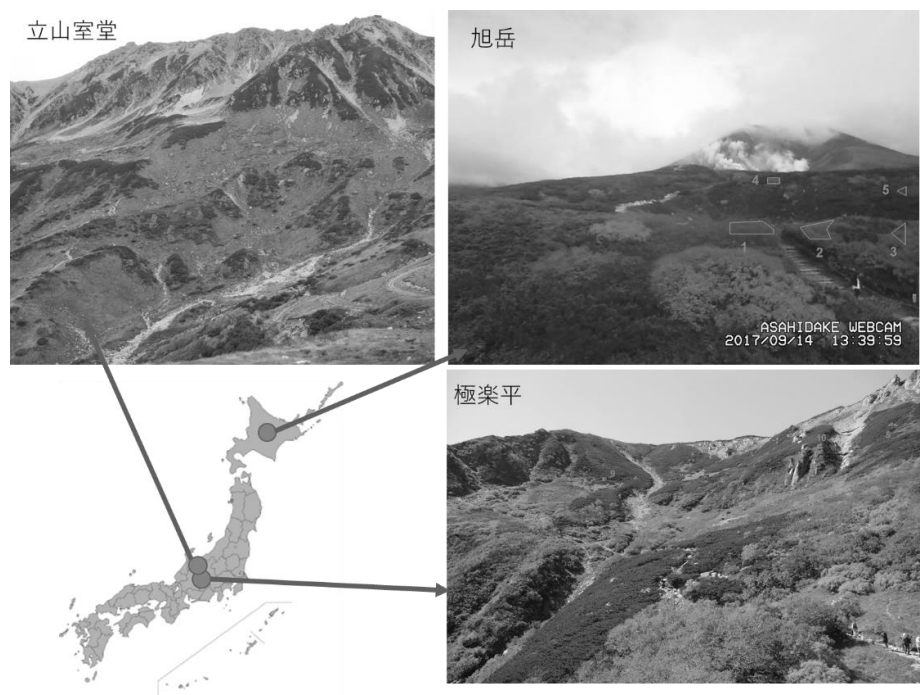


図 3.3.2. 定点カメラ画像サイト 3 地点の位置およびその撮影画像

表 3.3.1. 定点カメラ撮影サイトの一覧表

	旭岳	極楽平	室堂
緯度	43度39分43.72秒	35度46分39秒	36度34分40秒
経度	142度49分31.05秒	137度48分47秒	137度36分04秒
標高 [m]	1600	2700	2450
解析年	2016-2017	2013-2016	2011-2016
撮影頻度	1時間	1時間	1時間
データサイト	http://www.sizenken.biodic.go.jp/view.php?camera_no=108	http://db.cger.nies.go.jp/gem/ja/mountain/station.html?id=7	http://db.cger.nies.go.jp/gem/ja/mountain/station.html?id=2

● 現在気候データ

紅葉の変化と対応づけるため、定点観察カメラサイトにおける月別の気象データを用意した。極楽平の気象観測データは信州大学から、室堂における気象観測データは立山室堂山荘からそれぞれ提供を受けた。また旭岳では高山域における気象観測データは確認できなかったため、最寄りの気象庁による観測所である志比内における観測データを用いた。

解析に用いた気象データは、月平均気温、月最高気温、月最低気温、月降水量、月日照時間の 5 種類を使用した。このうち気温の変数に関しては、気温の逓減率を用いて標高の違いによる気温の変化を補正している。

後述する紅葉推定モデルを用いて現在における紅葉の空間変化を推定するため、メッシュ気候値 2010 から各気候値の 1km メッシュ解像度での空間分布データを用意した。なおこのデータセットでは、1981～2010 年の 30 年間ににおける平年値としての気候値が収録されている。これは AMeDAS の観測所において観測された平年値を、1km メッシュの解像度に対して統計的に空間内挿を行ったデータである。

● 将来気候データ

将来における気候データとして、3 GCM (MIROC5、MRI-CGCM3、IPSL-CM5A-LR)、2 シナリオ (RCP 2.6、8.5)、2 時期 (2031～2050 年、2081～2100 年) の 1km メッシュ気候値を用意した。各気候値は統計的に空間内挿を行い、現在気候値を用いてバイアス補正を行った。ちなみに日照時間については GCM 上では出力されていないため、北海道内の 7 箇所 (旭川、札幌、室蘭、帯広、稚内、函館、網走) における気象観測データ (全天日射量、日照時間) を用いて、2012 年～2016 年の 5 年間ににおける全天日射量と日照時間の日値における相関関係を月別に解析し、それをもとに GCM で出力された全天日射量から日照時間を推定した。

● 紅葉の色づきとフェノロジー

紅葉の開始日と終了日を推定するため、まず緑葉、紅葉、落葉の状態を RGB 値から判別する判別モデルを構築した。教師データとして画像の AOI ごとに緑葉、紅葉、落葉の状態を目視で確認したデータを 7160 個分 (3 サイト・10AOI・日時別) 用意した。その上で教師データの判別結果を目的変数に、教師データに紐付けられた各 AOI における RGB 画素値を説明変数として、2 次判別分析 (QDA: quadratic discriminant analysis) を行った。得られた 2 次判別分析のモデルを用いて、AOI 毎の RGB 値から紅葉しているかしていないかの判別を行い、その年最初に紅葉したと判別された日を紅葉開始日、最後に紅葉したと判別された日を紅葉終了日として抽出した。

紅葉の色づきの季節変化は、次に示す VARI 指数を用いて表現した。

$$VARI=(R-G)/(G+R-B)$$

なお、R は赤色画素値、G は緑色画素値、B は青色画素値である。AOI 毎に、1 時間おきに撮影された画像データから VARI を算出し、日あたりの最大値を使って紅葉の色づきにお

ける日変化を把握した。得られた VARI の日変化は、一般化加法モデル (GAM: generalized additive model) を使って季節変化をモデリングし、GAM の予測値において一年の中で最大の VARI となる日を紅葉ピーク日として選出した。さらに Beck et al. (2006) による手法を用いて VARI の日最大値の季節変化をモデリングし、VARI の値が年内で最大となった際の VARI 値を、紅葉の色づきデータとして抽出した。

- 融雪日推定モデルによる 1km メッシュ融雪日データ

積雪環境は高山帯の植物フェノロジーを左右する重要な要因である。そこで面的な積雪環境の変化を把握・考慮するため、積雪に関する物理過程を用いて融雪日を推定したモデル (降水量と温度の日変化を用いて雪の降る量、溶ける量を推定) の推定結果を使用した。融雪日推定モデルの詳細については、Ohashi et al. (2016) に記載されている。この推定結果では、現在気候下、および 3 GCM (MIROC5、MRI-CGCM3、IPSL-CM5A-LR) ・ 2 シナリオ (RCP 2.6、8.5) ・ 2 時期 (2046~2050 年、2096~2100 年) の 1km メッシュ解像度での融雪日の空間変化が収録されており、本解析ではこれを使用した。

- 展葉日

気候値の他にも紅葉に影響する可能性がある要因として、展葉日がある。Liu et al. (2016) では、北半球の高緯度域において気候変動だけでなく、展葉日の変化もまた秋のフェノロジーに作用していることを報告している。そこで本調査でも展葉日を説明変数に含めた。3 調査地の各 AOI ごとの展葉日は、同じく春先の定点カメラ画像から判読した展葉日を用いて紅葉との関係を解析するモデルに使用した。さらに現在気候下や将来気候下での展葉日の空間分布を推定するため、展葉日と融雪日の関係を用いた。3 調査地の各 AOI ごとに同じく春先の定点カメラ画像から融雪日を算出して、融雪日と展葉日の相関関係を求めた (図 3.3.3.)。得られた関係の単相関係数は 0.93 と強い相関が見られ、また 3 調査地間で大きな違いも見られなかったため、この 2 変数間の関係を用いて前述した融雪日の推定値から現在・将来における 1 km 解像度の展葉日の空間分布を推定した。

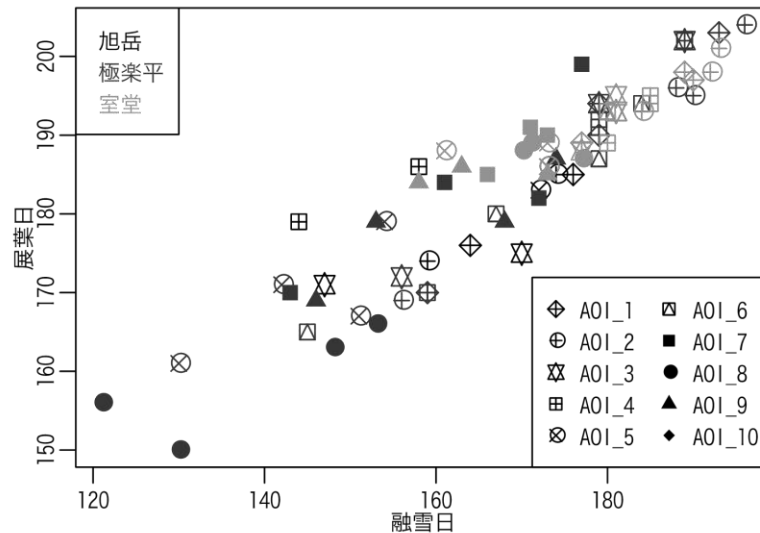


図 3.3.3. 3 調査地における展葉日と融雪日の線形関係

● 紅葉（フェノロジー・色づき）の推定モデル

上記で得られた4つの変数（1. 紅葉の色づき、2. 紅葉開始日、3. 紅葉最盛日、4. 紅葉終了日）における年別の値を、線形混合モデル（LMM: linear mixed model）を使って予測した。説明変数には、調査値最寄りの気象観測所のデータから集計した月別の気候値（平均気温、最高気温、最低気温、降水量、日照時間）と、紅葉などの秋のフェノロジーにも影響することが報告されている展葉日（Liu et al. 2016）を用いた。月別の気候値に関しては、植物が気候の影響を受け始めると考えられる融雪後から紅葉開始までの期間における気候値を対象とするため、7月および8月における気候値のみを用いた。なおランダム切片として各定点カメラサイトの AOI を設定することにより、紅葉の経年的な変化をモデリングした。説明変数間で総当たりの組み合わせを行い、AIC 基準でモデル選択を行った。多重共線性を考慮して、説明変数間で有意な相関がある組合せのモデルは除外した。上位5モデルを解析対象モデルとして、各モデルで予測された予測結果の平均値を予測結果としてマップに描画した。現在マップでは5モデルの平均値を描画したが、将来マップでは現在との差分（開始日、最盛日、終了日）もしくは比率（色づき）を5モデルそれぞれで算出し、その5モデル間平均を描画した。さらに将来気候下での変化における GCM・シナリオ・年代間の違いを把握するため、1km メッシュごとの予測結果を集計した頻度分布を各 GCM・シナリオ・年代で描画し比較することによって、不確実性や将来変化の傾向を評価した。

3.3.3 結果

● 紅葉の色づき

AIC を使った総当たり法によるモデル選択の結果、表 3.3.2. に示された 5 つのモデルが上位モデルとして選択された。このうちベストモデルでは観測値とモデル予測値の重相関係数は 0.80 であり、その他の上位モデルでも重相関係数は 0.70 以上と、予測制度の高いモデルが形成できた。上位 5 モデルに含まれた変数としては、展葉日が全てのモデルで選択されており、展葉日の影響が最も強く紅葉の色づきに影響していたことが解析された。その他の気候値に関してはそれぞれ 1 回しか選択されておらず、それほど重要な変数ではないと考えられた。

表 3.3.2. 紅葉の色づきを予測する上位 5 モデルの比較

モデル構造	AIC	R2
展葉日+降水_8	-118.5	0.80
展葉日+日照_7	-111.5	0.77
展葉日+最高気温_8	-110.3	0.72
展葉日	-108.3	0.73
展葉日+平均気温_7	-104.6	0.70

上位 5 モデルを用いて現在気候（1981～2010）における紅葉の色づきを予測した結果を図 3.3.4. に示す。モデル予測の結果、高標高域ほど紅葉の色づきが強い傾向が予測された。これは展葉日が早いほど紅葉の色づきが悪い傾向があることを反映していると考えられる。展葉日が早いほど紅葉する時期での葉は古くなっているため、紅葉する際の色素の合成など生理的な活性が低いと考えられ、この葉寿命に伴う生理活性の変化が作用している可能性が考えられる。低標高域では紅葉の色づきが高標高側よりもさらに悪くなる傾向が予測されたが、この結果には注意が必要と言える。低標高では紅葉の解析対象としたウラジロナナカマドが、エゾマツやトドマツ、ダケカンバなどの高木林の下に生えるようになるため、生育環境がモデル構築時に使用した高山帯の生育環境と大きく異なってくると考えられる。気候に対するウラジロナナカマドの反応性も高山帯と亜高山帯では異なってくる可能性もある。現状では亜高山帯の針葉混交林における定点での長期的なカメラ観測データがないため検証は難しいが、今後モニタリングを交えながら低標高域の予測結果を検証する必要がある。紅葉の色づきにおける将来変化の予測結果では、いずれの GCM においても紅葉の色づきが悪くなる傾向が予測された（図 3.3.5.）。3 つの GCM の中では、IPSL-CM5A-LR による予測結果において最も色づきの悪化が顕著であった。色づきの悪化傾向は GCM による違いも大きい、空間分布としては特に低標高側で大きく色づきが悪くなる傾向が示されたが、前述の通り低標高側の予測結果には注意が必要と言える。

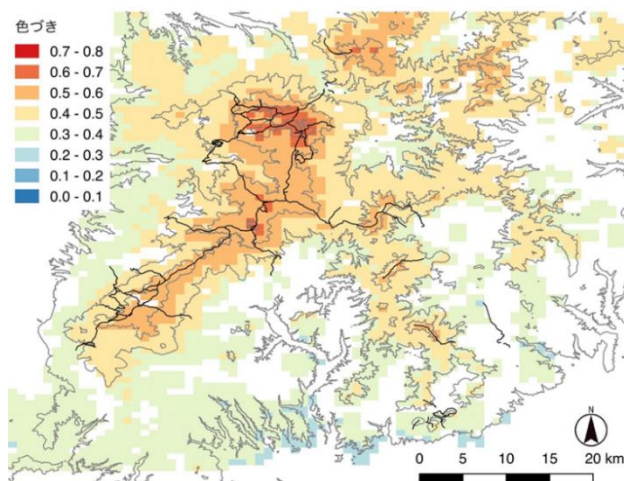


図 3.3.4. 現在気候（1981～2010 年）における紅葉の色づき分布図

色づきの値は、VARI 値によるものを示している。等高線は標高 500m 間隔で描画。上位 5 モデルあたりの平均値を描画。ウラジロナナカマドが含まれる植生タイプの分布がある 3 次メッシュのみを描画。

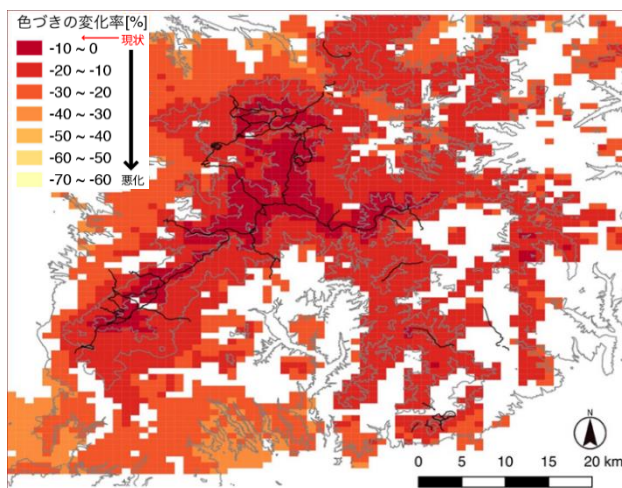


図 3.3.5(a). MIROC5 (RCP 8.5)

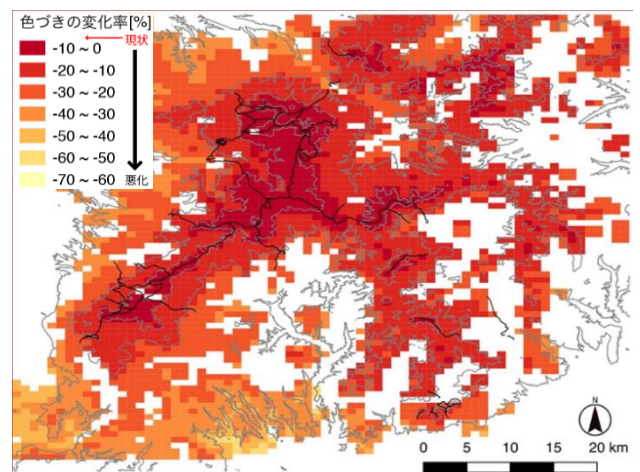


図 3.3.5(b). MRI-CGCM3 (RCP 8.5)

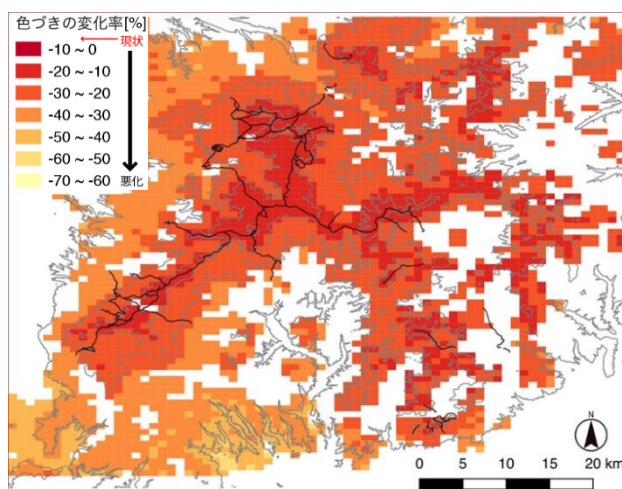


図 3.3.5(c). IPSL-CM5A-LR (RCP 8.5)

図 3.3.5(a-c). 将来気候（2096～2100 年）における紅葉の色づきの変化

色づきの変化の値は、現在気候下での VARI 値からの比率として計算している。等高線は標高 500m 間隔で描画。上位 5 モデルあたりの平均値を描画。ウラジロナナカマドが含まれる植生タイプの分布がある 3 次メッシュのみを描画。

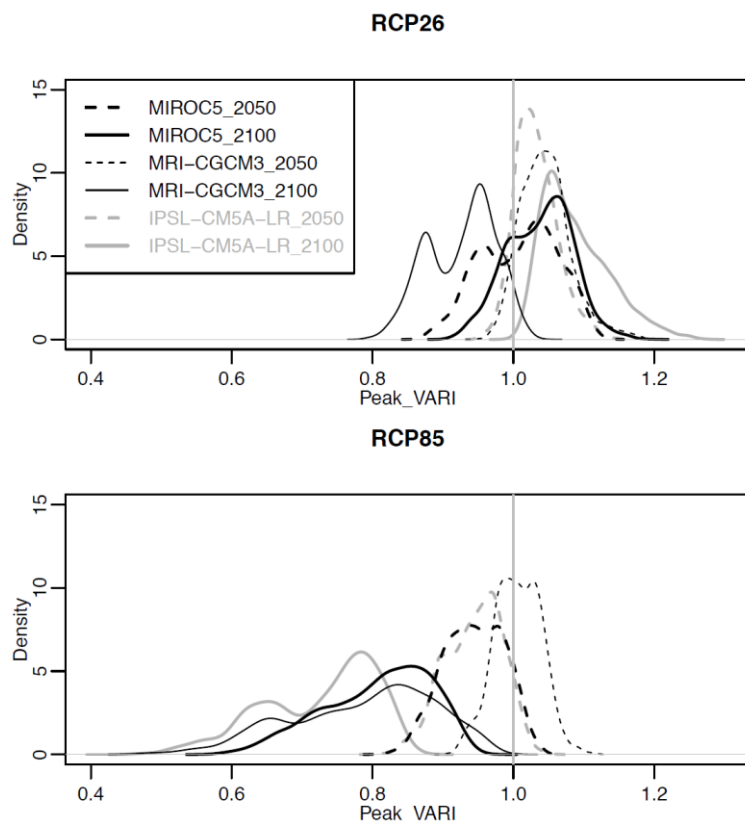


図 3.3.6. 紅葉の色づきにおける将来気候モデル間での予測結果の不確実性

ウラジロナカマドが含まれる植生タイプの分布が含まれる 3 次メッシュの予測結果のみを集計し、予測された VARI 値の密度分布を描画。VARI 値は現在気候から予測された VARI 値からの比率として算出している。そのため横軸における 1 の値から離れた場所にデータが集中していると、色づきの将来変化が予測されていることを示す。

一方で、紅葉の色づきが強いと予測された高標高側では色づきの悪化は低標高域程ではないと予測された。

モデル間での予測結果のばらつきを見ると、RCP2.6 シナリオでは GCM・年代によって色づきの変化の方向性が大きく異なり、色づきの値の変化も小さい（図 3.3.6.）ことから、RCP2.6 シナリオ程度の気候変化に対してはそれほど紅葉の色づきは変化しないことが示唆された。しかし RCP8.5 シナリオでは、2096～2100 年の気候環境下では大きく紅葉の色づきが悪化することが 3 GCM のいずれにおいても予測され（図 3.3.6.）、この強度の気候変動下では紅葉の色づきの変化に対する適応策が必要と考えられる。紅葉スポットとして注目される標高 1500m 以上の高標高域では、RCP8.5 シナリオ下の今世紀末において、10～20%ほど紅葉の色づきが低下する傾向にあり、1000～1500m の標高域では 20～30%程の色づきの低下が予測されている。より高標高域のサイトほど色づきの変化は少ない傾向があるため、こうした高標高のサイトへのアクセス整備などは適応策の一つのオプションになると考えられる。

● 紅葉開始日

AIC を使った総当たり法によるモデル選択の結果、表 3.3.3. に示された 5 つのモデルが上位モデルとして選択された。このうちベストモデルでは観測値とモデル予測値の重相関係数は 0.38 であり、その他の上位モデルでも重相関係数は 0.3 程度と、モデルの予測精度はそれほど高くなかった。上位 5 モデルに含まれた変数としては、7 月の日照時間が 4 つのモデルで選択され、気温の変数が 4 つの、展葉日が 3 つのモデルで選択されており、これらの要素が複合的に作用している傾向がみられた。

表 3.3.3. 紅葉開始日を予測する上位 5 モデルの比較

モデル構造	AIC	R2
展葉日+最高気温_7+日照_7	645.8	0.38
展葉日+最高気温_8+日照_7	648.1	0.37
最高気温_8+日照_7	655.2	0.28
最低気温_8	657.5	0.21
展葉日+日照_7	658.0	0.35

上位 5 モデルを用いて現在気候（1981～2010）における紅葉開始日を予測した結果を図 3.3.7. に示す。モデル予測の結果、高標高域ほど紅葉開始日が遅い傾向が予測された。この結果は高標高域ほど紅葉のシーズンが早いとされる一般的な傾向（Doi et al. 2008; Park et al. 2017）とは異なる結果と言える。これは前述のようにモデル解析に用いたデータが高山帯における観測データのみを使っており、低標高側の紅葉データを含んでいないことや、構築されたモデルの予測制度の低さなどが影響しているものと考えられる。また 3 箇所のカメラデータのみを使い、ランダム切片に AOI を設定するなど、モデル構造が空間的な紅葉の変化よりも経年的な紅葉の変化を意識したものであることも影響していると考えられる。しかしながら、植生の変化を含むものではあるものの、2015 年における赤岳の紅葉カレンダーでは低標高側ほど紅葉開始時期が早い傾向が報告されており（図 3.3.8.）、またチベットにおいても高標高域で紅葉の開始が遅かったとする報告もある（Meng et al. 2016）。高山帯の紅葉フェノロジーに関してはデータの蓄積も未だ乏しく、ベストモデルの予測精度の低さにみられるように未だ改善が必要と考えられる。そのため今後も継続的なモニタリングとデータの蓄積を通して、慎重に判断する必要がある。

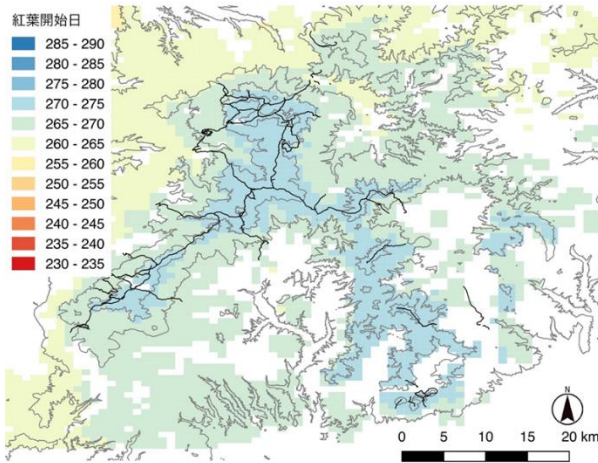


図 3.3.7. 現在気候 (1981~2010 年)

における紅葉開始日の分布図

等高線は標高 500m 間隔で描画。上位 5 モデルあたりの平均値を描画。ウラジロナナカマドが含まれる植生タイプの分布が含まれる 3 次メッシュのみを描画。

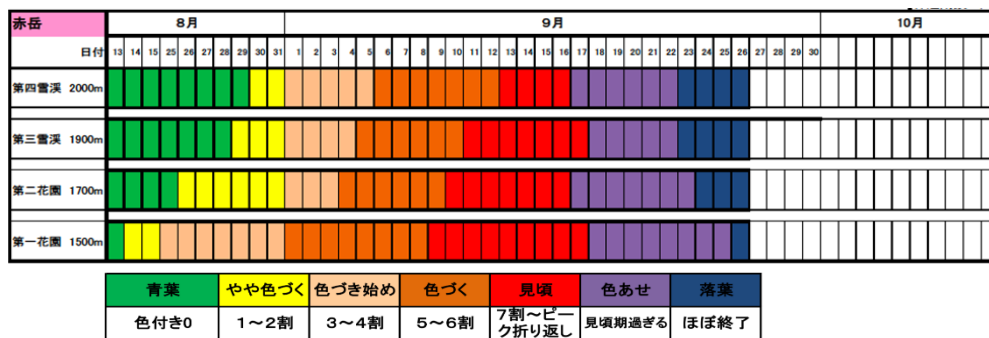


図 3.3.8. 2015 年における赤岳の紅葉カレンダー（層雲峡ビジターセンターHP から）

<http://sounkyovc.net/data/file/notes/15kouyou.pdf>

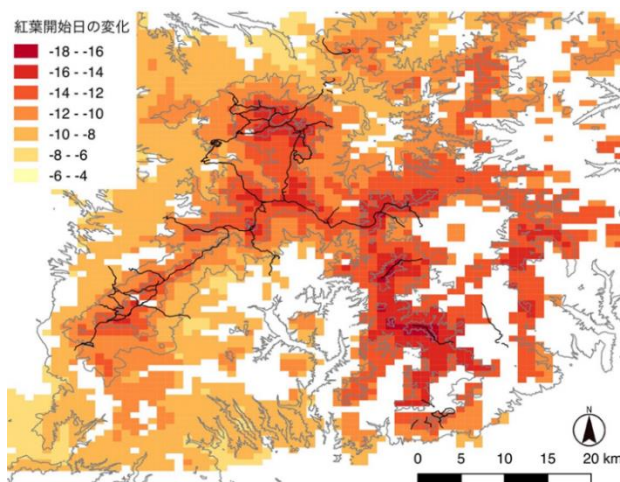


図 3.3.9 (a). MIROC5 (RCP 8.5)

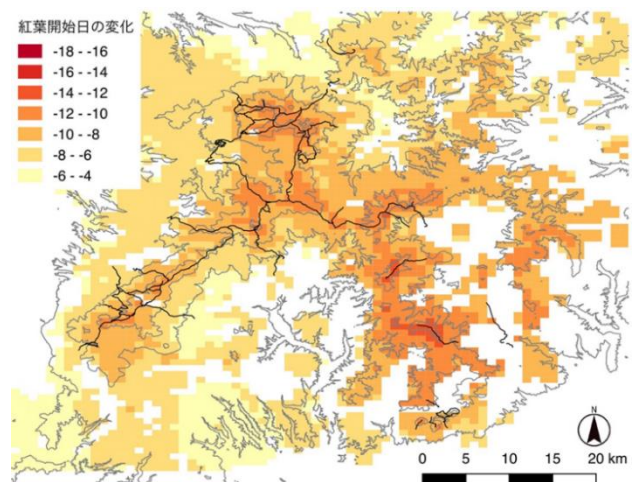


图 3.3.9(b). MRI-CGCM3 (RCP 8.5)

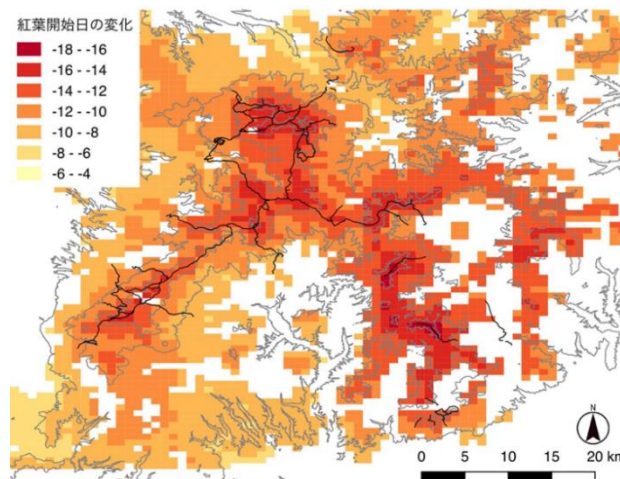


図 3.3.9 (C). IPSL-CM5A-LR (RCP 8.5)

図 3.3.9 (a-c). 将来気候 (2096~2100 年)

における紅葉開始日の変化

紅葉開始日の変化の値は、現在気候での開始日との差分として計算している。等高線は標高 500m 間隔で描画。上位 5 モデルあたりの平均値を描画。ウラジオナナカマドが含まれる植生タイプの分布が含まれる 3 次メッシュのみを描画。

紅葉開始日の将来予測の結果では、いずれの GCM においても紅葉開始日が早まる傾向が示された（図 3.3.9.）。これは7月や8月の最高気温が紅葉開始日と負の相関を、展葉日が紅葉開始日と正の相関を持っていたため、このような予測結果となったと考えられる。最高気温は乾燥や強光阻害などのストレス作用を通して、展葉日は生理的な葉寿命を通して紅葉開始日に作用している可能性が考えられるが、より詳細な検討が今後必要と言える。空間的には高標高域ほど紅葉開始日の早まりが強く、標高 1500m 以上の場所では 10 日から半月ほど紅葉開始日が早まることが予測された。

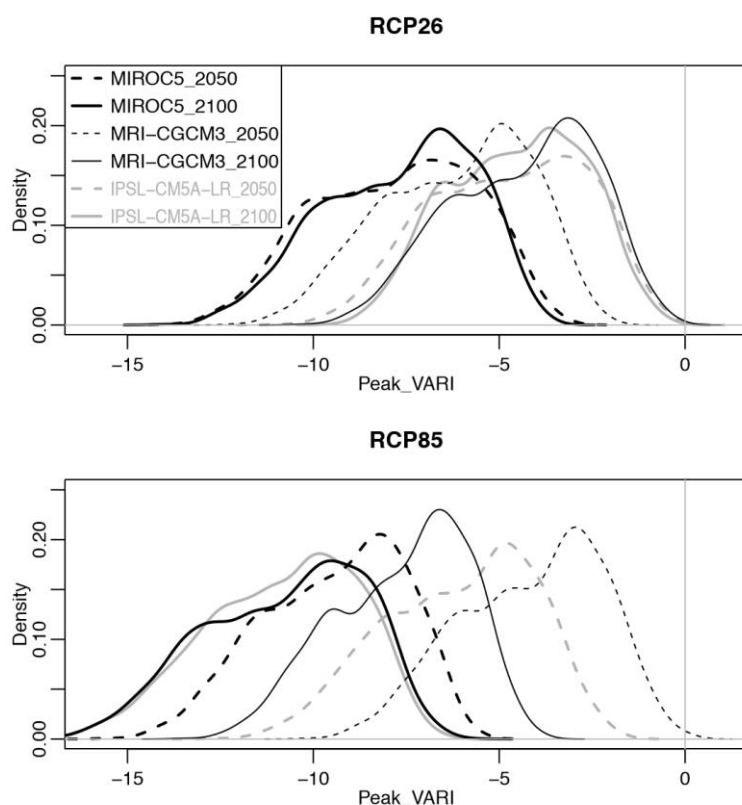


図 3.3.10. 紅葉開始日における将来気候モデル間での予測結果の不確実性

ウラジオナナカマドが含まれる植生タイプの分布が含まれる3次メッシュの予測結果のみを集計し、予測された紅葉開始日の密度分布を描画。紅葉開始日は現在気候から予測された紅葉開始日との差分として算出している。そのため横軸における0の値から離れた場所にデータが集中していると、紅葉開始日の将来変化が予測されていることを示す。

モデル間での予測結果のばらつきを見ると、程度の差こそあれいずれのモデルにおいても紅葉開始日は早まることが予測された（図 3.3.10.）。RCP2.6 シナリオの 2046～2050 年における予測においても、3GCMの平均あたりで5日程度の紅葉開始日の早まりが予測され、比較的早急な変化が予測された。多くの紅葉スポットを含む高標高域ほど変化が顕著な傾向があることから、早期に紅葉時期のモニタリング体制と、モデリング、予測、検証、改善を含んだ順応的な観測・管理体制を構築することが適応策として必要と考えられる。

- 紅葉最盛日

AIC を使った総当たり法によるモデル選択の結果、表 3.3.4. に示された 5 つのモデルが上位モデルとして選択された。このうちベストモデルでは観測値とモデル予測値の重相関係数は 0.48 であり、その他の上位モデルでも重相関係数は 0.4 程度と、モデルの予測精度はそれほど高くなかった。上位 5 モデルに含まれた変数としては、展葉日、気温、日照時間などの変数が混在しており、一定の変数が強く効いている構造は見られなかった。

表 3.3.4. 紅葉最盛日を予測する上位 5 モデルの比較

モデル構造	AIC	R2
展葉日+最高気温_7+日照_7	669.8	0.48
最低気温_8+日照_8	669.9	0.38
最低気温_8+日照_8+降水_7	679.3	0.39
展葉日+日照_7	679.4	0.50
最低気温_8	679.5	0.25

上位 5 モデルを用いて現在気候（1981～2010）における紅葉最盛日を予測した結果を図 3.3.11. に示す。5 モデルの平均として紅葉最盛日を求めた場合、図 3.3.11. のように標高によらず均一の紅葉最盛日が予測された。これはモデル間でばらつきが大きいため、標高差などの空間的な変化が均質化されたものと考えられる。

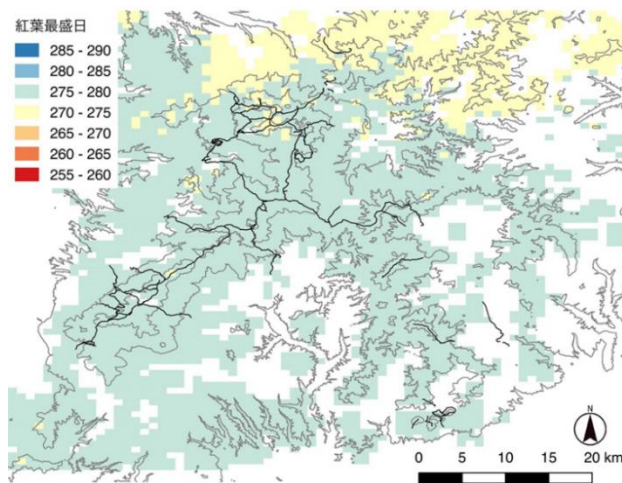


図 3.3.11. 現在気候 (1981～2010 年)

における紅葉最盛日の分布図

等高線は標高 500m 間隔で描画。上位 5 モデルあたりの平均値を描画。ウラジロナナカマドが含まれる植生タイプの分布が含まれる 3 次メッシュのみを描画。

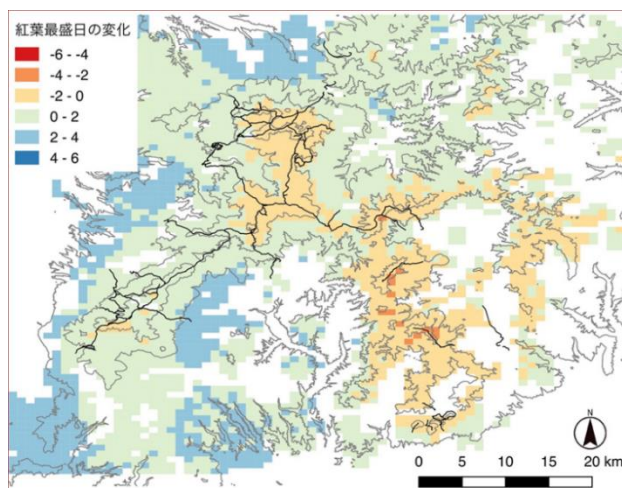


図 3.3.12(a). MIROC5 (RCP 8.5)

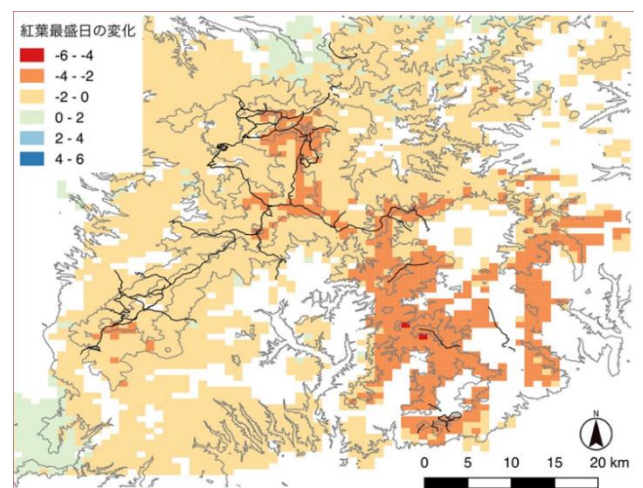


図 3.3.12(b). MRI-CGCM3 (RCP 8.5)

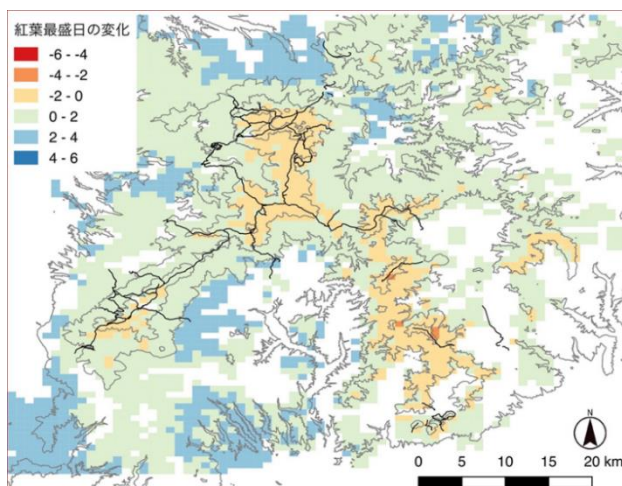


図 3.3.12(c). IPSL-CM5A-LR (RCP 8.5)

図 3.3.12(a-c). 将来気候 (2096～2100 年)

における紅葉最盛日の変化

紅葉最盛日の変化の値は、現在気候での最盛日との差分として計算している。等高線は標高 500m 間隔で描画。上位 5 モデルあたりの平均値を描画。ウラジロナナカマドが含まれる植生タイプの分布が含まれる 3 次メッシュのみを描画。

紅葉最盛日の将来予測の結果では、モデル間で程度の差はあるが、標高 1500m 以上の高標高側で若干最盛日が早まる傾向がみられ、低標高側では若干紅葉最盛日が遅くなる傾向が予測された（図 3.3.12.）。しかしいずれにおいても紅葉最盛日の変化は 6 日未満程度であり、紅葉最盛日はそれほど変化しないことが予測された。これは上位 5 モデルの中でも説明変数のパラメータが大きく変化し、説明力の強いモデルが得られなかったことも関連していると考えられる。

モデル間での予測結果のばらつきを見ると、いずれの RCP シナリオ、年代の予測でも GCM 間で大きなばらつきが見られた（図 3.3.13.）。このことから、今回得られた予測結果は未だに大きな不確実性を有していると考えられ、今後のさらなるデータの蓄積とモデルの改善が、適応策の指針を示すために必要と考えられる。

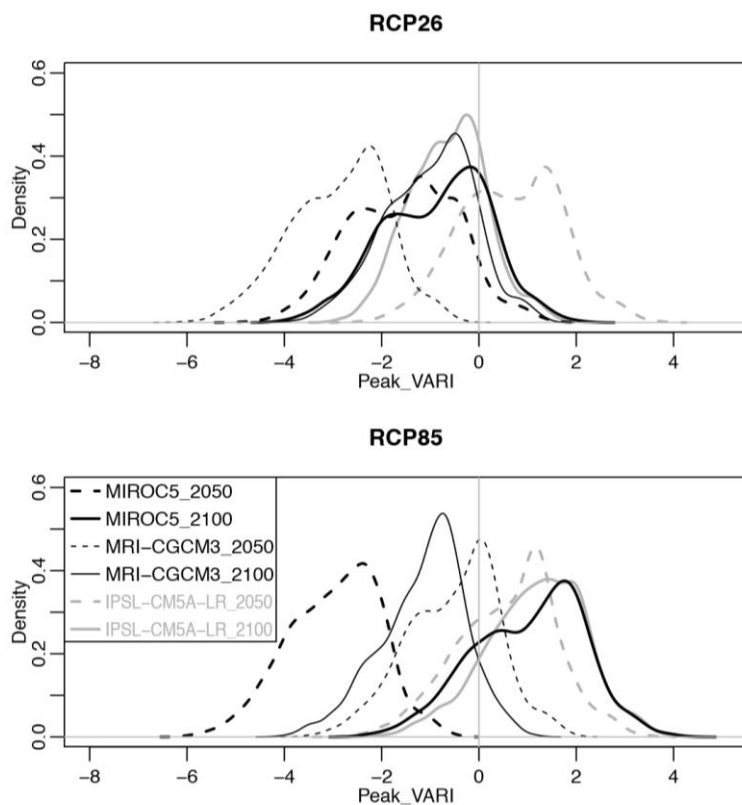


図 3.3.13. 紅葉最盛日における将来気候モデル間での予測結果の不確実性

ウラジロナナカマドが含まれる植生タイプの分布が含まれる 3 次メッシュの予測結果のみを集計し、予測された紅葉最盛日の密度分布を描画。紅葉最盛日は現在気候から予測された紅葉最盛日との差分として算出している。そのため横軸における 0 の値から離れた場所にデータが集中していると、紅葉最盛日の将来変化が予測されていることを示す。

- 紅葉終了日

AIC を使った総当たり法によるモデル選択の結果、表 3.3.5. に示された 5 つのモデルが上位モデルとして選択された。このうちベストモデルでは観測値とモデル予測値の重相関係数は 0.73 であり、その他の上位モデルでも重相関係数は 0.54～0.70 と、ある程度の予測精度を有するモデルが構築できた。上位 5 モデルに含まれた変数としては、気温の変数が 5 つ全てのモデルで選択され、展葉日は 4 回、日照時間は 3 回選択されるなど、これらの要素が複合的に作用している傾向がみられた。

表 3.3.5. 紅葉終了日を予測する上位 5 モデルの比較

モデル構造	AIC	R2
展葉日+平均気温_8	700.5	0.73
展葉日+最高気温_8+日照_7	712.6	0.70
最低気温_8+日照_8	712.8	0.54
展葉日+最高気温_8	715.7	0.69
展葉日+最高気温_7+日照_7	716.0	0.61

上位 5 モデルを用いて現在気候（1981～2010）における紅葉終了日を予測した結果を図 3.3.14. に示す。5 モデルの平均として紅葉終了日を求めた場合、図 3.3.14. のように標高によらず均一の紅葉終了日が予測された。これはモデル間でばらつきが大きいために、標高差などの空間的な変化が均質化されたものと考えられる。

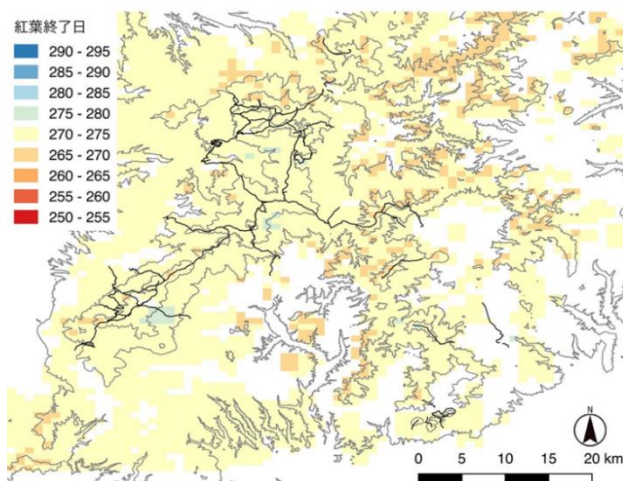


図 3.3.14. 現在気候（1981～2010 年）における紅葉終了日の分布図

等高線は標高 500m 間隔で描画。上位 5 モデルあたりの平均値を描画。ウラジロナナカマドが含まれる植生タイプの分布が含まれる 3 次メッシュのみを描画。

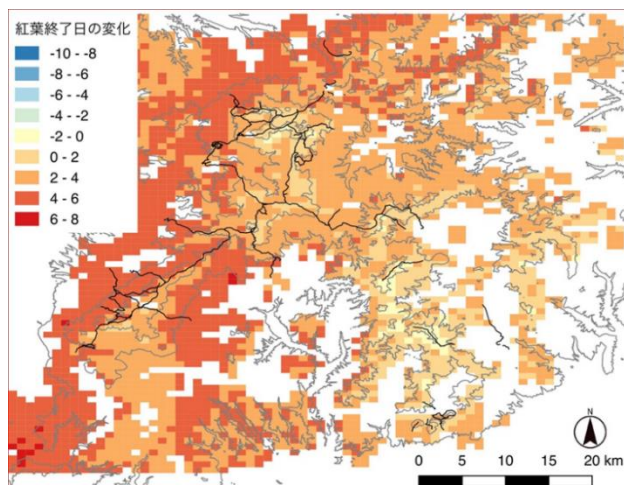


図 3.3.15 (a). MIROC5 (RCP 8.5)

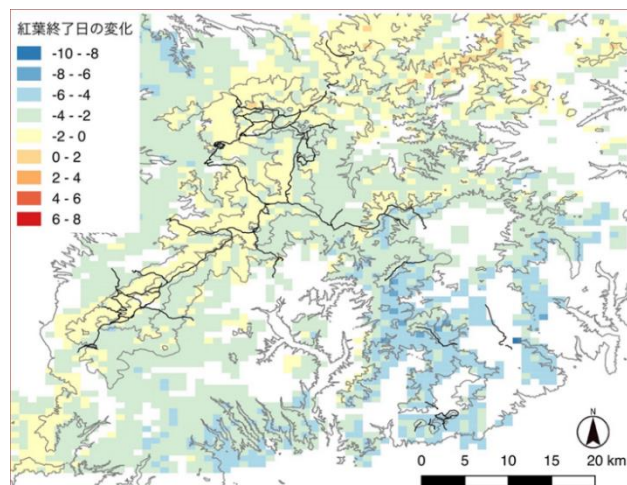


図 3.3.15 (b). MRI-CGCM3 (RCP 8.5)

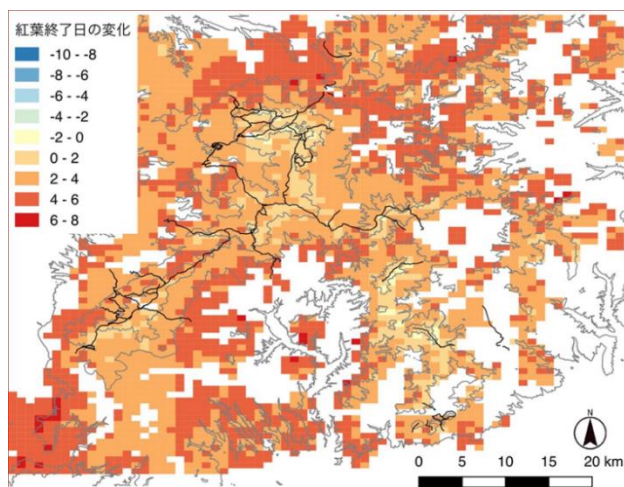


図 3.3.15 (c). IPSL-CM5A-LR (RCP 8.5)

3.3.15 (a-c). 将来気候 (2096～2100 年) における紅葉終了日の変化

紅葉終了日の変化の値は、現在気候での終了日との差分として計算している。等高線は標高 500m 間隔で描画。上位 5 モデルあたりの平均値を描画。ウラジロナナカマドが含まれる植生タイプの分布が含まれる 3 次メッシュのみを描画。

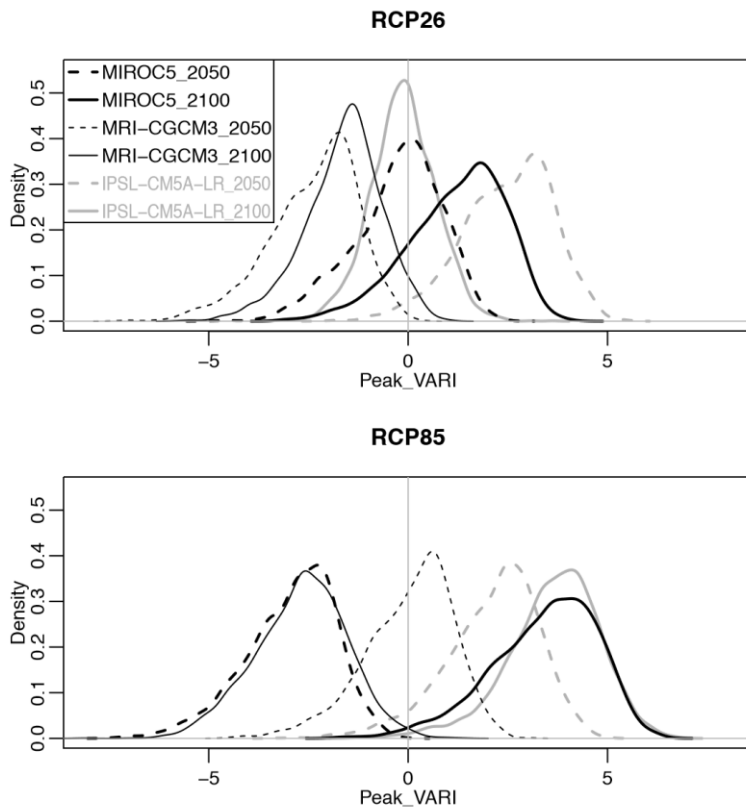


図 3.3.16. 紅葉終了日における将来

気候モデル間での予測結果の不確実性

ウラジロナナカマドが含まれる植生タイプの分布が含まれる3次メッシュの予測結果のみを集計し、予測された紅葉終了日の密度分布を描画。紅葉終了日は現在気候から予測された紅葉終了日との差分として算出している。そのため横軸における0の値から離れた場所にデータが集中していると、紅葉終了日の将来変化が予測されていることを示す。

紅葉終了日の将来予測の結果では、GCMによって予測結果が大きく異なった(図 3.3.15.)。しかし標高 1500m 以上の高標高側では、いずれにおいても紅葉最盛日の変化は 6 日未満程度であり、紅葉終了日はそれほど変化しないことが予測された。低標高域では MIROC5 と IPSL-CM5A-LR では紅葉終了日が遅くなる傾向が予測され、MRI-CGCM3 では早くなる傾向が予測されたが、前述の通り低標高側の予測結果には注意が必要と言える。

モデル間での予測結果のばらつきを見ると、いずれの RCP シナリオ、年代の予測でも GCM 間で大きなばらつきが見られた(図 3.3.16.)。このことから、今回得られた予測結果は未だに大きな不確実性を有していると考えられ、今後のさらなるデータの蓄積とモデルの改善が、適応策の指針を示すために必要と考えられる。

3.3.4 考察

大雪山における紅葉の将来変化予測の結果をまとめると、表 3.3.6. のようになる。モデルへの入力データの性質や、大雪山における植生の群落高の変化を考えると、大まかに 1500m 以上の高標高域で低木樹種が群落の最高階層を形成する領域と、それ以下の低標高域で高木樹種が優先してくる領域で区別して判断する必要がある。低標高側の予測結果は色づきや終了日などで大きな将来変化や GCM 間のばらつきが見られたが、これらの標高域で形成される高木樹種と混交したナナカマド類の紅葉データは今回モデル構築の際に使われ

ていないため、この標高域での予測結果は今後観測データを積み上げた上で検証する必要があると考えられる。一方で高標高域においては、将来気候下で紅葉の色づきが悪化し、紅葉開始日が早まることが予測された。しかしこれら2つでは変化の起こるタイミングが異なることが予測された。紅葉の色づきでは RCP8.5 シナリオ下で 2096～2100 年の予測をした際に初めて明瞭な傾向として色づきが 10～20%ほど悪化することが予測されたが、紅葉開始日には RCP2.6 シナリオの 2046～2050 年の気候値でもある程度早まることが予測された。そのためフェノロジーの変化に関しては早急に対応する観測・モデリング・予測・検証体制を整える必要があるが、紅葉の色づきに関してはある程度の時間的余裕があると考えられる。その間に、異なる植生タイプで紅葉の色づきを検証可能な観測データを蓄積する必要があると考えられる。最盛日と終了日に関しては今回構築した気候値を使った統計モデルでは明瞭な傾向は見られなかったため、今後も定常的なモニタリングを続けて傾向に変化が生じていないか確認していくことが必要である。

表 3.3.6. 大雪山における紅葉の将来予測結果一覧

	色づき	開始日	最盛日	終了日
高標高域 (>1500m)	RCP8.5/2100 年に 10～20%悪化	RCP2.6/2050 年 から早まる	変化なし	変化なし
低標高域 (<1500m)	RCP8.5/2100 年に 大きく悪化	RCP2.6/2050 年 から早まる	変化なし	ばらつき大

今回の解析は大雪山で主要な紅葉樹種であるウラジロナナカマドを対象として行われたが、マップ上に描画された範囲内でもウラジロナナカマド以外の種における紅葉がメインとなる領域が含まれている。高山帯の矮性低木群落におけるチングルマ、ウラシマツツジなどや、亜高山帯のカエデ類、ウコンウツギなどである。これらの樹種においては気候変化に対する生理的な反応がウラジロナナカマドとは異なる可能性が考えられるため、大雪山全域における紅葉の将来変化を明らかにするためには、これらの樹種におけるモデリングも必要不可欠である。一方で紅葉の特に色づきに関する基礎データの蓄積は未だ乏しい状況であるため、モデリングや将来予測、検証、改善などを見通して観測データを効率的に収集する必要がある。最終的な目的を明確化するとともに、それを達成する上で必要となる観測と解析内容を研究者側とも協議した上で、共同した体制で観測を続けることが今後の適応策を進める上で重要と考えられる。

3.4. 登山道の荒廃要因と将来予測

3.4.1. 目的

登山道の荒廃には土壌浸食と過剰利用圧の2要因がある(宮川&小澤 2008)。土壌浸食は登山道の表土が雨水や雪解け水などによって流され周辺の植生に影響を与えたり、土壌が流出して水路となり更に加速度的な浸食を引き起こす。過剰利用圧は、限られた登山道を集中的に利用することで表土が固くなり、雨水が浸透しなくなることでぬかるみを誘発し、登山者がこれをよけて歩くことで周囲の植生が踏圧されて裸地化が進む。また、土壌浸食と過剰利用圧は互いに影響を与え、加速度的に浸食が進む。

大雪山の1年間の入山者数は約5~10万人と推定されるが、「平成25年度大雪山国立公園整備計画策定等基礎調査業務 資料5. 入力・表計算ソフトウェアファイル・登山道地点データ」(2014, 以下「登山道地点データ」)に登山道地点の荒廃状況がそれぞれ記されており、その浸食の度合いに応じて軽度・中度・重度の三段階で示されている。そのため、大雪山の登山道浸食は降水量がどれだけ影響を与えているかを他の地形要因と合わせて解析し、更に、現在と将来の降水量の変化に、現在の浸食箇所を重ね合わせ、今後の登山道の整備・維持管理をどのように行うことが望ましいかを明らかにすることを目的とした。

3.4.2. 方法

登山道地点データ(2014)に基き、登山道の荒廃状況の軽度を1、中度を2、重度を3(付表1)と置き換え、環境要因である傾斜度、傾斜角、傾斜方向、表層地質、降水量を説明変数とし、大小関係にのみ意味がある尺度(順序尺度)による解析を行った。表層地質は「資料4. 参考・表計算ソフトウェアファイル・登山道地点データの集計・凡例」に基き脆弱性のレベルを脆弱を1、強脆弱を2、その他をなし(空欄)として解析した。降水量は国土数値情報の過去30年間の観測値から1kmメッシュ(3次メッシュ)ごとの平年値を推定したデータを挿入した。解析は統計ソフトR(version 3.4.2)、パッケージrms(Frank 2017)により行った。

降水量の変化と現在の浸食箇所の重ね合わせについては、現在の降水量とMIROC5で推定されたRCP2.6/2096~2100年の降水量から現在の差分を算出したものに、登山道の洗堀・浸食状況が中度及び重度の箇所を重ね合わせ降水量と登山道の浸食の可視化を行った。更に気候シナリオ、気候モデル間での違いを評価するために、RCP2.6とRCP8.5のシナリオにおいて、MIROC5、MRI-CGCM、IPSL-CMA5A-LRの3つの気候モデルによって2096~2100年の年間降水量を算出し、現在の降水量との差分を求めた。

3.4.3. 結果・考察

表3.4.1.に登山道の荒廃状況に影響を与える環境要因の解析結果を示す。傾斜角、傾斜方向は荒廃状況に対して有意差はなかった($P > 0.05$)。その一方で、登山道は表層地質が脆

弱であるほど荒廃しやすく ($P = 0.0026$)、また降水量が多くなるほど荒廃しやすい ($P = 0.0165$) という結果が得られた。大雪山の土壌浸食に関しては、10 年程度で著しい浸食が生じている (渡辺 2008) が、今回、登山道の荒廃状況に影響を与えているとされた地質の脆弱性や降水量に関しては、悪天候の日が続いたり近年頻発する集中豪雨によって、土壌が雨水を給水できなくなり、特に脆弱な土砂の流出、また一時的な沢となることで登山道の複線化を引き起こし、登山道の崩壊へつながっていると考えられる。

表 3.4.1. 登山道の荒廃状況に影響を与える環境要因の解析結果

	Coef	S.E.	Wald Z	Pr(> Z)
y>=1(傾斜方向：東、表層地質：脆弱)	-10.2655	2.4452	-4.2	<0.0001
y>=2(傾斜方向：東、表層地質：脆弱)	-12.4314	2.4743	-5.02	<0.0001
傾斜角	0.0444	0.0333	1.33	0.1821
傾斜方向：北東	-0.206	1.1488	-0.18	0.8577
傾斜方向：北東	-0.3807	0.5149	-0.74	0.4597
傾斜方向：北西	1.1404	0.6137	1.86	0.0631
傾斜方向：南	0.4543	0.4813	0.94	0.3452
傾斜方向：南東	0.0634	0.4871	0.13	0.8965
傾斜方向：南西	-9.9254	40.0524	-0.25	0.8043
傾斜方向：西	-0.4775	0.6512	-0.73	0.4634
表層地質：強脆弱	2.022	0.6705	3.02	0.0026
降水量	0.0003	0.0001	2.4	0.0165

図 3.4.1. に現在の降水量と将来の降水量 (RCP2.6/MIROC5/2096~2100 年) の差分に、浸食の程度を重ねた図を示す。現在の降水量においては、年間降水量が 1600mm 以上のところで中度・重度の洗堀・浸食が生じており、これまでの研究や今回の解析結果を支持している。一方、将来予測において、降水量は特別保護地区を含む高標高域で増加し、特に北部の旭岳火口周辺の姿見付近や旭岳石室付近で顕著であり、350mm 以上も増加する。旭岳はロープウェイもあることから、観光目的の利用も多く、また、現在の洗堀・浸食が中度～重度での箇所が集中して存在しているため、将来的な降水量の増加に伴い、洗堀・浸食がより深刻化する可能性がある。

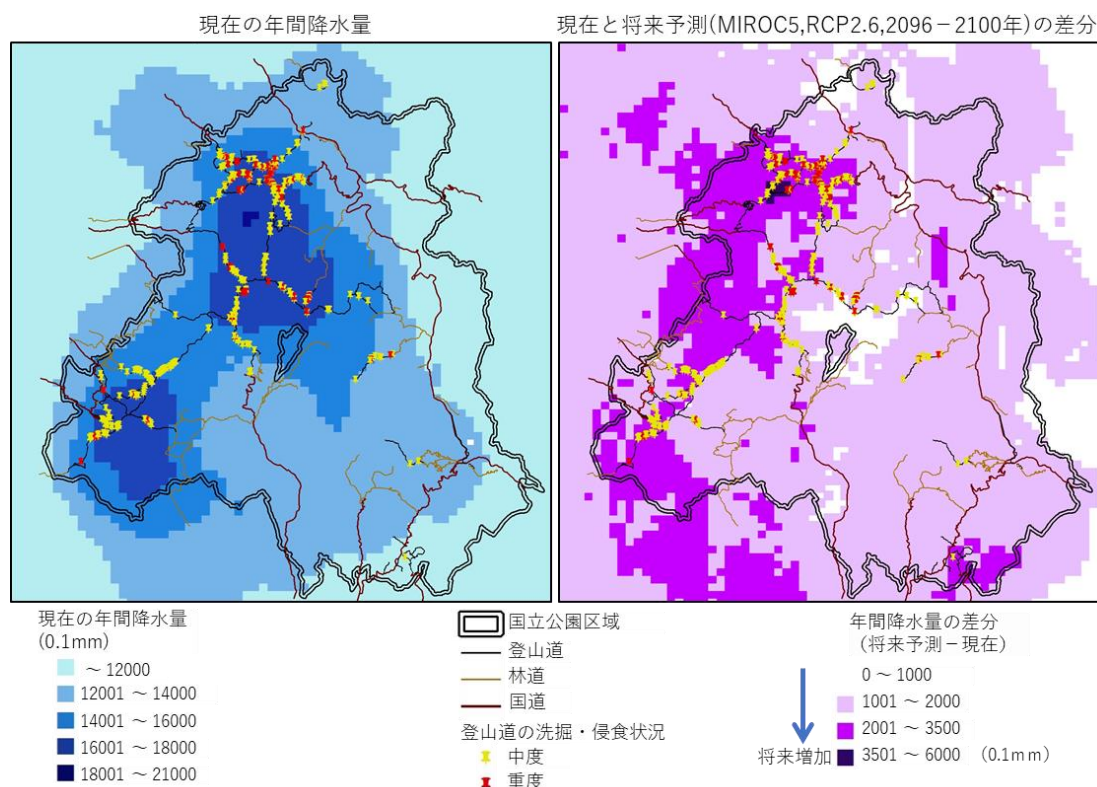


図 3.4.1. 降水量と登山道の洗掘・浸食程度。

左図は現在の年間降水量、右図は現在の年間降水量と将来予測(2096～2100 年)との差分(洗掘・浸食程度は平成 25 年度大雪山国立公園整備計画策定等基礎調査業務 2014 による)

図 3.4.2. に現在の降水量と各気候シナリオ・モデルで算出した降水量の差分の図を示す。気候モデルの違いによって降水量の増加量には幅があるが、旭岳周辺の降水量が増加する傾向は同じである。特に MIROC5 の RCP8.6/2096～2100 年の場合では、特別保護地区全体が 350 mm 以上増加する可能性があることが判明した。そのため、大雪山国立公園における登山道整備技術指針 2016 年改訂版」(平成 28 年 3 月環境省北海道地方環境事務所)に示された登山道における土壌の浸食防止方策よりも、浸食防止効果がある登山道の整備及び維持管理手法がないか検討する必要がある。なお今回用いた気候モデルは、登山道や周辺の林道に甚大な被害をもたらし、将来的には頻度を増すとされている集中豪雨や台風の予測はできないことから、異常気象・極端現象の頻度や規模を予測したダウンスケーリングデータが入手可能となった時点で詳細な解析と検討を行う必要がある。

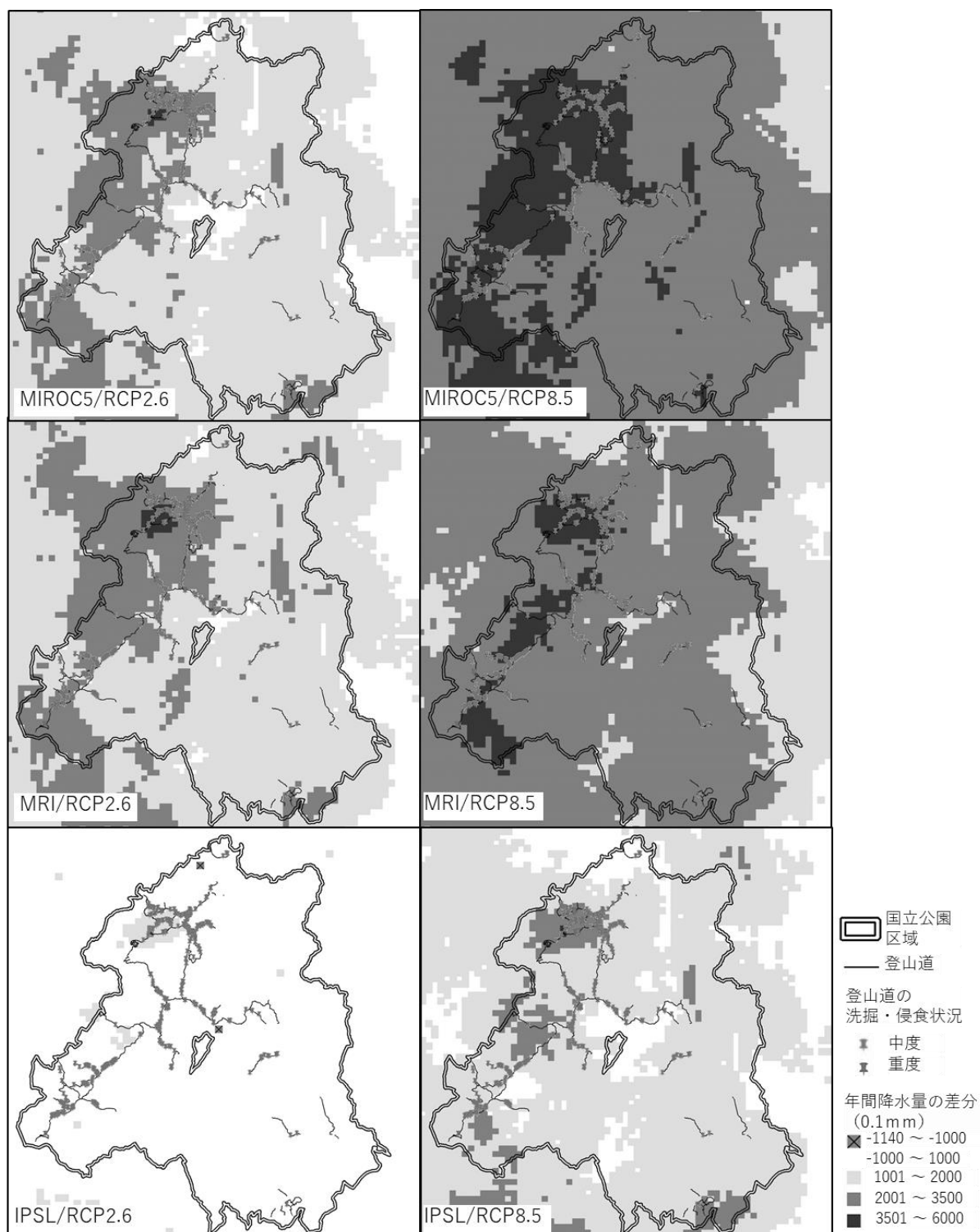


図 3.4.2. 現在と将来予測（2096～2100 年）の降水量の差分。それぞれの図は、温暖化シナリオ、気候モデルの違いを示す

付表 1 登山道の洗堀・浸食状況の評価（平成 25 年度大雪山国立公園整備計画策定等
基礎調査業務報告書 資料編 山岳資料 05 登山道・GIS データ類 4. 参考・表計算ソ
フトウェアファイル・登山道地点データの集計・凡例 2014 に基づく）

三段階の評価	洗堀・浸食の大きさ	洗堀・浸食の状況
軽度	幅 2m未満 深さ 0.2～0.6m	自然要因による小規模な路肩崩落を含む
中度	幅 2～3m程度 深さ 0.6～1m	侵食なしの拡幅・人為要因による路肩崩落を含む 局所的な深掘れを含む
重度	幅 3m以上 深さ 1m以上	侵食または流出土砂による植生損失を伴う 局所的な深掘れは除く

3.5 大雪山国立公園における適応オプションの抽出と管理計画の立案に向けた解析（適応策の提案）

3.5.1. 目的

雪田植生と高山ハイデ・風衝草原（以下「風衝草原」）（それらを合わせ、以下「高山植生」）は、RCP2.6 の場合では 2046～2050 年及び 2096～2100 年の 2 時期において、面積を減らしつつも広い範囲で存在するが、RCP8.5 の場合では 2046～2050 年に雪田植生のみがわずかに存在し、それも 2096～2100 年には消滅する結果が示された。これらの結果は、地形や将来の気象予測などの環境条件のみに基づいて予測されたものであり、移動分散制限を考慮していない。実際には、現在、雪田植生や高山ハイデ・風衝草原が近傍に全く生育していない範囲に新たにこれらの植生が出現する可能性はあまり高くないと考えられる。また、雪田植生や高山ハイデ・風衝草原の分布が予測された場所に、これらと競合する植生種の増加が予測された場所が存在する。

そこで高山植生の保全対象地の候補を検討するために、まず、高山植生の現在の分布密度（3 次メッシュ内の分布面積の割合）が一定以上である場所について、将来の分布密度を検討し、将来的にも高山植生の生育適地になり得る場所として優先的に保全活動を行うべき場所と、一方で急速に分布面積の割合を減らす脆弱な場所の候補をそれぞれ選定する。その上で、生育適地として選定された場所に、競合する植生種が現在と比べどの程度侵入してくるかを明らかにした。更に、将来の生育適地の分布に登山道と降水量の変化を重ね、登山者による踏み付けや土砂流出の可能性を考察した。

3.5.2. 方法

高山植生の分布推定結果から、優先的に保全すべき場所・脆弱な場所の候補地を選定した方法を表 3.5.1. にまとめた。まず、優先的に保全すべき場所の候補としては、現在高山植生の分布密度が高く（雪田植生 50%以上・風衝草原 20%以上）、かつ RCP2.6/2096～2100 年では分布密度が減少しつつも 10%以上残っている場所を選定した。次に、現在は高山植生の密度が高く（雪田植生 50%以上・風衝草原 50%以上）分布しているが、RCP2.6/2096～2100 年の予測では分布密度が 5%未満の場所を脆弱な場所として選定した。更に、RCP8.5/2046～2050 年の場合は、現在において高山植生が分布していない場所に、将来的に分布を広げることは考えにくいことから、現在高山植生が分布している場所で、かつ RCP8.5/2046～2050 年も高山植生が分布する場所を選定した。なお、ここで用いた閾値は現状の分布状況から判断してそれぞれ設定した。

高山植生と競合する植生種の影響については、RCP2.6/2096～2100 年で保全すべき場所・脆弱な場所として選択された場所と、競合植生と考えられるササと亜高山帯森林植生の分布予測を重ね合わせることで評価した。

シナリオ/時期	現在の分布密度	将来の分布密度	対応策
RCP2. 6/ 2096～2100 年	雪田植生：50%以上 風衝草原*：20%以上	10%以上 10%以上	将来的に分布が可能な場所として優先的に保全
RCP2. 6/ 2096～2100 年	雪田植生：50%以上 風衝草原*：50%以上	5%未満 5%未満	脆弱な場所としてモニタリングを強化し、保全活動を試行
RCP8. 5/ 2096～2050 年	雪田植生：5%以上 風衝草原*：	5%～10% 該当なし	雪田のみがごく小規模に残せる可能性がある場所として優先的に保全

*は高山ハイデ・風衝草原

表 3.5.1. 保全・モニタリング場所選定の方法

3.5.3. 結果と考察

● 優先的に保全を強化すべき場所

図 3.5.1. に、上記の方法により選定された優先的に保全を強化すべき場所、脆弱であると考えられるためモニタリングすべき場所の候補を示す。雪田植生は比布岳から北鎮岳、五色ヶ原、化雲岳からヒサゴ沼付近が将来的にも生育に適して（以下「生育適地」）おり、優先的に保全する場所として選定された（図 3.5.1(a). の白枠）。しかしながら現状でも工藤ら（2014 など）が指摘するように五色ヶ原の雪田植生の衰退とササ・ハイマツの侵入は既に深刻な問題となっており、生育できる条件が維持される場合であっても雪田植生と競合する種の侵入を早期に検出し、刈取りなど積極的な侵入防除対策が必要である。

次に風衝草原の場合は安足間岳周辺、北鎮岳から凌雲岳、旭岳・後旭岳周辺、白雲岳から小泉岳、トムラウシ山頂付近から東斜面側が優先的に保全すべき場所として選定された（図 3.5.1(b). の白枠）。これらは全て主要な登山道を含むメッシュであり、植生の盗掘監視をはじめ、登山道のルート外れや複線化による踏み付けを防ぐための維持管理や補修が必要である。一方で、ルート近傍であれば高頻度のモニタリングが可能であり、植生の衰退や競合種の侵入といった異変の早期発見が期待できると同時に、アクセス性の観点からは競合種の刈取りなどの防除活動が比較的行いやすいと言える。

● 脆弱な場所としてモニタリングを強化すべき場所

高山植生の分布が大きく減少することが予測される脆弱な場所として、雪田草原の場合は愛別岳西斜面付近、黄金ヶ原、オプタテシケ山付近が抽出され（図 3.5.1(a). の赤枠）、高山ハイデ・風衝草原の場合は旭岳から熊ヶ岳北斜面付近、トムラウシ南沼キャンプ指定地付近が抽出された（図 3.5.1(b). の赤枠）。いずれも現在では分布密度が 50%以上だが、将来は全く分布しないと予測される場所（0%）である。「優先的に保全すべき場所」とは対照的に、早期に変化が生じる可能性が高いことから、植生の変化だけでなく、気象条件

(気温、地温、降水量、雪解け日など) や土壌(水分、栄養塩) などのモニタリングを強化し、変化プロセスに関する情報収集を行うことが必要である。

● RCP8.5 の場合の分布予測結果

RCP8.5 の場合、2046～2050 年では白雲岳、小泉岳や北鎮岳周辺の山域に雪田植生の生育が可能な場所が 5～10% の範囲で残る可能性がある(図 3.5.2.)。一方で風衝草原の分布は消滅する。図 3.5.2. の 2046～2050 年の雪田草原の分布予測において、旭岳山頂から西側の斜面にも雪田草原の分布が予測されている。しかし、該当する場所は山体が崩壊し小火口群が点在する場所であり、現在の実測ベースでも雪田草原は存在しておらず、将来的にも分布が拡大する可能性は低いので除外した。雪田草原の分布が予測された理由としては、北海道で最も標高の高い旭岳の山頂を含んでいる場所であり、気象などの環境としては雪田草原の分布適地として予測されたと考えられる。このように、本解析で示した分布予測は、多様な実際の生育環境を反映しきれていないため注意が必要である。

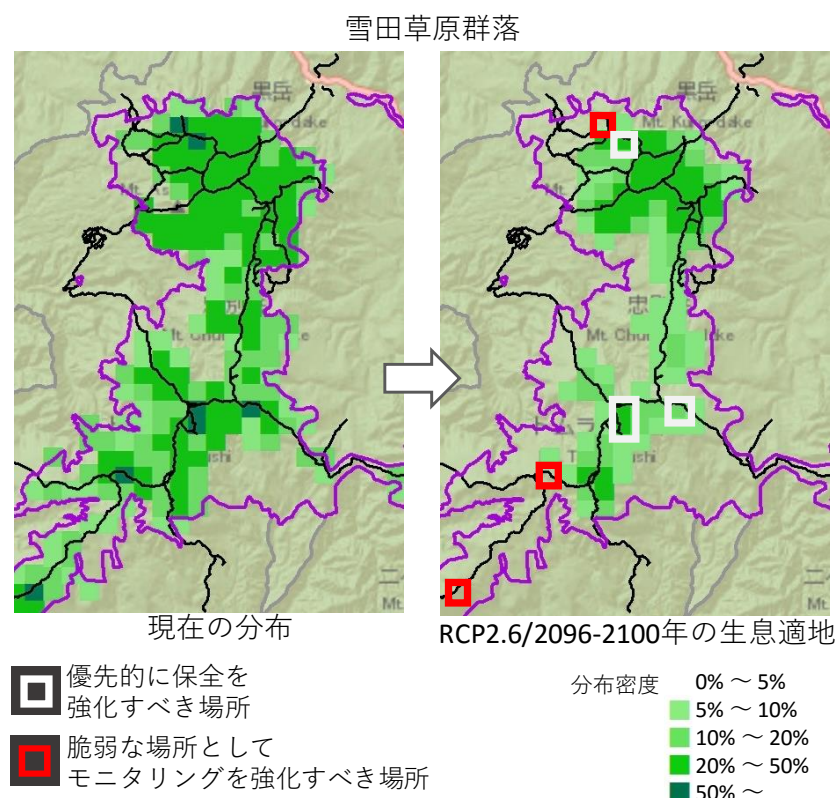


図 3.5.1(a). 雪田草原において優先的に保全を強化すべき場所(白枠)と脆弱な場所としてモニタリングを強化すべき場所(赤枠)の候補

高山ハイデ・風衝草原

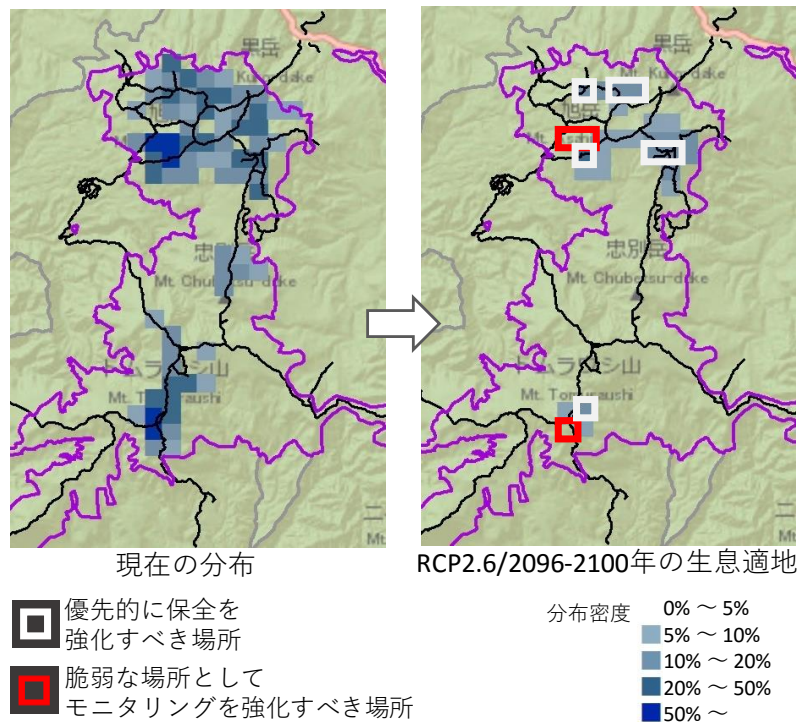


図 3. 5. 1 (b). 高山ハイデ・風衝草原において優先的に保全を強化すべき場所（白枠）と脆弱な場所としてモニタリングを強化すべき場所（赤枠）の候補

雪田草原群落

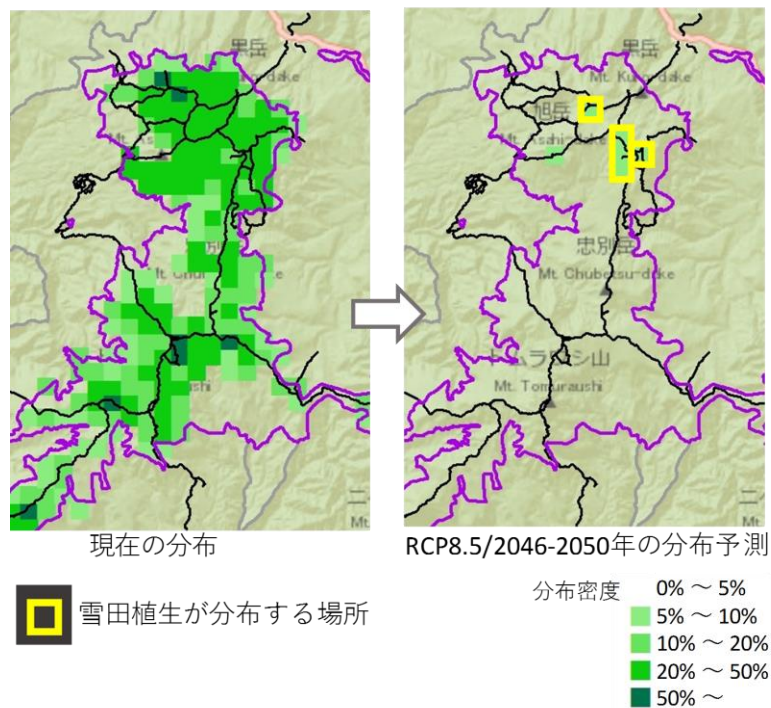


図 3. 5. 2. 2046～2050 年における RCP8. 5 の場合の雪田草原の分布予測結果

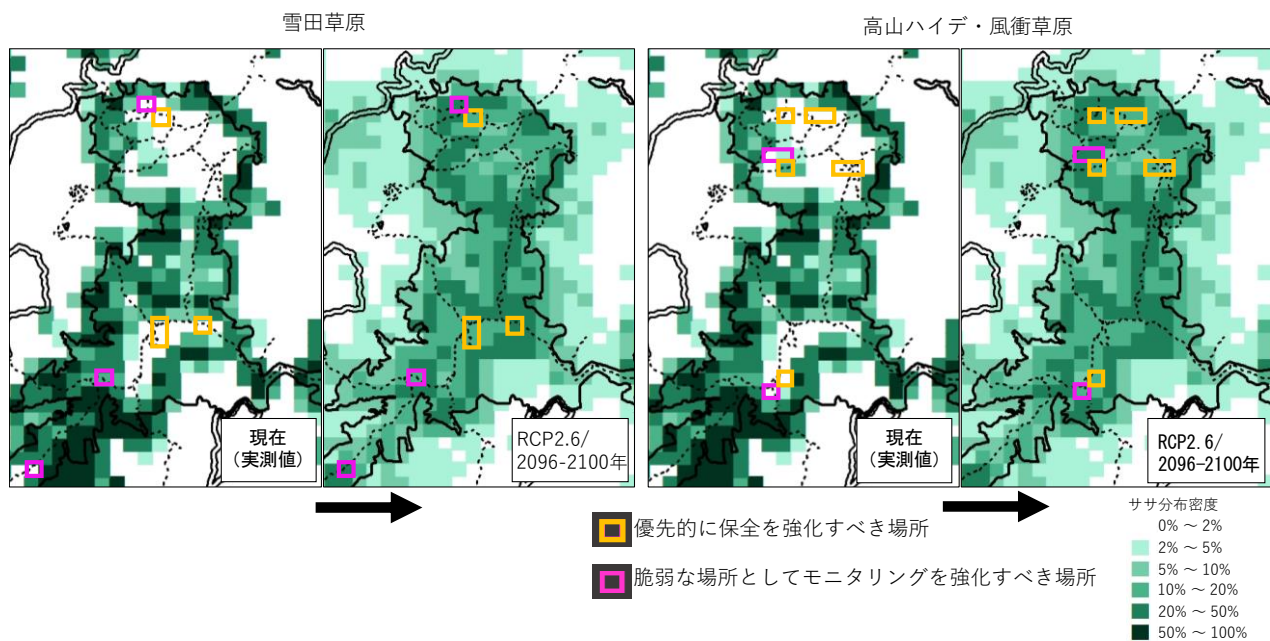


図 3.5.3(a). RCP2.6/2096~2100 年における高山植生の生育適地・脆弱な場所の候補とササの分布密度の予測

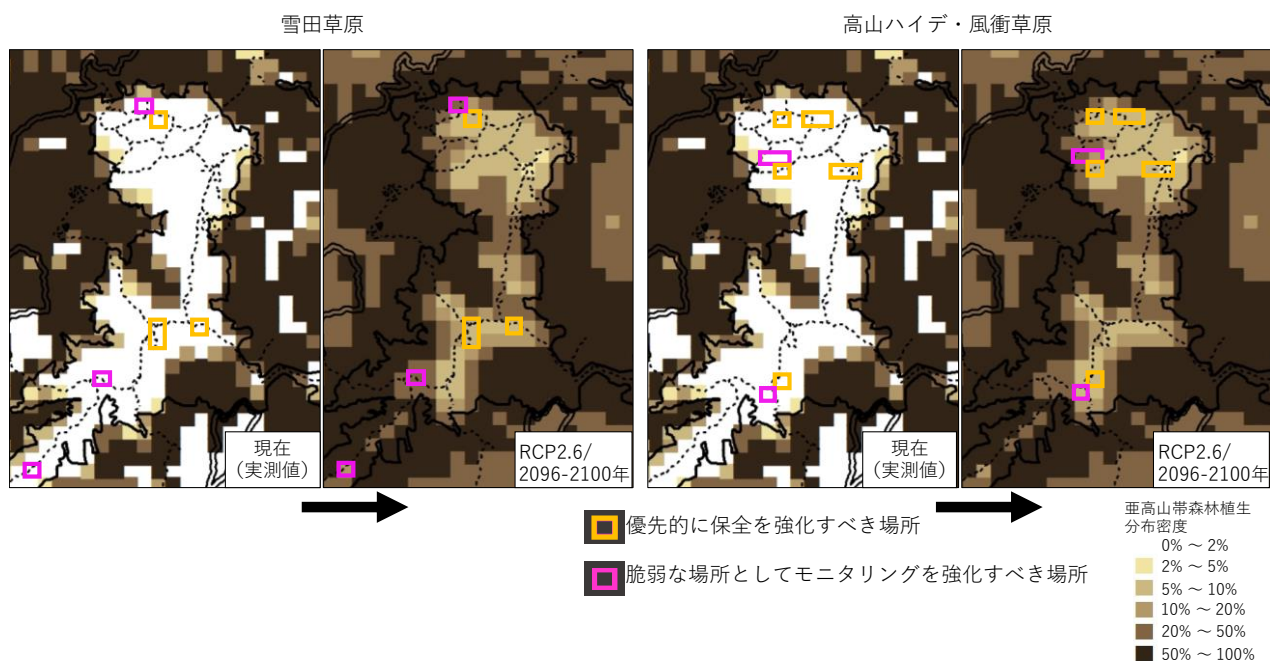


図 3.5.3(b). RCP2.6/2096~2100 年における高山植生の生育適地・脆弱な場所の候補と亜高山帯森林植生の分布密度の予測

- 他の植生種との競合

競合植生種として考えられるササと亜高山帯森林植生の分布密度の予測（RCP2.6/2096～2100年）の上に高山植生の保全を強化すべき場所・脆弱な場所としてモニタリングを強化すべき場所の候補を重ね合わせた結果を図3.5.3.に示す。いずれの適地においても競合する種の増加が予測されていることから、侵入の早期発見と対策を継続する必要がある。

- 管理計画立案に向けたモニタリングと対策の試行

気候変動に伴う高山植生の分布の縮小と、競合する植生種の侵入プロセスや防除などの対策に関しては得られている知見が乏しく、管理計画立案の上で妨げとなっている。一方、RCP2.6 シリオ下では将来的にも高山植生の生育適地となる場所と、脆弱な場所として生育適地が縮小あるいは消滅する場所が選定されており、後者は急速に変化する可能性がある。よって脆弱な場所においては、植生や気象、土壌などのモニタリングの強化を行い、変化プロセスを解明することが重要である。加えて、高山植生と競合する種の刈取りや防除などの対策と評価とを先行的に行い、その結果を基に優先的に保護すべき場所での管理計画立案に反映させることで、効果的な対策を検討していくことが期待できる（図3.5.4.）。

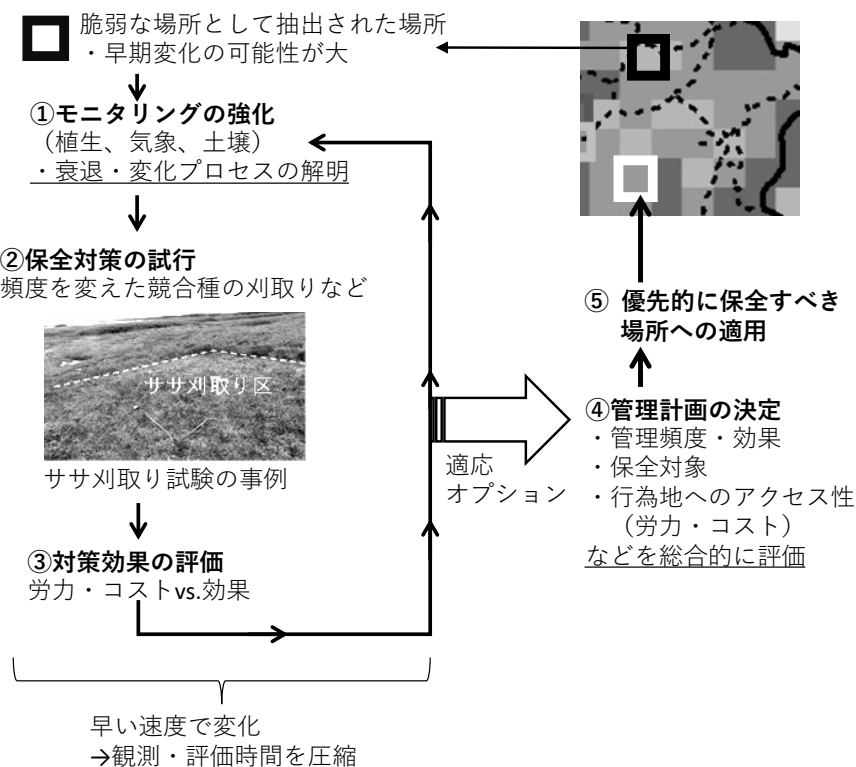


図 3.5.4. モニタリングの強化・対策の試行と管理計画への反映

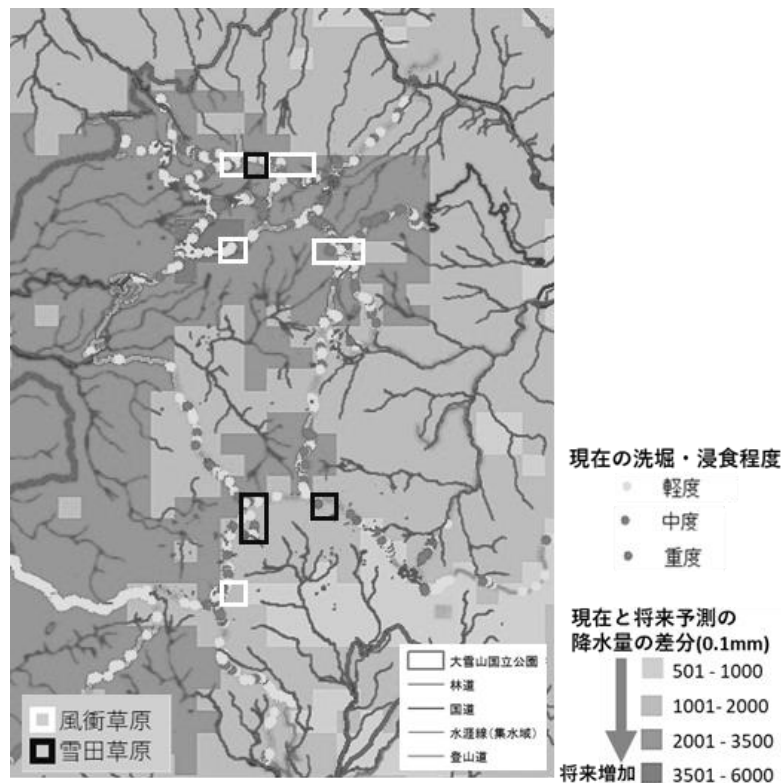


図 3.5.5. 高山植生の分布適地と登山道との位置関係

● 高山植生の生育適地と登山道の管理

生育環境や競合種以外にも植生に影響を与える要因として集中豪雨による土壌浸食や人による踏み付けなどが考えられる。年間降水量において現在と RCP2.6/2096～2100 年の予測との差分に高山植生の生育適地を重ねたものを図 3.5.5. に示す。全域で降水量は増加し、北部ほど増加する傾向となる。特に旭岳周辺では年間 350mm 以上増加する予測となっているが、現在において洗堀や浸食程度が高い登山道沿いに、将来的な高山植生の適地が分布しているため、降水量の増加に伴う登山道からの土砂流出・拡散への対策による登山道の維持管理が重要である。また地面が吸収しきれない水が流れることで、登山道の複線化を促す恐れがあるため、ロープ柵などにより登山道が複線化した場所への踏み外しなどが生じないように登山者を誘導することが必要である。一方、図 3.3.5. によれば、高標高域は将来的にも紅葉の色づきが低下しない事が予測され、紅葉鑑賞のための来訪者が増加する可能性もあることから、一層の登山道管理が必要になる。

また、図 3.5.3. から明らかなように高標高域はササや亜高山帯森林植生の生育適地となることから、登山道周囲のササ刈取りや枝払いの頻度が増す可能性がある。

3.5.4. まとめ

高山植生と競合する植生種の将来予測に基づき、保全対象とすべき場所の候補、脆弱な場所としてモニタリングを強化すべき場所の候補を示した。今回の選定は対象植生種の分布密度に閾値を設けることで、高山植生の減少が比較的緩やかな場所・著しい場所を選定した。閾値の決定方法によって保全・モニタリングを行うべき場所の候補は増減するが、特別保護地区外や大雪山国立公園の隣接した場所に、新たな生育適地が増えることはなかった。閾値の決定方法をはじめ、競合種の分布予測や移動分散制限を取り入れ、適地選定の手法を高度化することが今後の課題である。また、今回の解析においては、分布推定において重要である積雪に関するデータのダウンスケーリングの限界から、実際には 3 次メッシュよりも小規模な逃避地の抽出ができていない。今後、気候変動予測データの高解像度化により、更に小規模な対策候補地の抽出を可能とすることが望まれる。

3.6. 地元関係者への成果報告とアンケート調査

3.6.1. 目的

平成 28 年度及び 29 年度の本業務にて得られた気候変動が大雪山国立公園に及ぼす影響と適応策について説明資料を作成し、大雪山国立公園登山道関係者による情報交換会にて成果報告とアンケート調査を通じて、内容の理解や報告内容の有益性について検証した。

3.6.2. 説明素材の作成

説明素材の作成に際しては、まず将来の温室効果気体の排出量は複数のシナリオがあり、それに基づき気候変動を予測し、最後に生態系の変動を求めるといった複雑な手順があり、それぞれに不確実性が含まれていることを理解できるよう、不確実性に関するスライドを全 28 枚中説明 2 枚、結果 2 枚作成し、説明会でも重点的に説明した。また、将来の分布（不適地として選択された場所は必ずしもすぐに植生が変化するのではなく、時間差を持って変化することも詳しく説明した（付録 1）。

3.6.3. 大雪山国立公園登山道関係者による情報交換会での説明及びアンケート調査

関係者への説明とアンケート調査は「大雪山国立公園登山道関係者による情報交換会」の参加者を対象に実施した。大雪山国立公園は 1 市 9 町に及ぶ日本最大の山岳国立公園であり、関係者は多岐に渡る。そのため、関係者が一堂に会する機会は限られているが、「大雪山国立公園登山道関係者による情報交換会」は表大雪地域と東大雪地域で年 2 回（春期：山開き前、冬期：山開き後）開催される関係者が集まる数少ない機会である。情報交換会では登山道に関する情報のみならず、野生生物の保護管理対策や観光客の利用状況、イベント情報などが関係者に共有される。後述の通り、本業務では情報交換会の時間を一部拝借し、気候変動による影響や予測等を関係者に説明するとともに、本節で紹介するアンケート調査（アンケート調査の説明・アンケート票の配布）を実施した。そのため、この気候変動業務に関する話題の前に、各関係者から 2017 年度の業務内容や課題・問題、今後のイベント予定などの情報交換が行われていることをここに記する。

● アンケート調査

アンケート調査は表大雪地域および東大雪地域の双方において以下の手順で実施した。なお、発表を実施した研究者およびそのスライドは両地域で同一である。

- 1) 配布資料として返信用封筒に入れたアンケート票を配布
- 2) 国立環境研究所の研究者が説明素材を用いて気候変動予測等を報告
- 3) 質疑応答
- 4) 後日、郵送にてアンケート票を回収

付録2のアンケート票が示すように設問項目は大きく分けて、①今回の報告内容について、②大雪山との関わりについて、③大雪山における気候変動への対策について、④個人属性の4部から構成されている。

● サンプルング

前述のようにアンケート票は表大雪地域（2017年12月13日）および東大雪地域（2017年12月25日）の情報交換会において配布した。配布枚数は表大雪地域で59部、東大雪地域で14部であり、回収枚数はそれぞれ28部（回収率47.5%）と8部（57.1%）であった。個人属性を付録2-表1にまとめる。回答者の多くは男性であり（83.3%）、平均年齢は45.8歳であった。また情報交換会の特性上、回答者のうち18人は公務員、7人はガイドに所属している。

3.6.4. 結果

本報告書では紙面の関係から①今回の報告内容と③大雪山における気候変動への対策について、関係者の意識を中心に報告する。なお、各設問の単純集計については付録2を参照されたい。

● 今回の報告内容について

今回の報告に対し、回答者に報告内容の有益性について、5段階のリッカートスケールによる設問で尋ねたところ、回答者の過半数以上からは今回の内容は今後の気候変動への対策を考える上で「とても役に立つ」、「役に立つ」との回答が得られた。続いて、同様の報告に対する満足度に関する設問では、回答者の過半数以上は「とても満足した」、「満足した」との回答が得られた。満足度に関する回答理由として、満足度が高かった回答者からは以下のような意見が聞かれた。

- 温暖化による影響の予測を目に見える形で登山道関係者に提示できたことがよかった。
- 現状の問題点が、まず明確になった。
- 研究精度はともあれ、温暖化の影響について当方の知りたい方向で研究されていると思った。

一方、満足していないとの回答理由としては以下のような理由が挙げられた。

- 不確実性の説明が予測の外れたときの言い訳のように聞こえた。
- 興味深い報告だが不確実性が大きくどこまで受け止めるべきか悩ましい。
- 新たな発見があり、とても有益でしたが、今後の活動を左右するものではなかった。

以上より、報告に対する有益性および満足感は一定の評価を得られたものと考えられる一方、不確実性に対する懸念等が報告内容への満足度を低下させていることが示唆された。

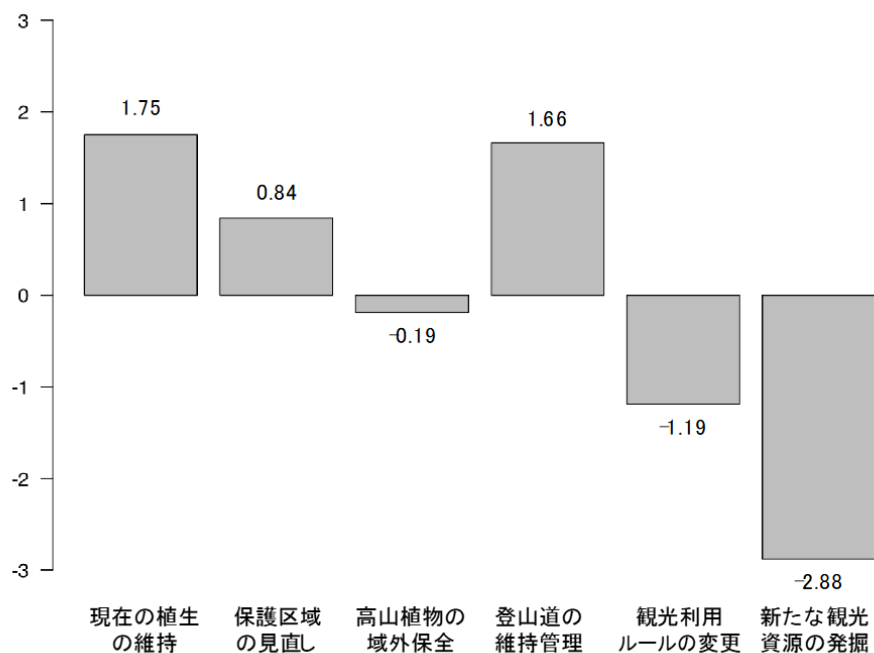


図 3. 6. 1. 気候変動対策に対する回答者の BWS スコア (平均値)

● 気候変動対策に対する関係者の意識について

ここでは大雪山における気候変動への対策に対する関係者の選好を環境評価手法（ベスト・ワースト・スケーリング：BWS）を用いて聴取した結果を報告する。なお、ここでは紙面の関係から手法（BWS）についての説明は省略するが、本アンケート調査では最もシンプルかつ実務でも用いられているケース 1 のカウンティングによる分析を採用している

（Louviere et al. 2015）。以下で示されている BWS で算出されたスコア（BWS スコア）は数値が大きい方が、回答者がより優先度が高い気候変動対策だと考えていることを示している。

図 3. 6. 1. は各対策に対する回答者の平均的な BWS スコアを示している。回答者から最も優先度が高いと評価された対策は、「現在の植生の維持」であった。次いで、「登山道の維持・管理」、「保護区域の見直し」、「高山植物の域外保全」、「観光利用ルールの変更」、「新たな観光資源の発掘」の順であった。

続いて、図 3. 6. 2. は回答者を職業別に分けた上で、適応策に対する選好を分析した結果（BWS スコア）を示している。行政関係者および NPO/NGO は、最も優先度が高い対策に「現在の植生の維持」をあげた一方、ガイド・観光業に携わる回答者は、「保護区域の見直し」を、研究者およびその他の方は「登山道の維持・管理」を最も優先度が高い対策であると評価した。

サンプル数が限られていることから統計解析等による職業間の選好の差を検定することは避けるが、職業等によって対策に対する考え方に違いがあることが示唆される。

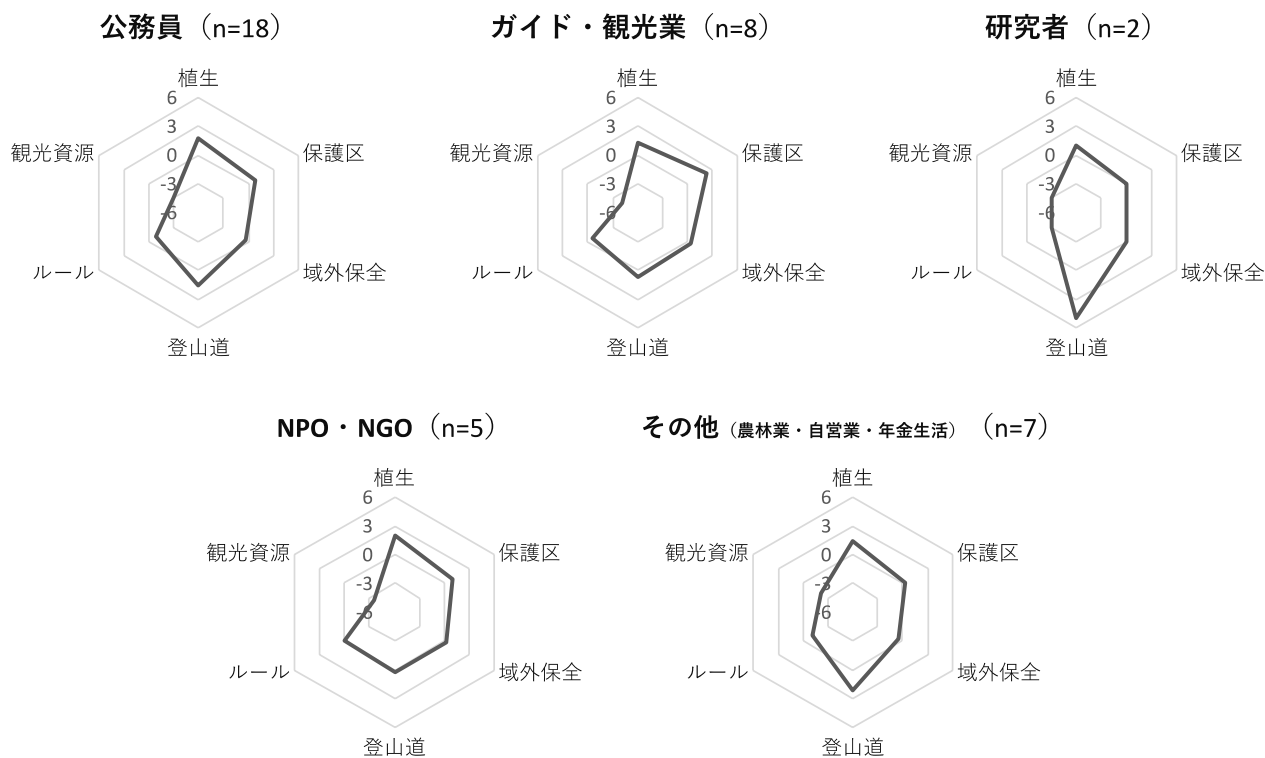


図 3.6.2. 適応策に対する選好の職業別 BWS スコア平均値

3.6.5. まとめ

本節では、「大雪山国立公園登山道関係者による情報交換会」への参加者を対象としたアンケート調査から、気候変動が大雪山国立公園に及ぼす影響について関係者と共有し、その適応策に関して理解および協力が得られるかどうか、その現状や今後の可能性等について把握を試みた結果を報告した。

報告に対する有益性および満足感は一定の評価を得られたが、不確実性に対する懸念等が報告内容への満足度を低下させていた。適応策の合意形成をはかる上で将来予測の不確実性の説明は不可避であり、その説明ぶりには一層の検討が必要であることが分かった。このような情報共有は関係者にとって有益であることが示唆された一方、不確実性に対する考え方や関係者間の認識の違いなど、今後検討が必要な課題も散見された。今後は前述の課題解決を目指すとともに、大雪山国立公園を訪れる観光客や大雪山周辺に住む住民など、より幅広い関係者に対して同様の説明や調査、情報交換等が求められるだろう。

3.7. モデル保護区での追加調査・予測及び成果還元のまとめと今後の課題

本業務では、平成 28 年度業務のモデル保護区である大雪山国立公園を対象とした追加的な情報収集と解析を行うとともに、地元関係者に対して気候変動が大雪山国立公園に及ぼす影響及び適応策について情報提供しその効果について検証した。以下に重要な項目についてまとめた。

高山植生の生育適地の縮小・消滅

- RCP8.5 による 2096～2100 年の予測では、雪田植生、高山ハイデ・風衝草原ともに分布は消滅し、亜高山帯森林植生の生育適地となる。特別保護地区外や大雪山国立公園内に隣接した場所に新たな高山植生の生育適地ができる可能性は低い。

対応案：

- 該当区域の詳細な植生調査を行い、固有種等の域外保全を検討する。

- RCP2.6 による 2096～2100 年の予測では、面積を減らしながらも高山植生の生育が可能な場所がある。同時に競合する植生種の分布比率も増加する。

対応案：

- 急激に生育面積を減少させる「脆弱な場所」では、植生と気象、土壌環境等のモニタリングを強化し、高山植生が衰退する原因を解明し、競合する植生種の侵入プロセスに関するデータを収集する。
- 競合する植生種の刈取りなどを試行し、対象地の高山植生の保全を行うと共に効率的な管理方法を確立させる。それを「将来的にも生育可能な場所」に適用することで、労力を最小限に抑えつつ効果的な保全を可能とする。

- 将来的にも高山植生の生育適地として選択された場所は、高標高域の登山道周辺に分布している。

対応案：

- 外来種や低標高域に分布する植生の種子の持ち込み防止対策を徹底する。
- 盗掘の監視や未然に防ぐための啓発を行う。
- 登山道の洗堀や浸食にともなう土砂流出・拡散を抑えるための維持管理や、利用者による破壊を防ぐためのロープ柵などによる誘導を行う。

- RCP8.5/2096～2100 年では紅葉の色づきが低下し、1500m 以上の高標高域よりも 1500m～1000m の標高域において色づきが低下することが予測される。一方、紅葉の開始時期は早まる傾向にあるが、予測結果には多くの不確実性が残る。

対応案：

- 紅葉の見どころが高標高域に移動する可能性があり、紅葉鑑賞スポットの再配置やアクセスの整備を行う。同時に高標高域の登山道管理・過剰利用に配慮する。
- 紅葉開始時期の変化に伴い、マイカー規制等の時期を変更する。
- 紅葉に関する調査データが不足しており、予測精度の改善のためにモニタリングを強化する必要がある。

登山道の荒廃

- 登山道の荒廃に影響を与える降水量は特別保護地区内を含む範囲で将来的に増加し、特に旭岳周辺で顕著である。

対応案：

- 高山植生の生育適地や、紅葉の色づき低下が軽度な場所は全て高標高域に分布することが予測され、利用者が集中する可能性がある。一方で降水量の増加が予測されることから、大雪山国立公園における登山道整備技術指針 2016 年改訂版」(平成 28 年 3 月環境省北海道地方環境事務所) に示された登山道における土壌の浸食防止方策よりも、浸食防止効果がある登山道の整備及び維持管理手法がないか検討する必要がある。
- 特別保護地区内では将来的にササや亜高山帯森林植生の増加が予測されている。

対応案：

- 登山道周辺のササの刈取りや枝払いなどの頻度が増える可能性がある。

合意形成のための地元関係者への説明と説明素材

- 将来予測には不確実性が伴うこと、高山植生の分布予測は、分布に適した環境を予測しているものであり、必ずしも植生分布そのものではないことについて素材を多くし、時間を割いて説明したが、アンケートでは信憑性について疑問を持たれたほか、シナリオによる予測の幅が大きいことに混乱したという回答があった。

対応案：

- 正しい理解と合意形成をはかるためにも将来予測の不確実性については分かりやすく説明することが重要である。更に、不確実性を抑える努力を継続する必要がある。

今後の課題

- 気候予測モデル
 - 高山生態系の空間分布に対し、現状入手可能な気候予測データのサイズが 3 次メッシュ (約 1 km²) であり、詳細な植生の分布推定や小規模な逃避地の検出には限界がある。雪田や風衝地は斜面方位や微地形に応じモザイク状に分布しており、その中で高山植物は積雪傾度に沿って種ごとに適した場所で分布している。複雑

な地形をもつ山岳域においては、図 3.7.1. に示すように 3 次メッシュ内には様々な標高値や斜面方位が存在するほか、同じメッシュ内には雪田や風衝地、森林などもそれぞれ混入し、更に積雪量や残雪も不均一である。よって現状の将来予測データの解像度では、現実的な対策場所・範囲を提示することができない。

- 登山道や周辺の林道の荒廃状況に影響を与える要因として、最も寄与するのは降水量であったが、本解析で用いた気象モデルでは台風や集中豪雨などの発生頻度は予測することができない。そのため、極端現象の発生頻度や強度の将来的な変化を予測したデータの入手が必要である。

- 高山植生の分布推定、季節変化

- 今回用いた分布推定モデルでは、移動分散制限や種間競争を考慮していない。現実にササ群落や森林植生が現在の高山植生帯に侵入するまでには、地下茎の伸長、種子散布、稚樹の定着・成長などのプロセスがあり、実際の変化は、今回の予測結果よりも時間遅れを伴う可能性が高い。これらのプロセスに掛かる時間を推定するためには、伸長速度や散布距離を考慮したモデルが必要である。更に今回の推定では種間競争を考慮していないため、高山植生が生理的に生育可能な範囲を過小推定している可能性がある。
- 気候変動に伴う高山植生衰退の主な要因としては、高山植物自体が高温に生理的に耐えられない場合と、温度上昇・積雪期間の短縮によってササなどの競合する他の種が侵入してくることの 2 つが考えられる。いずれの影響が大きいかは、種によって異なるが、ある程度高温耐性のある種もあると考えられる。その場合、草刈り等によって他種の侵入を抑えれば、現在の生育地で保全できる可能性もある。しかし、どの植物種がどの程度の高温に対する耐性を持っているかは十分な知見がなく、適応策を検討する上で重要な研究課題である。
- 高山植生の開花時期が変化することが指摘されている。高山帯の「お花畑」は利用面での重要項目の一つであるほか、開花時期と訪花昆虫との関りも含め調査・研究をすべき課題である。

- 紅葉モニタリング情報の不足

- 大雪山国立公園では 2011 年度から環境省によるモニタリングサイト 1000 高山帯調査が開始された。黒岳、赤岳の風衝地と雪田の 4 カ所で調査が行われているが、紅葉は調査対象ではなく、高山帯の紅葉を解析するためのデータが不足している。本解析での紅葉の将来予測には大雪山以外の立山（北アルプス）や極楽平（中央アルプス）のデータも合わせてモデル構築を行った。また、ウラジロナナカマドを対象種としたが、それ以外の矮性低木群落など、紅葉時の景観要素となる植生種のモニタリングデータが不足しており、将来予測のためにもモニタリングデー

タの蓄積が必要である。

- 利用面での調査

- 国立公園の利用者の来訪目的や移動手段（必要経費等）と、来訪により得た満足など、利用者サイドからの調査を検討する必要がある。

- ビジターセンターにおける過去データの活用

- 気候変動に対する生態系の応答を明らかにするためには長期間のモニタリングが必要不可欠である。特に高山帯における知見は不足しており、モニタリング体制の構築と実施が喫緊の課題である。一方、過去からの観測記録を活用することで、対象地における長期変動の抽出や、開花時期や紅葉時期と気象条件との関係などを明らかにすることが期待できる。大雪山周辺では、層雲峡ビジターセンターや旭岳ビジターセンターにおけるヒアリングにて、1990年代後半からの膨大な現地記録が残されていることが明らかとなった。具体的には登山道沿いの融雪状況、高山植物の開花状況、鳥、昆虫、動物の記録、定点撮影などであり、高頻度な調査記録が残されている。これらは生態系の気象応答や長期変化を解析する上で極めて有効と考えられる（図 3.7.2.）。過去記録の散逸や紛失を防ぎ、長期間の変動を抽出するためにも現地の調査記録の確認とデータベース化を急ぎ検討する必要がある。

- 順応的管理の導入

- 脆弱な環境として抽出された場所でのモニタリングの強化、モニタリング結果を踏まえた予測技術の高精度化、対策効果の評価と改善を循環させる順応的管理の概念に基づいた適応策の導入を行うことが望ましい（図 3.7.3.）。早期に高山植生の衰退が予測される「脆弱な場所」における順応的管理の試行をはじめ、モニタリング技術や各予測モデルの高度化、計算処理速度の高速化により将来予測の不確実性の低減と高解像度化が可能となり、対象地を絞り込んだ管理計画の立案が期待される。

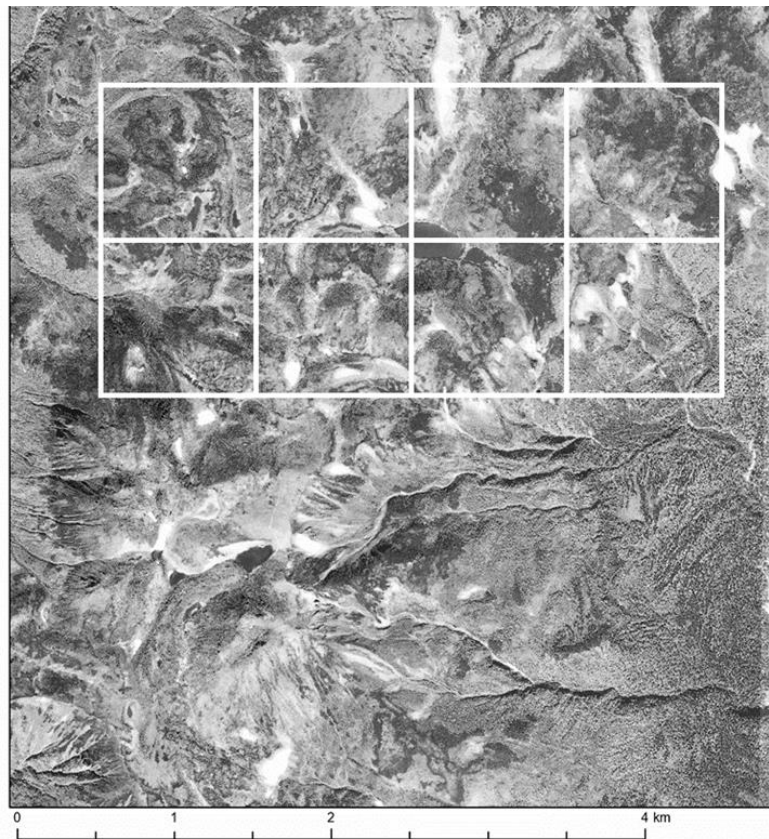


図 3. 7. 1. 現状の解析メッシュサイズ（3次メッシュ）と大雪山ヒサゴ沼周辺の様子

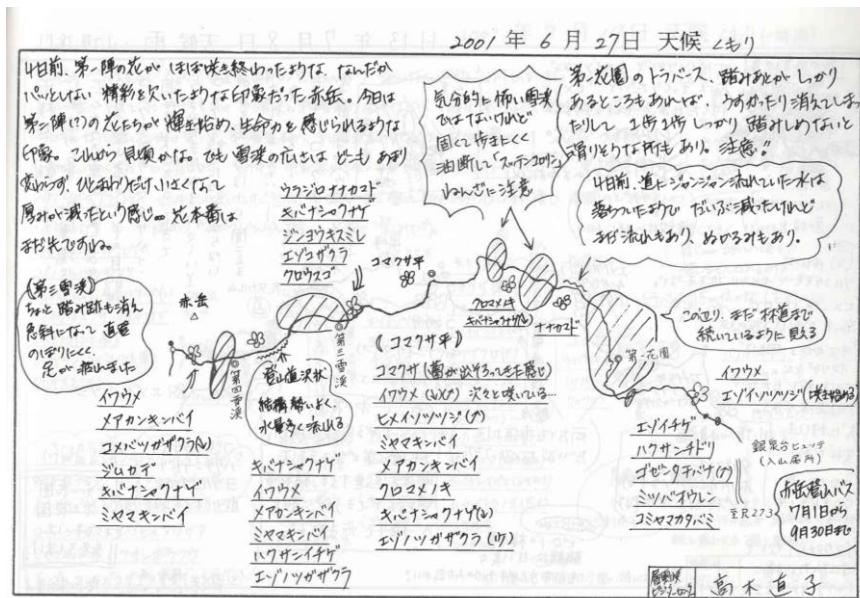


図 3. 7. 2. ビジターセンターに保存されている過去植生記録の例：

イトナンリルウ（層雲峡ビジター提供）

登山道沿いの開花状況や積雪の状態などが数日間隔で調査されている。

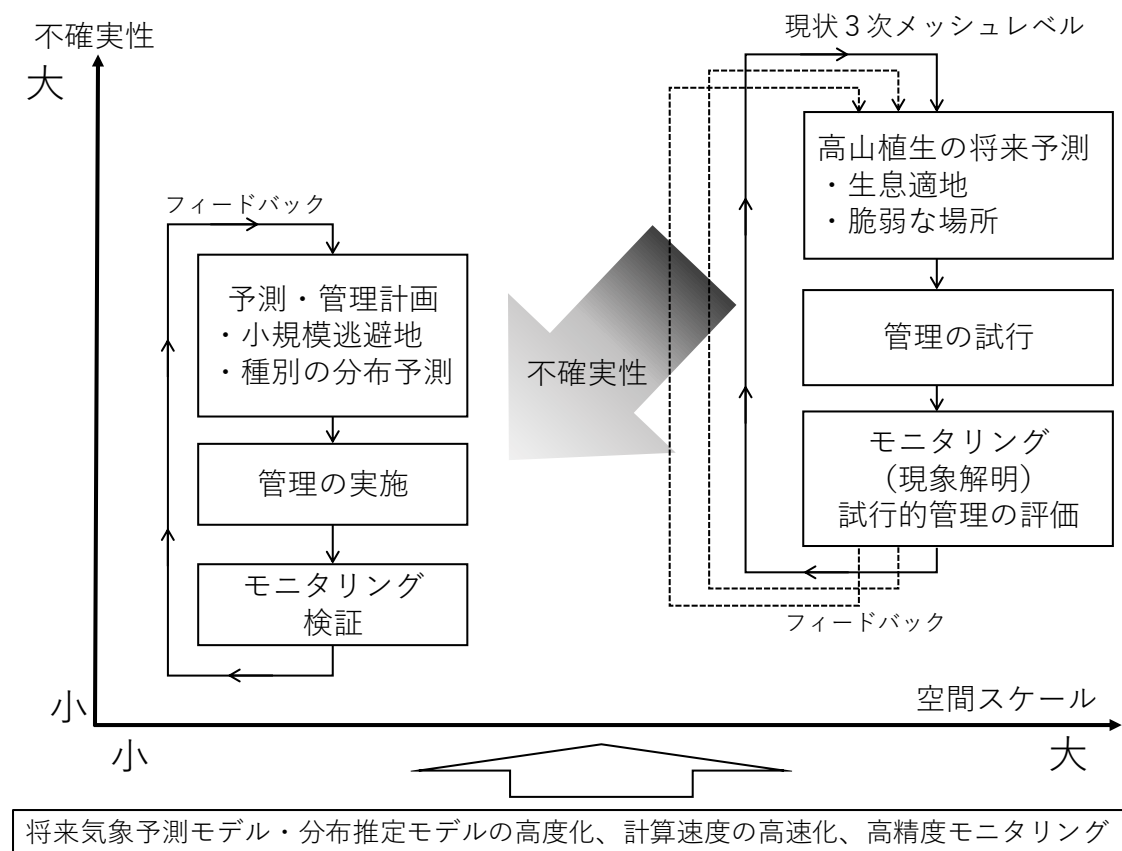


図 3.7.3. 順応的管理の概念

引用文献

- 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.
- Holling C.S. ed. (1978) *Adaptive Environmental Assessment and Management*. Wiley, London.
- Hulber, K., Wessely, J., Gattringer, 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 Biol.* 22, 2608-2619.
- Lawler, J.J., White, D., Neilson, R.P., Blaustein, A.R., 2006. Predicting climate-induced range shifts: model differences and model reliability. *Global Change Biol.* 12, 1568-1584.
- Louviere, J. J., Flynn, T. N., Marley, A. A. J. (2015) *Best-worst scaling: Theory, methods and applications*. Cambridge University Press

- Marmion, M., Parviainen, M., Luoto, M., Heikkinen, R.K., Thuiller, W., 2009. Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. *Divers. Distrib.* 15, 59-69.
- 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. *Divers. Distrib.* 21, 111-122.
- Beck PSA, Atzberger C, Hogda KA, Johansen B, Skidmore AK (2006) Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. *Remote Sens Environ* 100: 321-334. DOI: 10.1016/j.rse.2005.10.021
- Doi H, Takahashi M (2008) Latitudinal patterns in the phenological responses of leaf colouring and leaf fall to climate change in Japan. *Glob Ecol Biogeogr* 17: 556-561. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2008.00398.x
- Liu Q, Fu YSH, Zhu ZC, Liu YW, Liu Z, Huang MT, Janssens IA, Piao SL (2016) Delayed autumn phenology in the Northern Hemisphere is related to change in both climate and spring phenology. *Glob Chang Biol* 22: 3702-3711. DOI: 10.1111/gcb.13311
- Meng FD, Cui SJ, Wang SP, Duan JC, Jiang LL, Zhang ZH, Luo CY, Wang Q, Zhou Y, Li XN, Zhang LR, Dorji T, Li YN, Du MY, Wang GJ (2016) Changes in phenological sequences of alpine communities across a natural elevation gradient. *Agr Forest Meteorol* 224: 11-16. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.04.013
- Ohashi H, Kominami Y, Higa M, Koide D, Nakao K, Tsuyama I, Matsui T, Tanaka N (2016) Land abandonment and changes in snow cover period accelerate range expansions of sika deer. *Ecology and Evolution* 6: 7763-7775. DOI: 10.1002/ece3.2514
- Park CK, Ho CH, Jeong SJ, Lee EJ, Kim J (2017) Spatial and temporal changes in leaf coloring date of *Acer palmatum* and *Ginkgo biloba* in response to temperature increases in South Korea. *Plos One* 12. DOI: 10.1371/journal.pone.0174390
- R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Frank E Harrell Jr (2017). rms: Regression Modeling Strategies. R package version 5.1-1. <https://CRAN.R-project.org/package=rms>
- 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.
- 大雪山国立公園における登山道利用者数調査：平成 28 年度調査結果 (2018) 環境省 <https://www.env.go.jp/park/daisetsu/data/tozandoriyosya2016.html>
- 日本生態学会 編 (2004) 生態学入門. 東京化学同人
- 平成 25 年度大雪山国立公園整備計画策定等基礎調査業務報告書 資料編 山岳資料 05 登山道・GIS データ類 4. 参考・表計算ソフトウェアファイル・登山道地点データの集計・凡例 (2014) 北海道地方環境事務所株式会社ニュージェック
- 平成 28 年度環境省請負業務 平成 28 年度生物多様性分野における気候変動への適応策

- 検討業務報告書（2017）国立研究開発法人国立環境研究所
- 宮川浩・小澤一雄（2008）. 中高年登山・百名山ブームと登山道整備の課題. 渡辺悌二編集
自然公園シリーズ1 登山道の保全と管理 pp26-39 古今書院, 東京都.
- 渡辺悌二（2008）. 登山道荒廃の現状とその原因. 渡辺悌二編集 自然公園シリーズ1
登山道の保全と管理 pp26-39 古今書院, 東京都.

4. 沿岸生態系に関する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

4.1. 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・海象、海底地形、植生、流域の土地利用、水質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 4.1.1. 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。また、衛星観測や数値シミュレーションの再解析データが整備されている（表 4.1.2. ～4.1.4.）。

表 4.1.1. 我が国における主な空間基盤情報

項目	整備機関	入手先
気象	気象庁	http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php
気象	JMBSC	http://www.jmbsec.or.jp/jp/online/f-online0.html
海洋環境	気象庁	http://ds.data.jma.go.jp/gmd/goos/data/rrtdb/jma-pro.html
海洋環境	JAMSTEC/ MRI	http://synthesis.jamstec.go.jp/FORA/
陸上地形	国土地理院	https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php
海底地形	JODC	http://www.jodc.go.jp/data_set/jodc/jegg_intro_j.html
流域の土地利用	国土交通省	http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html

□JMBSC（気象業務支援センター）、JAMSTEC（国立研究開発法人海洋研究開発機構）、MRI（気象庁気象研究所）、JODC（日本海洋データセンター）

表 4.1.2. 衛星観測による気象パラメータのプロダクトの一例

項目	整備機関	入手先
気温	JAXA	http://www.eorc.jaxa.jp/JASMES/index_map_j.html
PAR（光合成有効放射）	JAXA	http://www.eorc.jaxa.jp/JASMES/index_map_j.html
UV-B（短波長紫外線）	JAXA	http://www.eorc.jaxa.jp/JASMES/index_map_j.html
熱フラックス	東海大学	https://j-ofuro.scc.u-tokai.ac.jp/

□JAXA（国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構）

表 4.1.3. 衛星観測による海象・水質のプロダクトの一例。数値データのダウンロードができるものを示した。

項目	整備機関	入手先
海面水温	気象庁	http://ds.data.jma.go.jp/gmd/goos/data/rrtdb/jma-pro/him_sst_pac_D.html
海面水温	NOAA	https://www.ncdc.noaa.gov/oisst
海面水温	NASA	https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/index.html?page=1&itemsPerPage=1000
海面水温	東海大学	https://j-ofuro.scc.u-tokai.ac.jp/
海上風速	東海大学	https://j-ofuro.scc.u-tokai.ac.jp/
熱フラックス	東海大学	https://j-ofuro.scc.u-tokai.ac.jp/
CDOM	NOAA	https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/index.html?page=1&itemsPerPage=1000
Chlorophyll <i>a</i>	NOAA	https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/index.html?page=1&itemsPerPage=1000
K490	NOAA	https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/index.html?page=1&itemsPerPage=1000

□NOAA（アメリカ海洋大気庁）、NASA（アメリカ航空宇宙局）

表 4.1.4. 日本周辺を考慮している海洋の再解析モデルの一例。空間解像度は最も細かいモデルでの値を示した。

モデル名 プロダクト名	整備機関	空間解像度	引用文献
DREAMS	九州大学	1/12 度	Hirose et al. (2013)
FORA-WNP30	MRI, JAMSTEC	1/10 度	Usui et al. (2017)
FRA-ROMS	FRA	1/10 度	Kuroda et al. (2017)
HYCOM	NOPP	1/12 度	Chassignet et al. (2007)
JCOPE2M	JAMSTEC	1/12 度	Miyazawa et al. (2017)
JCOPE-T-NEDO	JAMSTEC	1/36 度	Varlamov et al. (2015)

□MRI（気象庁気象研究所）、JAMSTEC（国立研究開発法人海洋研究開発機構）、FRA（国立研究開発法人水産研究・開発機構）、NOPP（National Ocean Partnership Program）

4.2. 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（GCM：Global Climate Model）を用いた将来の水温等の海洋環境に関する出力結果の空間解像度は通常数 10～100 km 程度である（表 4.2.1.）。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、サンゴ（サンゴ礁）や海草・海藻類（藻場）など分布が限られた生物・生態系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、気候モデルの出力結果を用いた力学的もしくは統計的ダウンスケーリングが必要である。また、高い鉛直解像度の確保についても沿岸域では重要であると考えられる。

気候変動シナリオは温室効果ガスの排出経路による複数のシナリオがあり、IPCC 第 5 次報告書（<https://www.ipcc.ch/report/ar5/>）においては RCP シナリオ（RCP2.6、4.5、6.0、8.5）が用いられている。沿岸生態系に関する評価のために用いる海洋環境のデータセットとしては①空間解像度が数 km 以内であること、②複数の RCP シナリオでの出力結果が整備されていること、③複数年における予測結果が存在していること、が望ましいが、陸域と比較して沿岸域ではこのようなデータセットで現在利用できるものはみられない。

表 4.2.1. 気候モデルで用いられている海洋モデルの空間解像度の例

モデル名	整備機関	海洋モデルの空間解像度	引用文献
MIROC4h	JAMSTEC, AORI, NIES	0.28×0.19 度	Sakamoto et al. (2012)
MIROC5	JAMSTEC, AORI, NIES	1.4×0.5-1.4 度	Watanabe et al. (2010)
MIORC-ESM	JAMSTEC, AORI, NIES	1.4×0.5-1.4 度	Watanabe et al. (2011)
MRI-CGCM3	MRI	1×0.5 度	Yukimoto et al. (2012)

□JAMSTEC（国立研究開発法人海洋研究開発機構）、AORI（東京大学大気海洋研究所）、NIES（国立研究開発法人国立環境研究所）、MRI（気象庁気象研究所）

4.3. 地域規模の海洋環境の現況再現・将来予測

沿岸域の生態系の動態の評価や保全のスケールを考えた場合、数百 m 以内の解像度が求められ、そのような高解像度のデータセットの整備が重要である。定地での水温等の連続観測は岸近くで測定することが可能であるものの、広域を網羅することは現実的でない。一度に広域を観測することができる衛星は細かいもので 1km 程度の解像度である。また、データ同化を組み込んだ再解析モデルは数～十数 km の解像度のものがほとんどである。さらに、将来予測は良くて数 km、ほとんどは 10～100 km 程度の粗い解像度となっている。そこで、数値モデルを用いて対象域の海洋環境のシミュレーションを行うことで、必要となるデータセットを整備することができる。

複雑な海底地形を有する地域や島嶼周辺の流れは空間解像度が粗いモデルでは表現することができない。また、小規模な河川水の流入などの陸域負荷も気候モデルでは考慮されていない。沿岸域では空間的にも時間的にも物理場の変動が大きく（柳，1989）、解像度の粗い気候モデルの結果を補間するだけでは十分に沿岸域の環境を表現できない。そこで、方程式を差分化し、数値的に解くことで物理場の時空間変動を力学的に予測解析することができるようになる。沿岸域を対象とする流動モデルの基礎式の導出するにあたっての基本的な前提条件は以下の通りである（横山，1993）。

- ① 海域の流れを駆動する要因は、潮汐、密度傾度、沿岸からの河川水の流入及び海上を吹く風の応力である。
- ② 流体は回転地球上の粘性非圧縮流体として扱う。
- ③ 地球の回転効果を表すコリオリのパラメータは計算領域全体で一定とする（ f -平面近似）。
- ④ 鉛直方向には静力学平衡を仮定し、運動を無視する。すなわち重力加速度と圧力傾度が静的に釣り合っているとみなす。
- ⑤ 海面における熱フラックスは、短波放射量、正味の長波放射量、海面での顕熱輸送量（乱流による熱伝導量）及び潜熱輸送量（水の相変化に伴う熱の出入り）の収支として定式化する。
- ⑥ 密度と水温及び塩分の関係式（状態方程式）としては Knudsen の式を用いる。
- ⑦ 鉛直方向には、各層で平均化された諸状態量（流向流速、温度、塩分など）を予測計算していく。

入れ子状態のモデルを用いることで、外洋域の影響を考慮した形で沿岸域の物理環境を表現できるようになる（Guo et al., 2002）。また、流動モデルにより流向流速の計算結果が得られると、移流・拡散方程式によりトレーサの濃度変化（Lu & Turco, 1995）や、幼生の分散シミュレーション（Miyake et al., 2009）などを計算することができる。

地域規模の海洋環境の将来予測を行うにあたっては、図 4.3.1.に示したように、現況計算の再現性が検証された後に、気候モデルの計算結果を用いて予測計算を行う。多段階のネスティングにより数百 m 以内の流動場を表現する場合に必要なデータについて表 4.3.1.、4.3.2.に示す。

表 4.3.1. 地域規模の流動モデルの構築・検証に必要な海洋データの例

測定項目	測定方法・入手先	用途
水温	現地観測・衛星観測・流動モデル	初期値・境界条件・計算結果の検証
塩分	現地観測・流動モデル	初期値・境界条件・計算結果の検証
流向流速	現地観測・流動モデル	境界条件・計算結果の検証
水位変動	現地観測・衛星観測・流動モデル・潮位予測モデル	境界条件・計算結果の検証

表 4.3.2. 地域規模の流動モデルの構築・検証に必要な気象データの例

測定項目	測定方法・入手先	用途
気温、降水量、相対湿度、雲量、気圧、日射量	AMeDAS 等	境界条件
気温、降水量	AMeDAS 等	河川の水温・流量の推定

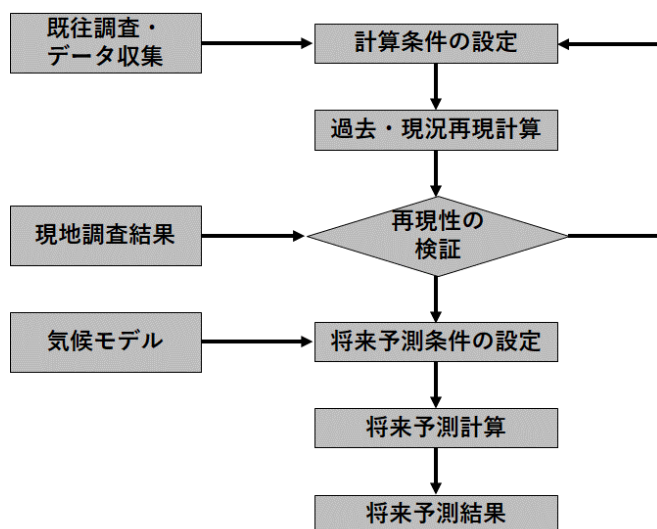


図 4.3.1. 流動場の過去・現況再現及び将来予測のフローチャート

4.4. 具体的適応策の検討に向けた手順

図 4.4.1.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 4.4.2.）。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の収集・整備

気象・海象、海底地形、植生など現状把握と予測に必要な情報の収集を行い、地理情報システム等に統合する。日本においては表 4.4.1.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、利用者数などの情報も収集する。なお、地域規模の高解像度の海洋環境のデータが得られない場合は、力学的もしくは統計的なダウンスケーリングにより現況再現及び将来予測のデータセットを構築する。

- 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等により評価対象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、評価対象に関しての現在の利用の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を活用し、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・海象等の環境要因と対象とする生物の分布や生育状況の情報との関係を統計的に求めて推定モデルを構築し、そのうえで将来気候での分布や生育状況の変化予測を行う。

- ステップ 4：適応オプションの抽出と管理計画の立案

将来の分布や景観等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照し、どこで何を行うべきか具体的な管理計画案を作成する。

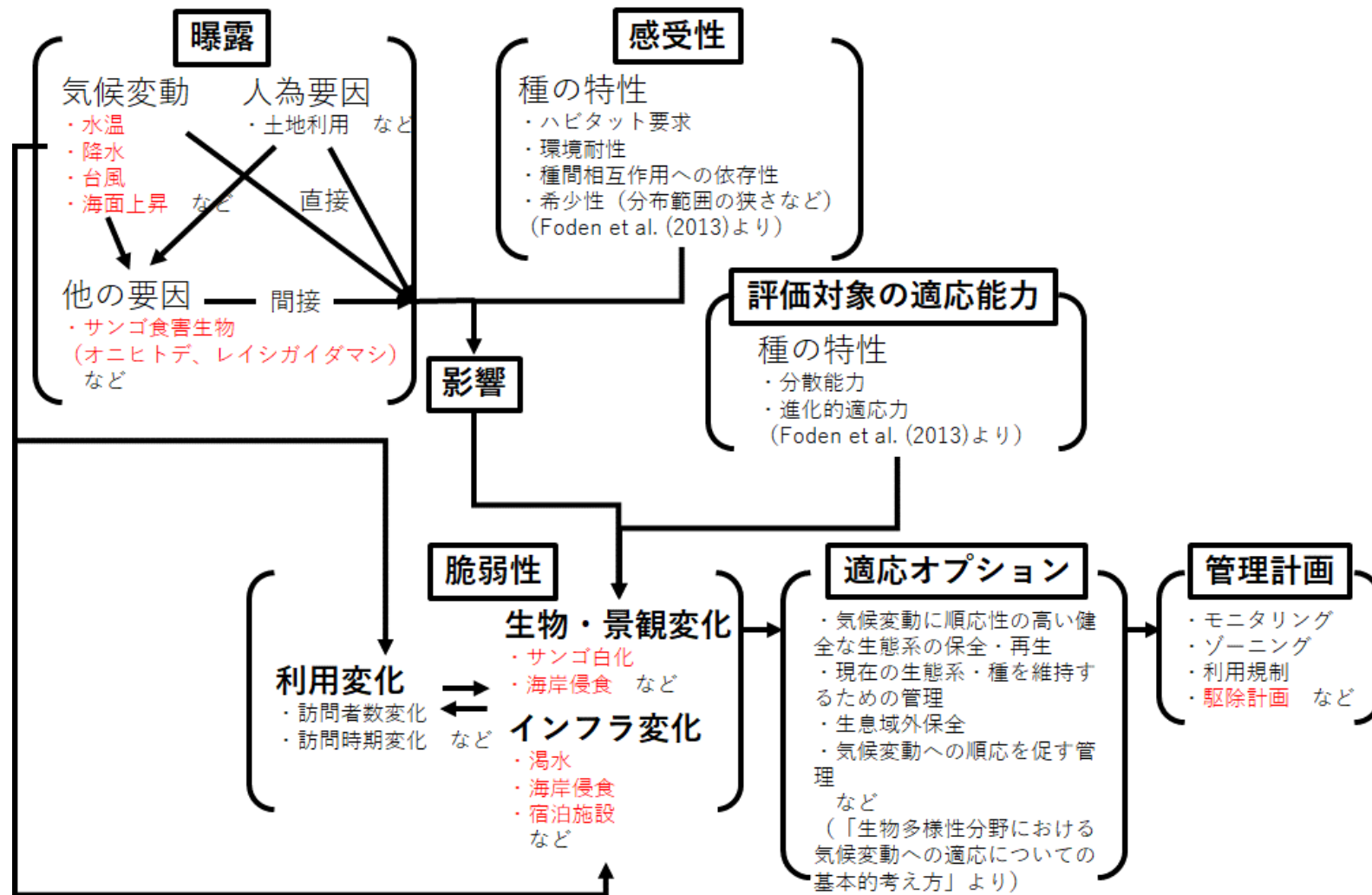


図 4. 4. 1. 保全と利用のための国立公園の気候変動適応枠組み

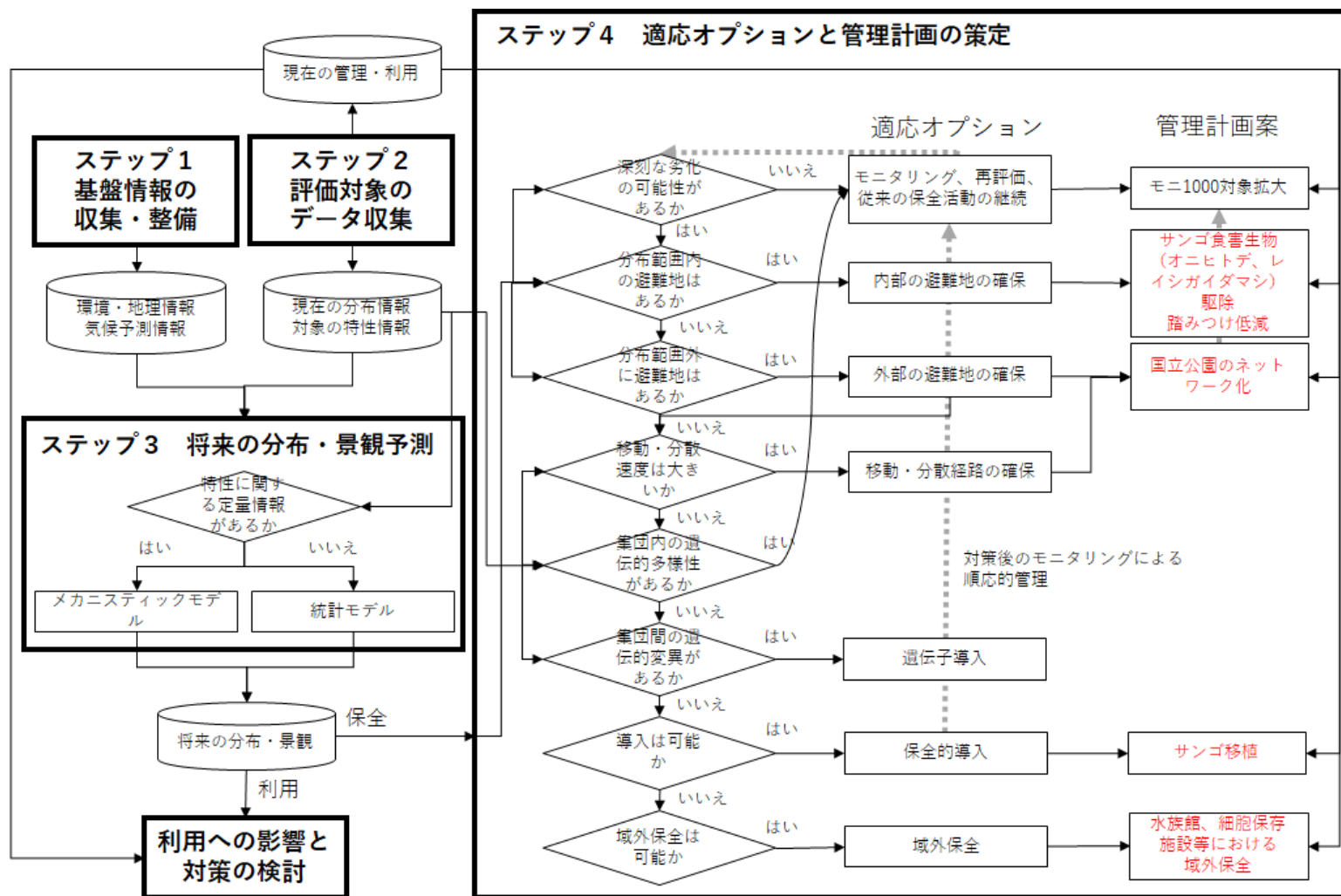


図 4. 4. 2. サンゴを例にした気候変動適応枠組みと過年度報告書を参考に作成した、脆弱性評価から管理計画案へのフローチャート

4.5. モデル保護区での情報収集及び施行に向けた課題の抽出

本業務では、沖縄県那覇市の西方約 40 km の地点に位置し、大小 30 余りの島々と数多くの岩礁から構成される慶良間諸島国立公園（図 4.5.1.）を対象として、基盤データの整備を行った。前章で述べたステップ 1～4（図 4.4.2.）の内ステップ 1 および 2 に関して、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に向けた課題を整理する。

慶良間諸島国立公園は平成 26 年 3 月 5 日に指定され、透明度の高い海域景観、多様なサンゴが高密度に生息するサンゴ礁、ザトウクジラの繁殖海域、多島海景観、白い砂浜、海食崖とそこに発達した風衝地特有の植生など、海と陸が連続した多様な景観を有し、陸域が 3,520ha、海域は 90,475ha と公園区域の大半が海域となっている国立公園である（<http://www.env.go.jp/park/kerama/point/index.html>）。

● ステップ 1：対象地域の基盤情報の収集・整備

慶良間諸島国立公園に関する公開データを収集した（表 4.5.1.；図 4.5.1～4.5.4.）。

表 4.5.1. 慶良間諸島国立公園を対象に収集した基盤情報

データ	整備機関・ プロダクト名	データ入手元
国立公園区域等	環境省	http://gis.biodic.go.jp/webgis/sc-026.html?kind=nps
水温（現地観測）	環境省	報告書
サンゴ分布・被度	環境省	報告書
サンゴ白化率	環境省	報告書
オニヒトデ駆除数	沖縄県	報告書
観光客数	沖縄県	http://www.pref.okinawa.lg.jp/site/kikaku/chiikirito/ritoukankeisiryo_kako.html
気象データ （AMeDAS）	気象庁	http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php
気象データ （GPV MSM）	JMBSC	http://www.jmbsec.or.jp/jp/offline/cd0380.html
台風軌跡 （ベストトラック）	気象庁	http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/trackarchives.html
陸上地形 （10 mDEM）	国土地理院	https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php
海底地形	JODC	http://jdoss1.jodc.go.jp/vpage/depth500_file_j.html
赤土堆積量	沖縄県	http://www.pref.okinawa.jp/site/kankyo/hozen/mizu_t

		suchi/red-soil_monitoring.html
水温（衛星観測）	NOAA (OISST)	https://www.ncdc.noaa.gov/oisst
水温（衛星観測）	NASA (MUR SST)	http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/index.html?page=1&itemsPerPage=1000
クロロフィル a （衛星観測）	NOAA	http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/index.html?page=1&itemsPerPage=1000
K490（衛星観測）	NASA	http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/index.html?page=1&itemsPerPage=1000
UV-B（衛星観測）	JAXA	http://www.eorc.jaxa.jp/JASMES/index_map_j.html
水温・塩分・流向流速・水位変動（再解析モデル）	FRA (FRA-ROMS)	http://fm.dc.affrc.go.jp/fra-roms/index.html
水温・塩分・流向流速・水位変動（再解析モデル）	JAMSTEC (JCOPE2M)	http://www.jamstec.go.jp/jcope/htdocs/home.html
水温・塩分・流向流速・水位変動（再解析モデル）	JAMSTEC (JCOPE-T-NEDO)	http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/kowatch/?p=4766
水温・塩分・流向流速・水位変動（再解析モデル）	HYCOM	https://hycom.org/
気温・水温・炭酸系パラメータ（気候モデル）	CMIP5	https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/
気温・降水量	SI-CAT	https://si-cat.jp/
サンゴ白化予測	NOAA	https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/index.php

□JMBSC（気象業務支援センター）、JODC（日本海洋データセンター）、NOAA（アメリカ海洋大気庁）、NASA（アメリカ航空宇宙局）、JAXA（国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構）、FRA（国立研究開発法人水産研究・教育機構）、JAMSTEC（国立研究開発法人海洋研究開発機構）

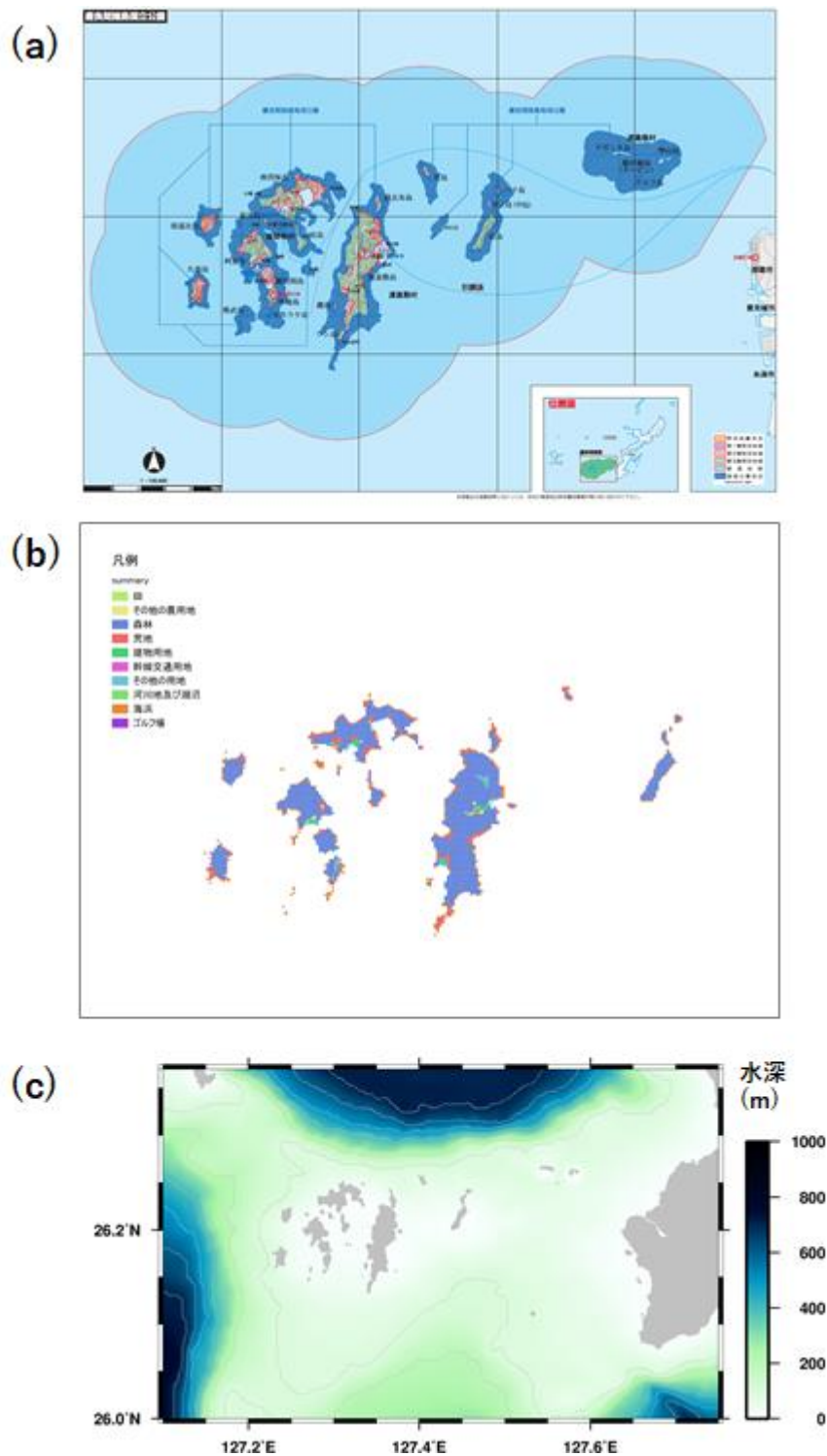


図 4.5.1. (a) 慶良間諸島国立公園の管理区域※、(b) 土地利用形態、(c) 海底地形。
 □<http://www.env.go.jp/park/kerama/intro/files/area.pdf>

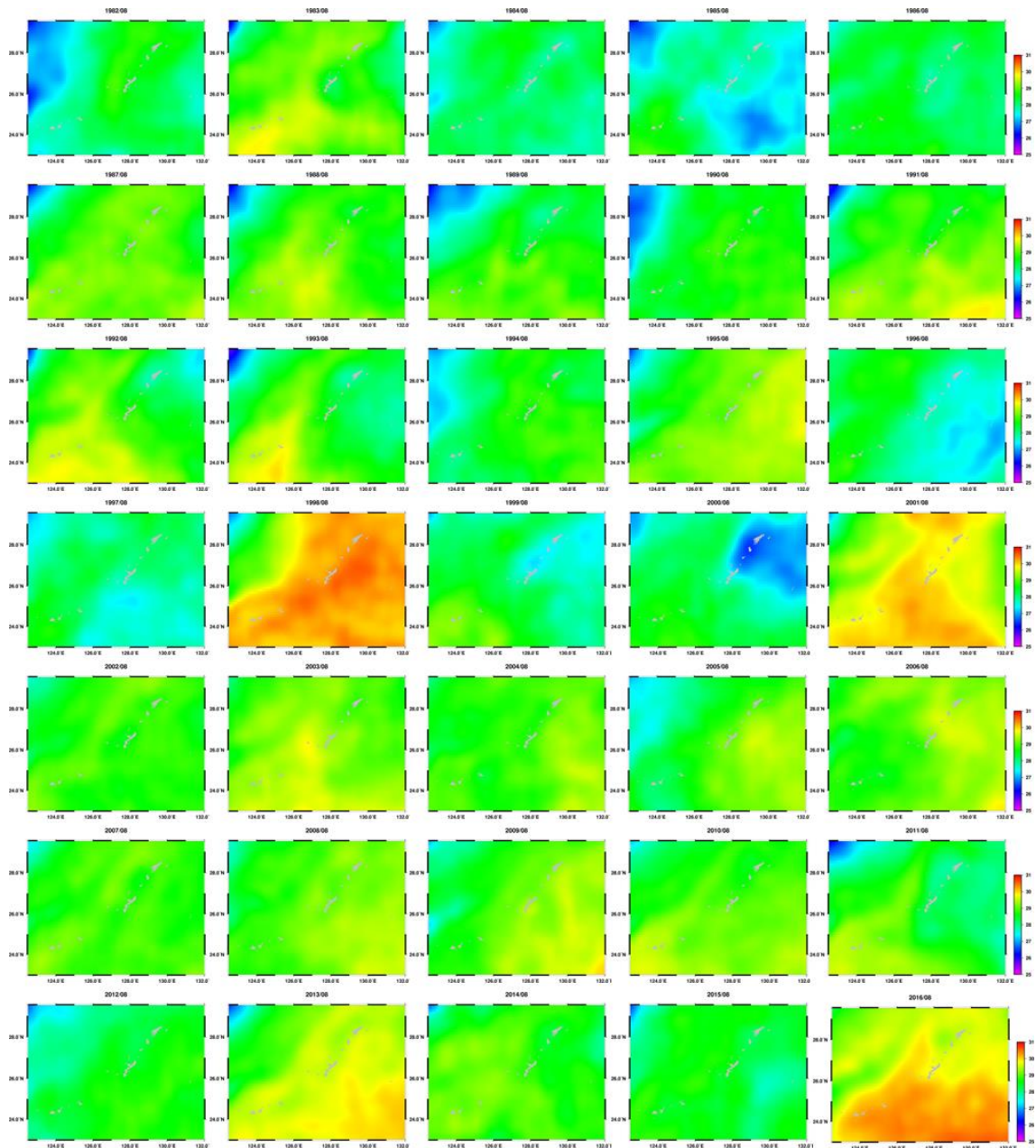


図 4. 5. 2. MUR SST※による 1982 年から 2016 年の 8 月の月平均海面水温の経年変化。

□<https://mur.jpl.nasa.gov/>

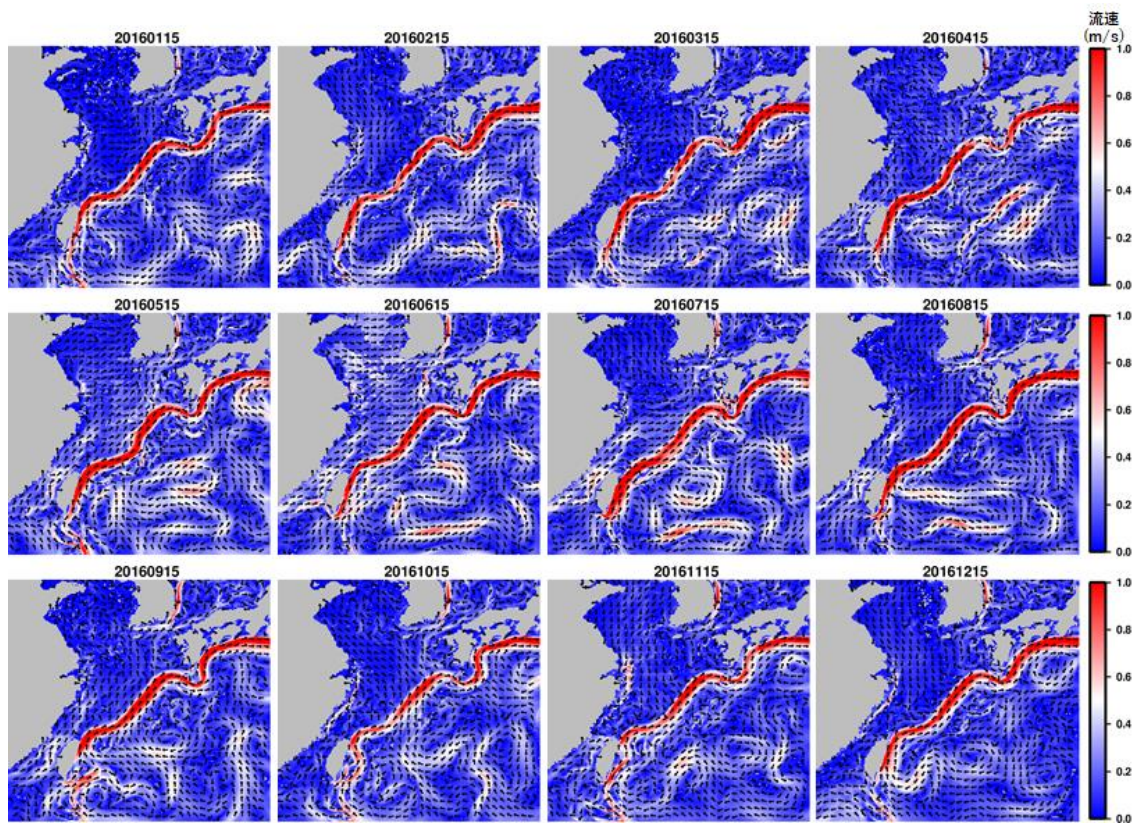


図 4. 5. 3. JCOPE-T-NEDO※による流動場の計算結果の一例。

※<http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/kowatch/?p=4766>

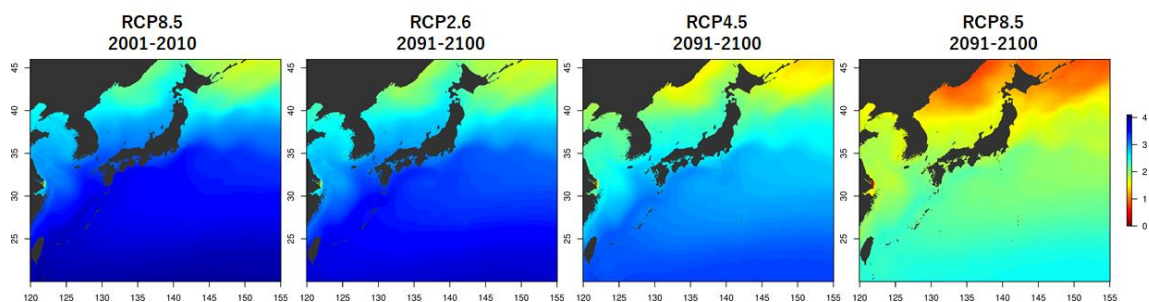


図 4. 5. 4. MIROC-ESM による炭酸系パラメータ（炭酸カルシウム飽和度 Ω_{arg} ）の計算結果の一例。

● 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

慶良間諸島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、表 4.5.2.に示す現地関係者にヒアリングを行った。ヒアリング内容は図 4.5.5.の通りで、(1) 慶良間諸島国立公園を対象とした課題、(2) 将来予測における課題、(3) モニタリング等の調査・研究に留まらず現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）についてヒアリングを行った。

表 4.5.2. ヒアリングを行った現地関係者

氏名	所属・役職
宮里 哲	沖縄県座間味村 村長
三田井 裕	国立沖縄青少年交流の家 所長
小嶺 哲雄	沖縄県渡嘉敷村 商工観光課 課長
平田 春吉	渡嘉敷ダイビング協会 理事長
島村 武	渡嘉敷漁業協同組合 代表理事組合長
金城 悦男	渡嘉敷漁業協同組合 参事
比嘉 勝太	座間味村漁業協同組合 種苗センター主任
垣花 薫	座間味村商工会 副会長／あか・げるまダイビング協会 会長
又吉 英夫	座間味ダイビング協会 会長
谷口 洋基	座間味村観光協会 事務局長
遠藤 周平	株式会社とかしき 取締役
松井 さとし	NPO 法人美ら海振興会 会長

表 4.5.3. 現地関係者ヒアリング結果の概要。

対象者	キーワード		
	慶良間諸島国立公園を対象とした課題	将来予測における課題	現時点で執れる（執っている）又は執るべき対策・適応策
宮里 哲	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 観光客数の増加・混雑 ➤ 一次・二次産業の発展 ➤ 陸域のアピール ➤ 渇水 ➤ 外来種 ➤ シュノーケルの際の環境保全対策 ➤ サンゴの減少 ➤ ビーチの水質汚染 		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 陸域でのアクティビティの提供 ➤ 海水淡水化施設の整備 ➤ ビーチでのライフセーバーの配置
三田井 裕	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 施設利用客の減少 ➤ 移植サンゴの低い定着率 ➤ サンゴの減少 ➤ サンゴ保全 		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 施設利用の促進 ➤ 環境教育の励行
小嶺 哲雄	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 観光客数の増加・混雑 ➤ 冬季の観光客数 ➤ ビーチの管理 ➤ サンゴの減少 ➤ 台風の襲来 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 冬季の気温の変化 ➤ 台風の襲来時期の変化 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 冬季の陸域でのアクティビティの提供
平田 春吉	<ul style="list-style-type: none"> ➤ サンゴの減少 ➤ サンゴの研究・モニタリングの推進 		<ul style="list-style-type: none"> ➤ ダイビング用のブイの設置 ➤ サンゴの移植

			➤ サンゴの食害生物の駆除
島村 武・ 金城 悦男	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 魚類の減少 ➤ 漁獲時期の変化 ➤ 密漁の増加 ➤ サンゴの劣化 ➤ ビーチの水質悪化 ➤ 観光客によるゴミの増加 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 気温と水温の変化 ➤ 台風の発生場所の変化 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ サンゴの食害生物の駆除 ➤ ダイビング用のブイの設置 ➤ 日焼け止め
比嘉 勝太	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 夏場の水温上昇 ➤ 梅雨時の濁りの発生 ➤ サンゴの減少 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 気温や水温の変化 ➤ 島の周囲ぐらいの解像度での予測 ➤ サンゴの産卵のタイミング 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 気温、水温の高精度な予測 ➤ サンゴの食害生物の駆除 ➤ サンゴの移植・移植技術の向上 ➤ 陸域からの負荷の削減
垣花 薫	<ul style="list-style-type: none"> ➤ サンゴの減少 ➤ サンゴ調査の継続 ➤ 濁りの発生 ➤ 冬季の観光の活性化 		<ul style="list-style-type: none"> ➤ サンゴの食害生物の駆除 ➤ サンゴ調査の充実 ➤ 陸域からの負荷の削減 ➤ 利用に関するルール策定の策定
又吉 英夫	<ul style="list-style-type: none"> ➤ サンゴの減少 ➤ ビーチの水質悪化 ➤ 観光客の増加 ➤ ビーチでのシュノーケルの際のマナー ➤ 夏場の高水温 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 水温の変化 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ サンゴの食害生物の駆除 ➤ サンゴの白化の防止 ➤ ダイビングでの利用の規制 ➤ 日焼け止め ➤ 観光客のキャパシティの把握 ➤ ビーチでのガイドの配置
谷口 洋基	<ul style="list-style-type: none"> ➤ サンゴの減少、白化 ➤ 渇水 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 台風のルート、襲来時期の変化 ➤ 水温の変化 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 海水淡水化事業 ➤ 季節的な観光客数の平滑化

	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 夏場の混雑 ➤ 砂の減少 		<ul style="list-style-type: none"> ➤ ダイビングでの利用規制 ➤ サンゴの食害生物の駆除 ➤ ビーチでの指導 ➤ 観光客のマナーの改善
遠藤 周平	<ul style="list-style-type: none"> ➤ サンゴの減少、白化 ➤ 砂の減少 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ サンゴの白化リスクの変化 ➤ クジラの来遊時期の変化 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ サンゴの移植 ➤ ブイの設置
松井 さとし	<ul style="list-style-type: none"> ➤ サンゴの減少 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 水温の変化 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ サンゴの移植 ➤ 海岸・海中清掃 ➤ サンゴの食害生物の駆除

1. 慶良間諸島国立公園について

内容：

- ・他の公園や島嶼地域との共通点
- ・慶良間諸島国立公園の特徴についてうかがう

項目

- ・気候、地形
- ・保全に関する項目（景観、生物、希少種など）
- ・利用に関する項目（レクリエーション、観光、事故など）
- ・その他

2. 着目すべき項目と将来予測

内容：

- 1のうち着目すべき項目をうかがい、その気候変動との関わりをうかがう

この中で着目すべき項目（種、生態系、景観など）は何か

- ・現在進行中か
- ・将来懸念されるのか

- ・気候変動の直接影響
- ・気候変動の間接影響
- ・気候変動以外の影響

【項目の例示】

- ・気温変化
- ・湿度・降水量変化
- ・海水温変化
- ・海面上昇
- ・異常気象（極端気象：短時間の豪雨、高潮、異状潮など）の発生
- ・植生（陸・海域）の変化
- ・動物（サンゴ、オニヒトデ、クジラなど）の分布や個体数変化
- ・生物季節（セミ、鳥類渡り、デイゴ・ツツジ開花等）の変化やミスマッチ
- ・砂浜の変化
- ・慶良間ブルー（色・透明度）の変化
- ・河川・ダムの変化
- ・陸域からの赤土流入
- ・漁業への影響
- ・公園施設への影響
- ・観光資源への影響
- ・公園利用者への影響 など

3. 対策可能性

内容：

- 対策可能性について、短期的・長期的な観点からうかがう

これらの影響や懸念に対する
・検出・モニタリング・予測可能性
・対策可能性（現在とられている対策、これからとるべき対策）

考えられる対策について
・短期的（公園計画・管理計画の改定など）
・長期的（調査、モニタリング、研究など）

4. 対策の実践

内容：

- 対策の実践にあたり現地で必要な点をうかがう

1 今後公園管理行政で「適応策」を検討するために聞いておきたいこと
・気候による影響と対策について、どのような情報が提供されると、自然保護や管理の現場で有効と思うか。
・気候変動対策で、「情報」以外に何が必要と考えるか（方針・資金・人手・住民や関係者の理解など）。

2 現地の自然保護官に対して付加的に聞くべきこと
・サンゴの保全や外来種駆除、レクリエーション利用等の現在の対策（管理計画の現状、何をどれだけ実施できているか、何が課題を含む）。
・評価～適応策抽出のツールの活用について意見交換。
・公園・管理計画の発表・改訂スケジュールについて。
・満喫プロジェクト（ステップアッププログラム2020）との関連
・計画や活動に気候変動適応の問題をどう反映させるか
・海面上昇に対するEco-DRRの観点

図 4.5.5. ヒアリング内容

4.6. 今後の課題

表 4.5.3.の現地関係者へのヒアリング結果からは、サンゴの減少が最も深刻な課題として挙げられた。実際に保全活動を行うことができる空間スケールは数十～百 m 程度であるため、このような高い空間解像度を対象とした最適な保全活動・保全適地、さらには避難地を“気候変動”と関連付けて明らかにすることが次年度の主な課題である。また、慶良間諸島は石西礁湖と比べて近年白化被害が小さいことが報告されているため

(<http://kyushu.env.go.jp/naha/161109sango.pdf>)、その機構や幼生供給源としての可能性についての解析も重要となる。慶良間諸島におけるサンゴ礁生態系を対象とした場合の、気候変動に対する影響評価及び避難地の推定を含んだ適応策の検討に向けた課題を以下に記す。これらの課題を整理することで、具体的な管理策の検討につなげることができるようになることが期待される。

- サンゴの白化要因に関する情報収集

サンゴの白化には、高水温 (Jones et al., 1998)、紫外線量 (Gleason & Wellington, 1993 ; Shick et al., 1996)、流速 (Nakamura & van Woesik, 2001 ; Nakamura et al., 2003) などが大きく影響することが報告されている。また、白化だけでなくオニヒトデ *Acanthaster planci* (西平, 1975 ; 谷口, 2010) やレイシガイ類 (McClanahan, 1994) による食害もサンゴに対して度々甚大な被害をもたらす。これらの要因に関する時空間的な情報を整理する。

- 海洋環境の現状把握・将来予測

慶良間諸島で白化被害が比較的小さかった要因について、海洋環境と関連付けた解析が必要である。また、気候変動による海水温の上昇や海洋酸性化はサンゴ礁生態系に大きな影響を与えることが想定されるため (Hoegh-Guldberg, 1999 ; Hoegh-Guldberg et al., 2007)、将来に渡って慶良間諸島での低い白化リスクが維持されるのかの予測評価が重要な課題となる。

- 流動モデルの構築・検証のための現地観測データの取得

サンゴの成育適地や避難地の推定を行った先行研究では空間スケールが数 km～数十 km と解像度が粗いのが現状である (例えば、Chollett & Mumby, 2013)。現場の保全活動を行う空間スケールを考慮すると、百 m 程度の解像度での評価が求められる。4.3 項で述べたように、地域規模の物理環境を表現するには流動モデルの開発・適用が鍵となる。加えて、図 4.3.1.に示したように流動モデルの検証には現地観測データの入手が不可欠である。また、データとしては複数地点かつ複数年を対象としたものが望ましい。そのため、現地観測データを充実させるとともに、再現性が検証された流動モデルの整備が喫緊の課題である。

- 流動モデルによる物理環境の現況再現・予測評価・サンゴの生息適地の推定

気候変動を考慮したサンゴの生息適地の選定基準の一つとして、高水温への曝露のリスクが低く白化しにくい場所が指摘されている（3章の文献⑨）。

白化リスクの指標として、気温（Okamoto et al., 2007）や水温（Maynard et al., 2008 ; Kayanne, 2017）を用いた研究事例が報告されている。流動モデルからは水温に加えて流速が求められるため、これらの値もしくは地形や水質といった追加のパラメータを用いることで、現況及び将来のサンゴの生息適地の評価をすることができる。

- 幼生分散モデルによる現況及び将来気候における慶良間諸島内及び慶良間諸島外とのコネクティビティの検証

サンゴの個体群の維持や白化被害からの速やかな回復のためには十分な幼生供給が不可欠である（Munday et al., 2009）。このため、サンゴ礁間のコネクティビティを解明することは重要な課題である。

慶良間諸島に関しては、漂流ブイの軌跡と幼生の定着期間から、慶良間諸島が沖縄本島西岸へのサンゴ幼生の重要な供給源の一つであることが指摘されている（灘岡ら, 2002）。また、遺伝子情報を用いた解析からは、慶良間諸島が沖縄本島のソースとなっている

（Nishikawa et al., 2003）という事例がある一方で、Shinzato et al. (2015) によると沖縄本島の個体群に対する慶良間諸島の寄与は限定的であることが指摘されている。これらの研究例を踏まえて、気候変動による海洋環境の変化を考慮した形でのコネクティビティの検証が必要である。

- 中深度サンゴ群集の調査・モニタリング

近年、浅場に生息するサンゴの避難地として中深度サンゴ群集生態系が注目されている（Bongaerts et al., 2010 ; Semmler et al., 2017）。中深度サンゴ群集が浅場への幼生供給源として機能することが期待されており、数値モデルを用いた鉛直移動を考慮したコネクティビティの検証も行われている（Holstein et al., 2016）。

慶良間諸島国立公園では水深 30 m 以浅が海域公園地区に指定されているが、その拡張の必要性の検討のためにも、この海域での中深度サンゴ群集に関する調査・モニタリングが重要である。

- 生息適地の推定結果及び利用面を考慮した保全適地の選定

ダイビングなどの利用者によるサンゴの踏みつけ（Toyoshima & Nadaoka, 2015）やアンカーリング（Dinsdale & Harriott, 2004 ; Saphier & Hofmann, 2005）が保全上の問題となることも多く、被度の低下や群集組成の変化が確認されていることもある（Terrón-Sigler et al., 2016）。また、ダイビングでの利用率が高い場所では利用率が低い場所と比べてサンゴの病気への感染率が高かった事例が報告されている（Lamb et al., 2014）。そのため、ダイビン

グ利用の制限がサンゴの健全性を高めることにつながると考えられる。一方で、ダイビングポイントの完全な閉鎖は食害生物には対応できないため（谷口，2003）、立ち入りをどのように制限するかについての議論が必要である。オニヒトデ（*Acanthaster planci*）やレイシガイ類の駆除効率を考慮すると、ダイビングでの適度な利用が保全を促進する可能性も考えられ、利用と保全を調整する枠組みと保全場所の空間的な配置の検討が今後の課題である。

引用文献

- Bongaerts, P., Ridgway, T., Sampayo, E.M., Hoegh-Guldberg, O. (2010) Assessing the ‘deep reef refugia’ hypothesis: focus on Caribbean reefs. *Coral Reefs*, 29, 309-327.
- Botsford, L.W., White, J.W., Coffroth, M.-A., Paris, C.B., Planes, S., Shearer, T.L., Thorrold, S.R., Jones, G.P. (2009) Connectivity and resilience of coral reef metapopulations in marine protected areas: matching empirical efforts to predictive needs. *Coral Reef*, 28, 327-337.
- Chassignet, E.P., Hurlburt, H.E., Smedstad, O.M., Halliwell, G.R., Hogan, P.J., Wallcraft, A.J., Baraille, R., Bleck, R. (2007) The HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system. *Journal of Marine Systems*, 65, 60-83.
- Chollett, I., Mumby, P.J. (2013) Reefs of last resort: Locating and assessing thermal refugia in the wider Caribbean. *Biological Conservation*, 167, 179-186.
- Crowder, L.B., Lyman, S.J., Figueira, W.F., Priddy, J. (2000) Source-sink population dynamics and the problem of siting marine reserves. *Bulletin of Marine Science*, 66, 799-820.
- Gleason, D.F., Wellington, G.M. (1993) Ultraviolet radiation and coral bleaching. *Nature*, 365, 836-838.
- Guo, X., Hukuda, H., Miyazawa, Y., Yamagata, T. (2002) A triply nested ocean model for simulating the Kuroshio -Roles of horizontal resolution on JEBAR. *Journal of Physical Oceanography*, 33, 146-169.
- Hoegh-Guldberg, O. (1999) Climate change, coral bleaching and the future of the world’s coral reefs. *Marine and Freshwater Research*, 50, 839-866.
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P.J., Hooten, A.J., Steneck, R.S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C.D., Sale, P.F., Edwards, A.J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C.M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R.H., Dubi, A., Hatziolos, M.E. (2007) Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 318, 1737-1742.
- Holstein, D.M., Paris, C.B., Vaz, A.C., Smith, T.B. (2016) Modeling vertical coral connectivity and mesophotic refugia. *Coral Reefs*, 35, 23-37.

- Jones, G.P., Almany, G.R., Russ, G.R., Sale, P.F., Steneck, R.S., van Oppen, M.J.H., Willis, B.L. (2009) Larval retention and connectivity among populations of corals and reef fishes: history, advances and challenges. *Coral Reefs*, 28, 307-325.
- Jones, R.J., Hoegh-Guldberg, O., Larkum, A.W.D., Schreiber, U. (1998) Temperature-induced bleaching of corals begins with impairment of the CO₂ fixation mechanism in zooxanthellae. *Plant, Cell and Environment*, 21, 1219-1230.
- Kavousi, J., Keppel, G. (2017) Clarifying the concept of climate change refugia for coral reefs. *ICES Journal of Marine Science*, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx124>.
- Kayanne, H. (2017) Validation of degree heating weeks as a coral bleaching index in the northwestern Pacific. *Coral Reefs*, 36, 63-70.
- Kuroda, H., T. Setou, S. Kakehi, S. Ito, T. Taneda, T. Azumaya, D. Inagake, Y. Hiroe, K. Morinaga, M. Okazaki, T. Yokota, T. Okunishi, K. Aoki, Y. Shimizu, D. Hasegawa & T. Watanabe, (2017). Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through development of the FRA-ROMS ocean forecast system: overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open Journal of Marine Science*, 7, 62-90.
- Lu, R., Turco, R.P. (1995) Air pollutant transport in a coastal environment-II. Three-dimensional simulations over Los Angeles basin. *Atmospheric Environment*, 29, 1499-1518.
- Maynard, J.A., Turner, P.J., Anthony, K.R.N., Baird, A.H., Berkelmans, R., Eakin, C.M., Johnson, J., Marshall, P.A., Packer, G.R., Rea, A., Willis, B.L. (2008) *ReefTemp*: An interactive monitoring system for coral bleaching using high-resolution SST and improved stress predictors. *Geophysical Research Letters*, 35, L05603, doi: 10.1029/2007GL032175.
- McClanahan, T.R. (1994) Cora-eating snail *Drupella cornus* population increases in Kenyan coral reef lagoons. *Marine Ecology Progress Series*, 115, 131-137.
- Miyake, Y., Kimura, S., Kawamura, T., Horii, T., Kurogi, H., Kitagawa, T. (2009) Simulating larval dispersal processes for abalone using a coupled particle-tracking and hydrodynamic model: implications for refugium design. *Marine Ecology Progress Series*, 387, 205-222.
- Munday, P.L., Leis, J.M., Lough, J.M., Paris, C.B., Kingsford, M.J., Berumen, M.L., Lambrechts, J. (2009) Climate change and coral reef connectivity. *Coral Reefs*, 28, 379-395.
- Nakamura, T., Nadaoka, K., Watanabe, A., Yamamoto, T., Miyajima, T., Blanco, A.C. (2017) Reef-scale modeling of coral calcification responses to ocean acidification and sea-level rise. *Coral Reefs*, <https://doi.org/10.1007/s00338-017-1632-3>.
- Nakamura, T., van Woesik, R. (2001) Water-flow rates and passive diffusion partially explain differential survival of corals during the 1998 bleaching event. *Marine Ecology Progress Series*, 212, 301-304.
- Nakamura, T., Yamasaki, H., van Woesik, R. (2003) Water flow facilitates recovery from bleaching in the coral *Stylophora pistillata*. *Marine Ecology Progress Series*, 256, 287-291.

- Okamoto, M., Nojima, S., Furushima, Y. (2007) Temperature environments during coral bleaching events in Sekisei Lagoon. *Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography*, 71, 112-121.
- Planes, S., Jones, G.P., Thorrold, S.R. (2009) Larval dispersal connects fish populations in a network of marine protected areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 5693-5697.
- Sakamoto, T.T., Y. Komuro, T. Nishimura, M. Ishii, H. Tatebe, H. Shiogama, A. Hasegawa, T. Toyoda, M. Mori, T. Suzuki, Y. Imada, T. Nozawa, K. Takata, T. Mochizuki, K. Ogochi, S. Emori, H. Hasumi & M. Kimoro, (2012) MIROC4h- A new high-resolution atmosphere-ocean coupled general circulation model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90, 325-359.
- Semmler, R.F., Hoot, W.C., Reaka, M.L. (2017) Are mesophotic coral ecosystems distinct communities and can they serve as refugia for shallow reefs? *Coral Reefs*, 36, 433-444.
- Shick, J.M., Lesser, M.P., Jokiel, P.L. (1996) Effects of ultraviolet radiation on corals and other coral reef organisms. *Global Change Biology*, 2, 527-545.
- Shinzato, C., Mungpakdee, S., Arakaki, N., Satoh, N. (2015) Genome-wide SNP analysis explains coral diversity and recovery in the Ryukyu Archipelago. *Scientific Reports*, 5, 18211, doi: 10.1038/srep18211.
- Siegel, D.A., Kinlan, B.P., Gaylord, B., Gaines, S.D. (2003) Lagrangian descriptions of marine larval dispersion. *Marine Ecology Progress Series*, 260, 83-96.
- Toyoshima, J., Nadaoka, K. (2015) Importance of environmental briefing and buoyancy control on reducing negative impacts of SCUBA diving on coral reefs. *Ocean & Coastal Management*, 116, 20-26.
- Usui, N., Wakamatsu, T., Tanaka, Y., Hirose, N., Toyoda, T., Nishikawa, S., Fujii, Y., Takatsuki, Y., Igarashi, H., Nishikawa, H., Ishikawa, Y., Kuragano, T., Kamachi, M. (2017) Four-dimensional variational ocean reanalysis: a 30-year high-resolution dataset in the western North Pacific (FORA-WNP30). *Journal of Oceanography*, 73, 205-233.
- Watanabe, S., T. Hajima, K. Sudo, T. Nagashima, T. Takemura, H. Okajima, T. Nozawa, H. Kawase, M. Abe, T. Yokohata, T. Ise, H. Sato, E. Kato, K. Takata, S. Emori & M. Kawamiya, 2011. MIROC- ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development*, 4, 845-872.
- Watanabe, M., T. Suzuki, R. O'ishi, Y. Komuro, S. Watanabe, S. Emori, T. Takemura, M. Chikira, T. Ogura, M. Sekiguchi, K. Takata, D. Yamazaki, T. Yokohata, T. Nozawa, H. Hasumi, H. Tatebe & M. Kimoto, (2010). Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate*, 23, 6312-6335.

Yukimoto, S., Adachi, Y., Hosaka, M., Sakami, T., Yoshimura, H., Hirabara, M., Tanaka, T.Y., Shindo, E., Tsujino, H., Deushi, M., Mizuta, R., Yabu, S., Obata, A., Nakano, H., Koshiro, T., Ose, T., Kitoh, A. (2012). A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 -Model description and basic performance-. Journal of the Meteorological Society of Japan, 90, 23-64.

谷口洋基（2003）座間味村におけるダイビングポイント閉鎖の効果と反省点ー「リーフチェック座間味村」の結果よりー. みどりいし, 14, 16-19.

谷口洋基（2010）阿嘉島周辺のオニヒトデ被害と駆除活動の効果. みどりいし, 21, 26-29.

灘岡和夫・波利井佐紀・三井順・田村仁・花田岳・E. Paringit・二瓶泰雄・藤井智史・佐藤健治・松岡建志・鹿熊信一郎・池間健晴・岩尾研二・高橋孝昭（2002）小型漂流ブイ観測および幼生定着実験によるリーフ間広域サンゴ幼生供給過程の解明. 海岸工学論文集, 49, 366-370.

西平守孝（1975）沖縄におけるオニヒトデの大量発生について. 日本ベントス研究会連絡誌, 9-10, 39-40.

柳哲雄（1989）沿岸海洋学ー海の中でのものはどう動くかー. 恒星社厚生閣.

横山長之（1993）海洋環境シミュレーションー水の流れと生物ー. 白亜書房.

5. 海外の適応策に係る情報収集

環境省担当官と協議の上、Web of Science や Google Scholar など論文検索システムを用いて、キーワードとして、Ex situ conservation, Inter situ conservation, Botanical gardens, Cultivation collections, Endangered Species, climate change, temperature, ocean acidification, alpine, marine, adaptation を中心に用いて検索を行った。学術雑誌に関しては、査読付きかつインパクトファクター付きの雑誌に掲載された論文を対象とし、必要に応じて他の学術雑誌に掲載された論文を収集した。検索漏れを防ぐために、適応策（気候変動下での保全）に関する論文が多く掲載されている以下の学術雑誌に関して他のキーワードも用いた網羅的な検索を行った。

- 気候変動

Nature Climate Change

Global Change Biology

Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change

Climate Research

Climatic Change

WIREs Climate Change

- 生態系保全

Biological Conservation

Conservation Biology

Conservation Letters

Ecological Applications

Journal of Applied Ecology

- 環境管理

Environmental Management

Journal of Environmental Management

Journal of Outdoor

Recreation and Tourism

Marine Policy

Ocean and Coastal Management

①

Mike Maunder, Sarah Higgins, Alastair Culham (2001) The effectiveness of botanic garden collections in supporting plant conservation: a European case study. *Biodiversity & Conservation*, 10(3): 383-401.

タイトル

植物種の保全における植物園のコレクションの有効性：ヨーロッパの事例

目的

植物園は、公共的な展示及び教育、研究への支援、さらに最近では種の保存をも含む、様々な目的を担っている。野生集団を守るために生息域内及び生息域外の技術を活用することの必要性は、植物園（WWF/IUCN/BGCS1989; Heywood1993; Hernández-Bermejo and Clemente-Muñoz 1994; Falk et al. 1996）及び「生物の多様性に関する条約」などの国際法規（Glowka et al. 1994）により提唱されてきた。ヨーロッパの植物園が担う保全の役割は地域的政策文書によって認定されている（European Centre for Nature Conservation 1996; European Commission 1998）。ヨーロッパの植物園は、植物保全のための施設として機能し、再導入を含む保全活動を実施している（Hernández-Bermejo and Clemente-Muñoz 1996）。しかし、 α 多様性の園芸学的展示に力点を置きながら、従来の植物園のコレクションが種の保全を維持することができるかについては、疑問が投げかけられている（Elias 1987; Hurka 1994; Maunder 1994）。本研究では、種の保全を維持することにおいて、これらのコレクションの有効性を検討する。以下の3部分から成る研究について述べる。（1）ベルン条約の規定による、植物園の絶滅危惧植物の調査及び評価の結果、（2）ヨーロッパの絶滅危惧植物種の生息域外保全における現在の課題を描き出す事例研究、及び（3）ヨーロッパの植物保全における植物園の貢献をさらに向上させるための政策提言を行う。

方法

調査では、ヨーロッパ評議会の後援のもとに設立された地域条約である、ヨーロッパ野生生物及び自然生息地の保護に関する条約（ベルン条約）に挙げられている573種の植物種のリストを使用した。アンケートは、欧州40カ国（ロシアを除く欧州連合および近隣国）の624の植物園・施設に送付した（この調査にはカナリア諸島、カナリア諸島、アゾレス諸島、マデイラ島が含まれている。物流上の困難により、ロシアの植物園は調査されなかった）。

植物園・施設にリストの種を栽培したかどうか、栽培 および/または 種子として保存された受入数、現在の保全の取り組みを記録するよう尋ねられた。

結果

ヨーロッパ 29 カ国にある 119 の植物園のうち 105 園が、ベルン条約に記載された絶滅危惧植物 573 種のうち 308 種を栽培していることが調査により示された。また、同調査では、14 カ国にある 25 の植物園が、ベルン条約に記載された 27 種に関する 51 件の保全事業を実施していたことが分かった。

特に、大多数の分類群が少数のコレクションに含まれ、野生起源ではない収蔵品が大半を占め、記録文書が不適切であることが本調査で確認された。

考察

ヨーロッパの植物園は、アドホックな収集と交換により蓄積されたものとはいえ、多様な分類学的及び生態学的な構成を持つコレクションを維持するための園芸学的な技術を備えている。従来のコレクションの役割では、分類学研究、教育、及び公共展示での古典的な機能を果たすための、分類学的な多様性（ α 多様性）が強調されてきた。これは、遺伝的及び個体群統計学的な管理を必要とする絶滅危惧種の管理と完全に合致するものではない。既存の植物園コレクションの保全設備については疑いを持つことが必要である。ほとんどの収蔵品は、分布域ではない国で、雑多なコレクションの中に置かれており、収蔵品としてのデータが不十分である。保全を目的とした絶滅が危惧される分類群の長期栽培を雑多な植物園コレクションの中で実施することは、交雑や人為選択のリスクがあるため避けるようにすべきである。そのため、古くからある植物園の収蔵品を保全の目的（再導入など）に使用する際には、慎重さが求められる。しかし、そのような絶滅危惧種の蓄えは、園芸技法の開発や、公共的な展示及び教育の実施において重要な役割を演じることもある。

生息域外での管理のために効果的な種の選択は、再導入の成功確率、費用効果、関連する社会的及び経済的要因といった事項によって方向づけられる。ヨーロッパの植物園は、効果的な公共展示及び栽培を通じて、目立たない植物（蘚苔類など）、ならびに作物近縁種、薬用植物、香料植物といった文化的及び経済的に重要な植物群の保全を維持する上で、大きな役割を果たすことができると考えられる。園芸学の効果的な応用としては、とくにヨーロッパの絶滅危惧種が伝統的な農業景観の一部をなし、野生集団の維持に人間による介入が不可欠である場合において、生息域内集団を管理することなどが考えられる。ヨーロッパでの効果的な対応に向けて、以下のような行動が提唱される（Wyse Jackson and Maunder 1997 に基づく）。

- ・植物園による保全への投資の優先事項を定めるために、効果的な判定基準を策定する。米国及びオーストラリアでの地域的植物保全ネットワークの経験を応用し、ヨーロッパにおける保全用コレクションの遺伝的及び個体群統計学的管理の基準を確立する。
- ・ヨーロッパの植物園と既存の EU 組織（例えば生息地指令、汎ヨーロッパ生物景観多様

性戦略、Parks for Life、及び Planta Europea、MEDUSA など、その他の植物保全計画）との間に緊密な連携を確立する。

- ・各国の生物多様性行動計画での指定、関連する IUCN/SSC 専門グループ（例えばヨーロッパ植物、薬用植物、地中海島嶼植物）による評価など、国及びヨーロッパの優先事項に基づく国家的ネットワークのプログラムを確立する。

- ・植物多様性が高い地域において、植物園の能力を増強し、それらの施設を生息域内保全活動に組み入れる。

- ・生物多様性と保護区の担当官庁の間で密接な協力を確立し、生息域内集団の管理（例えばスペインのバレンシアに設立されたマイクロリザーブシステム）及び保護区内の植物園施設の設置のために選択できる方法を探る（Bañares-Baudet and Padilla Cubas 1997）。

- ・ヨーロッパの植物園自体の、及びこれらと協力する保全機関との間で、現状のデータ、科学的及び園芸学的な専門知識を交流させるための電子的情報交換能力をさらに発展させる。

- ・植物保全技術及び園芸学における実用的訓練を発展させるとともに、植物園と研究施設との協力を強化することにより、職業的な園芸の基準を改善する（Affolter 1997）。

- ・影響力を持ち、比較的裕福な都市住民に対して植物保全の問題に関する働きかけを行う手段として、都市の植物園を活用する教育プログラムを策定する。

生息地の破壊と植物多様性の喪失はヨーロッパで進行し続ける。植物多様性の高い地域において既存の保護区のネットワークは不十分である（Castro Pargo et al. 1996）。そのため、植物園はこれからも生息域内保全を直接的に支えて行かなければならない（Pavlick 1997）。本研究では、現時点で植物園に収蔵されている絶滅危惧植物の蓄えがヨーロッパの優先事項を完全には反映していないことが明らかになり、生息域内での種の回復を支援する施設及び技能人材（園芸家、植物学者）の供給に向けて、植物園による保全への投資を部分的に移行させるべきであることが示唆された。我々は、既存の生息域内管理活動を補完するものとして、非作物種に関する園芸学的専門知識及び公共的な植物展示の提供という、ほとんどの植物園に備わっている中核的な能力を基盤として、植物園の保全業務を推進するために 4 つの活動を提唱する。

- ・種を回復させる活動に資するため、絶滅が危惧される分類群に関する園芸技法を開発するための応用研究をさらに重視する。

- ・従来の園芸学的コレクションを長期的な栽培に使用するのではなく、むしろ重要な収蔵品の保管施設（種子、組織、及び花粉）の研究及び応用を推進する（Cerceanu Larrival et al. 1995; Francisco-Ortega et al. 1996; González-Benito et al. 1997）。

- ・絶滅危惧植物の人為的繁殖は、暫定的な事業として捉えられるべきであり、種を回復させる活動と密接に結び付けられるべきであり、また状況に応じて、野生集団に対する費用

効果の高い園芸学の応用（除草、病虫害防除、繁殖補助、及び再導入）にも結び付けられるべきである（Bevill et al. 1999）。

- ・植物園の収蔵品の大半は、保全上の価値が限られている。そのため、多くの植物園において最も実用的な貢献は、少なくとも短期的な視点では、保全の問題を一般来園者に効果的に解説することによって達成される。植物園の展示を生息域内保全の資金調達と推進に結び付けるという、ほとんど未開拓の可能性が存在している。

ただし、これらの資源を有効に活用するためには、現在のコレクション管理の基準を改善すること、及び保全への投資と展示を、現地と地域における保全の優先事項に密着させることが必要である。

②

Kayri Hevens, Pati Vitt, Mike Maunder, Edward O. Guerrant jr., Kingsley Dixon (2006) Ex Situ Plant Conservation and Beyond. BioScience, 56(6): 525-531.

タイトル

域外植物保全とその先

目的

我々は、Salafsky ら (2002) および Salafsky and Margoluis (1999) によって概説された概念的枠組みに従い、植物園および他の生息域外保全組織のための一連の指標を開発した。Salafsky らは、生物多様性の保護と管理、法と政策、教育と意識の向上、意識の変化を含む保全のアプローチと戦略の「分類法」を概説している (Salafsky et al. 2002)。我々は、域外で組織が行うことができる現在および将来の役割に重点を置いて、Miller ら (2004) と Bartos and Kelly (1998) が提案している保全計画を評価する項目の他、我々独自の評価項目も追加して、これらのテーマを開発した。

方法

現在の植物園の保全に対する貢献の基本的評価を確立するために、植物園の Web ベースの調査を実施した。この調査は、2004 年の植物園保全国際会議で示された約 400 の域外保全施設と、植物保全センターネットワークの 33 の米国の植物園に送られ、200 以上の植物園が何らかの形で回答し、19 の国から 45 人 (11%) が調査に回答した。

回答した植物園のうち、19 名が米国から、10 名が他の英語圏の人からであり、結果が偏っている可能性がある。言語の難しさが低い回答率に寄与した可能性があることを示した。

調査が完了した 43 の植物園に分析を限定し、保全は植物園の使命の一部であると示された (2 ヶ所の植物園は保全活動を行っておらず、省略した)。

結果

調査の結果、植物園は現在様々な方法で植物の保護に貢献しているが、改良の余地がある。結果の抜粋は以下のとおりである。

※域外保全施設のパフォーマンス指標 (本論の方法の項の設問と結果の部分)

保護/管理

- ・在来の生息地で所有されている面積 ha : 平均 157, 中央値 25
- ・在来の生息地で保護された面積 ha (例.保存協定を通じて) : 平均 301, 中央値 40
- ・在来の生息地で管理されている面積 ha (例.除草剤) : 平均 986, 中央値 130
- ・在来の生息地に復元された面積 ha (例.在来植物が加えられたもの) : 平均 340, 中央値

10

- ・域外保存コレクションの種：回答者の 73%
- ・分類群あたりの受入数（遺伝的多様性尺度）：調査に含まない
- ・正式な再導入計画の種類：回答者の 61%
- ・正式な復興計画の寄付金：回答者の 49%
- ・復旧チームメンバー：回答者の 34%
- ・準備制度への寄付：回答者の 22%
- ・回復された種：調査に含まない
- ・種の保護評価（例：レッドリスト）：回答者の 39%
- ・他の保全機関（地方、国家、国際）との正式な合意：平均 6.8 ± 8.4 、中央値 3
- ・域外保全を削減するために取られた手順：調査には含まない
- ・侵略的な移入を避けるために取られた手順：調査に含まない
- ・優先研究種または生息地、その両方に重点を置いた応用研究プロジェクト：回答者の 63%

法と政策

- ・保全、キャパシティビルディング、および/または持続可能な開発（保全倫理によって推進される制度的意思決定、資源使用の減少、リサイクル、化学物質の責任ある使用、水質の保護を通じて制度的に資源を節約するために取られた制度的意思決定、等）：調査に含まない
- ・政策立案（Web 上で公開されている政策）：調査には含まない
- ・絶滅のおそれのある絶滅危惧種のための連邦当局（米国魚類および野生動物保護局）による施設の認可/ライセンス供与：回答者の 46%
- ・保全問題のための主張またはロビー活動：州または州内で 63%，全国で 44%

教育/意識性

- ・非公式 観察（園内）：回答者の 80%
- ・非公式 アウトリーチ（園外）：回答者の 69%
- ・公式 一次および二次（K-12）：回答者の 69%
（※K-12 は、幼稚園から高等学校を卒業するまでの 13 年間の教育期間のこと）
- ・公式 大学の学部：回答者の 62%
- ・公式 大学卒業者：回答者の 53%
- ・公式 認定プログラム/継続教育/シンポジウム：回答者の 51%
- ・コミュニケーション・査読された一般科学出版物：回答者の 61%
- ・コミュニケーション・査読された生物多様性/保全刊行物：回答者の 56%
- ・コミュニケーション 出版物：回答者の 90%
- ・コミュニケーション 選択肢（例：ウェブページ）：回答者の 80%
- ・環境に配慮した持続可能な実践の実証：調査に含まない
- ・研究機関や共同研究者の保全活動を促進し、本来の種や生息地に損害を与えない種や風景を展示する：調査には含まない

意識の変化

- ・持続可能な利用に貢献する（例えば、経済的に恵まれない地域社会の持続可能な発展を支援する園芸小売、エコツーリズムの促進）：回答者の 49%
- ・市場の圧力を利用する（例：栽培繁殖している株の証明プログラム、過小分類された分類群の不買）：調査には含まない

機関投資

- ・内部的に保全に費やされた運営された予算の割合（すなわち、科学的にではなく上に掲げられた行動に基づくもの;推奨ベンチマークは 25%[Miller et al. 2004]）：12%
- ・優先度の高い地域でのキャパシティビルディングを含む、制度外の保全プロジェクトに費やされた事業予算の割合（例えば、他の保護団体との共有位置;庭園の展示物/解釈と景観レベルの保存との間の機能的リンク）：調査には含まない
- ・職業訓練/保全訓練（保全スタッフだけでなく、すべての職員）：調査には含まない
- ・保全スタッフの数と訓練（フルタイム、パートタイム、および学生/インターン）：平均 9.0、中央値 2.5（従業員の平均 9%が保全のための従業員である）。訓練は調査には含まない。
- ・保護ボランティアの数：平均 40.5、中央値 4.4
- ・毎年担保される助成金：調査には含まない

多くの植物園は、直接所有者または生育地の管理活動を通して、域外保全に直接貢献している。自然地帯を管理していない植物園であっても、直接的かつ間接的に現場保存活動に貢献している。驚くべきことに、43 人の回答者のうち 3 人だけが、積極的な保全調査プログラムを実施していると回答した。

考察

高い植物の多様性がある既存の保護地域のネットワークが、すべての植物の多様性の長期生存を確保するのに十分であるとは考えにくい。したがって、生息地の管理、野生の個体数の回復管理は、人間が支配する景観における野生の多様性の管理を通じて、現場での保存を直接支援するための現場外の活動が引き続き必要となる。

保全施設は、回収される種や個体群、復元された地域や資源、教育（有益な変化をもたらす公衆や利害関係者への奉仕を含む）の観点から、経済的活動と資源の価値の定量的証拠を提供することができる。なお、このような活動の影響を正確かつ定量的に評価することは、より困難な課題であり、プロジェクトレベルで実施する必要がある。

適用されている地域レベルおよび種レベルの研究と管理、専門家とボランティアの取り組み、すべての植物園活動への包括的な展望を統合しようとする保護とアウトリーチに関するさらに広い視野が必要である。多くの植物園は、その使命が進化するにつれて、このアプローチを採用しており、分類学的に多様で活字によるコレクションの展示から真の保全

組織の運営までを拡大している。現代の植物園は収集と展示だけではなく、野生生物の種や生息環境の回復への貢献という点でも評価すべきである。

③

Sandrine Godefroid, Carole Piazza, Graziano Rossi, Stéphane Buord, Albert-Dieter Stevens, Ruth Agurajua, Carly Cowell, Carl W. Weekley, Gerd Vogg, José M. Iriondo, Isabel Johnson, Bob Dixon, Doria Gordon, Sylvie Magnanon, Bertille Valentin, Kristina Bjureke, Rupert Koopman, Magdalena Vicens, Myriam Virevaire, Thierry Vanderborght (2011) How successful are plant species reintroductions? *Biological Conservation*, 144(2): 672-682

タイトル

植物種の再導入はどれくらい成功しているか？

目的

希少種の回復と修復目的のために、世界各地で自然界での種の再導入がますます重要になっている。しかし、植物種の再導入努力の結果はほとんど報告されていない。この論文は、アンケート調査と組み合わせた文献のデータを用いて、使用された方法およびこれらの再導入実験から得られた結果を評価することによって、世界中の 249 種の植物の再導入について、以下の 3 点を分析した。

- (1) 自然界の生存可能な自立的集団を確立し、有意に増強するには、これまでに成功した植物種の再導入がどの程度成功したかを調べること。
- (2) 植物種の再導入が最も成功すると予想される条件を決定する。
- (3) この調査の結果を将来の植物の再導入試験に利用できるようにする。

方法

再導入の成功を評価するために、我々は、再導入された植物の生存率、収量および子実率に焦点を当て既報の論文調査を行った。また、多くのデータが現在未公表であるか、アクセスが制限された報告書であるため、結果が公表されておらず再導入を行ったか疑わしい 473 の植物園、大学、保護団体に対してアンケート調査を行った。

あわせて、再導入の成功または失敗は、多くの要因によって引き起こされる可能性が高いため、再導入成果の重要な予測因子を特定するために多変量解析を行った。

結果

結果は、再導入された植物の生存率、収量および結実率がかなり低いことを示している（平均 52%、19% および 16%）。さらに、我々の結果は時間の経過とともに個々の実験において成功率が低下することを示した。文献で報告された生存率は、調査参加者が言及したもの（平均 33%）よりもはるかに高い（平均 78%）。

また、本研究は保護された場所での作業、苗木の使用、再導入された個体数の増加、多

様な集団からの物質の混合、安定した供給源集団からの移植物の使用、敷地の準備または管理努力、および情報、標的種の遺伝的変異についての様々な要因を確認した。

さらに、植物再導入研究の解釈を大きく制限する以下の一般的な実験計画の欠点を明らかにした。

- (1) 再導入後の不十分なモニタリング（通常は4年後に中止）。
- (2) 不十分な文書化、特に失敗と見なされる再導入については深刻である。
- (3) 既存の植物集団の減少の根本的な理由の理解の欠如。
- (4) 短期的成果に基づく成功の過度に楽観的評価。
- (5) 再導入プロジェクトの達成基準が不十分であること。

考察

我々の結果は、出版物が最も成功した実験に偏っていることも示している。これは、否定的な結果が公表されにくい、または無関心とみなされており (Fahselt 2007; Menges 2008)、多くの失敗した試みが未公表のまま残っている可能性がある (Berg 1996)。そのため文献レビューだけで得られた見解は、成功したプログラムの過度な表現によって偏っている可能性があると主張することもできる (Reading et al. 1997)。しかし、調査からの生存率と文献からの生存率との間の有意な差 (2~3 倍高い) は、調査データにおいて偏りが実質的に低いことを示している。

また、本研究は、植物の再導入結果に影響を及ぼすような様々な要因を特定した。複数の集団から由来する材料を使用することによって、再導入の成功率は高まる。個々の集団が十分な遺伝的変異性を有する場合、複数の供給源集団は必要ではないかもしれない、集団間の遺伝的分化の保存が目標である場合には望ましくないかもしれない。再導入の成功のために複数の集団の使用が必要と思われる場合、新しい複合集団の確立は既存の野生集団から十分離れて遺伝子流入を妨げるべきである植栽の準備または植え付け後の管理は再導入の成功確率を高めた。再導入デザインへの管理手段の組み込みは、再導入の成功率の向上にもつながる可能性がある。

以上から、導入された植物の生物学ではなく、方法論（間違った生息地）または環境要因（捕食者、変化する生息地）に主に起因する理由から再導入の失敗が生じたことを示唆した。

我々はまた、再導入プログラムの多くの弱点を明らかにした。導入提案に明白な目的と目的が達成されたかどうかを判断するのに適切なモニタリング計画を持つことが重要であり、それは10年以上の長い時間スケールで実施すべきである。しかし、域外保全は植物種の回復の最後の手段であり、決して第一の選択肢ではない。再導入が必要だと言うのではなく、必要と思われる場合に行うことができるようにすることが目的である。

④

Frey L. Walck, Siti N. Hidayati, Kingsley W. Dixon, Ken Thompson, Peter Poschlod (2011)
Climate change and plant regeneration from seed. *Global Change Biology*, 17(6): 2145-2161.

タイトル

気候変動と種子からの植物の再生

目的

植物の再生の中核である温度と水の供給は、種子の休眠（開始、休憩）と発芽に不可欠な要因である。本研究では、気候変動が植物の再生に及ぼす影響、特に気温と湿度に最も影響を受ける休眠と発芽を評価する。種子の休眠と発芽について簡単に概説した後、気候変動の枠内で生態系間の発芽戦略を検討し、現在までに実施された気候変動に関する研究を調査し、生態系を制限する主な要因（温度対湿気）に基づいて幅広いカテゴリーに分類し、さらに気候変動の影響を予測するために、生態系と種子関連の重要な形質を特定する。

方法

本研究では 1) 種子の休眠と発芽について、続いて、2) 温度制御生態系における再生を調べるため、生態系の概要・種子の休眠と発芽の問題、雪と永久凍土に関連する現象・季節性の出芽に及ぼす穏やかな冬の影響・フェノロジー的側面・個体群レベルの結果・分布範囲の結果を、さらに、3) 湿気を制御した生態系における再生を調べるため、生態系の概要・種子の休眠と発芽の問題・個体群レベルの結果・植物群落レベルの成果・エルニーニョの影響、さらに、4) 気候変動が種子生存率・種子成熟度・種子量に及ぼす影響、5) 気候変動が土壌種子バンクに及ぼす影響、6) 気候変動に対する種の対応、7) 許容範囲内の持続性、8) 景観の移動能力、9) 種子および実生の形質における進化的変化について、それぞれレビューした。

結果

地球規模の気候変動による温度および降水の予測される変化は種の地理的分布を変えるだろうが、移動能力は制限されているのでその反応を大きく制限する。

絶滅のおそれのある種の種子特性は、気候変動に遅れをとらないように比較的迅速に進化し、環境や経済に悪影響を与える可能性がある。森林生態系に関連する重要な問題については、地球温暖化に対する植物の反応をより十分に理解し、計画するためには、草本以外の種子の進化に関する研究が必要である。

種子からの植物再生に対する気候変動の影響は、個体群および群落レベルで予測されている。種子の休眠と発芽は、種子の成熟と塊、気候変動の影響、および他の気候に影響された要因と組み合わせた場合の土壌種子形成を介して直接的および間接的に理解するため

の重要な焦点として役立つ。発芽のタイミングに影響を与えることによって、気候変動は、いくつかの種の生命周期（例えば、年1回の頻度と2年ごとの頻度）を非周期化する。実生発芽の定量的変化は、集団およびそれらの構造の大きさに影響を及ぼす。種間の発芽の変化や種子の春化の減少による活力の低下は、競争的相互作用を変化させ、ますます平衡な気候が地理的分布を変える。

全体として、地域の種の構成と多様性は、気候変動の結果として、元の状態とは異なる構成になることが示唆された。

考察

気候変動後の植物の再生は、温度および湿気を制御した生態系の両方で管理されるだろう。ツンドラや北方林および樹木の移行帯について研究されてきたが、温帯地域や硬葉樹林ではあまり重視されておらず、熱帯雨林や熱い砂漠ではほとんど研究されていない。重要なことに、5つの地中海のバイオマスはすべて生物多様性のホットスポットであり、気候変動の結果として主要な生物多様性損失のインパクトゾーンであると予測されているため、種子回復力に関してはより緊密な気候研究が必要である。したがって、研究の進んでいない生態系やバイオームを対象とした研究は、より正確に気候変動への影響を予測する能力を高め、保全対策を強化されるようになるだろう。根底にあるメカニズム（休眠など）はほとんど注目されておらず、気候変動の複雑さは一連の流れを調べることによって解明される可能性がある。

解決を必要とする重要な問題は、「温暖化は寒冷気候の種が層別化の許容範囲内でどのように変化するか?」、「休眠休憩と煙刺激発芽との間の相互作用は火災増強とは何か?」、「いくつかの熱帯地域の降水量が減少すると予想されるが、難分解性の種がどのように影響を受けるのか?」、「土壌水分の変化は暖かい環境種の後どのように影響するか?」、「土壌中に吸収された種子の寿命と土壌湿度との関係は何か?」である。

典型的な生育地の中で播種実験を、その範囲の中心から現在の分布の外に、将来のシナリオに似た勾配（例えば中央ヨーロッパから南ヨーロッパ）に移すことを促すことは、多数の種、特に気候勾配に沿った休眠・休止と発芽、成長と生殖のための鉛直効果に至る温度と湿度の範囲を知ることは、モデリングに役立つだろう。植物の再生に影響を及ぼす進化的反応の知識は、主に草本の種に基づいている。少なくとも一部の植物では、種子の形質が比較的迅速に進化し、気候変動に追いつくことができることを示した。しかし、我々は環境変化に対応した発芽行動に関する種の可塑性/適応についてはほとんどわかっていない。気候変動や他の環境への影響に関して、発芽率はどのように変化するのか、気候変動に対する種子の適応性や可塑性をより完全に理解し、将来の世界が荒廃しないようにするためには、在来種や野生種および特定のグループ（狭い耐性または深い休眠種など）を対象とした研究が最も必要であると考えられる。したがって、気候変動または気候変動に関連する長期モニタリング研究は、将来の種子の生態学的研究もモニタリング項目の一部

とすべきである。

⑤

Bridge, T., Guinotte, J. (2012) Mesophotic coral reef ecosystems in the Great Barrier Reef World Heritage Area: Their potential distribution and possible role as refugia from disturbance. Great Barrier Reef Marine Park Authority, Townsville.

タイトル

グレートバリアリーフの世界遺産地域における中深度サンゴ群集生態系：潜在的な分布域と攪乱に対する避難地としての可能性

対象：サンゴ、避難地、中深度サンゴ群集、管理計画

評価：オーストラリアのグレートバリアリーフにおける中深度のサンゴ群集生態系の特徴と避難地としての可能性について検討

内容

サンゴの避難地としての中深度の特徴

● 白化

多くの中深度サンゴ群集生態系（MCEs）は、近隣の浅場のサンゴが大量に死亡するような場合でも顕著な白化からは免れたのと報告がある。1998 年の大規模白化時にオーストラリア西部の Scott Reef において、水深 10 m 以浅の浅場に生息するサンゴが 75%程度死亡した際にも、水深 20 m から 75 m までの中深度では顕著な死亡個体は確認されなかった。同様の傾向は2002年のグレートバリアリーフや2010年のスマトラ島でも報告されている。MCEs に関する長期データや生態学的過程の知見が少ないことから、比較研究を行うに至らないことが多いものの、浅場のサンゴに影響を与えるような高水温による大量斃死は MCEs ではあまり見られない。

● 熱帯低気圧

熱帯低気圧の影響を受けてグレートバリアリーフのサンゴの被度は大きく低下した。嵐による波のエネルギーは水深とともに減少するため、MCEs では浅場と比べて、熱帯低気圧によるサンゴの被度の低下が生じにくいと考えられる。しかしながら、フランス領ポリネシアにおいて 1982 年から 1983 年にかけての熱帯低気圧により水深 35 m 以上のサンゴが全壊したとの事例もあり、水深だけでは低気圧に対する脆弱性の良好な指標とならないことが分かる。

● 粒子の沈降・堆積

MCEs は岸から離れていることで通常は粒子の沈降・堆積の影響を受けにくい。また、

光が制限された環境にある。

- 海洋酸性化

海水中のアラゴナイト飽和度の低下はサンゴの成長速度を低下させ、元々成長速度が遅い中深度のサンゴに悪影響を及ぼすことが懸念される。酸性化によりリーフの構造が弱化するおそれもあり、それによって浸食や波浪による被害をより一層受けやすくなると考えられる。

- 幼生供給源

MCEs は浅場のサンゴと比べて攪乱の影響を受けにくいことは明白であるものの、MCEs から浅場へとどの程度幼生が供給されているかは十分に明らかになっていない。最大水深が 27 m までと限られるものの、鉛直方向のサンゴのコネクティビティを検証した最近の研究からは、浅場の生息域への供給源としての MCEs の潜在的な価値に関する貴重な見識が得られた。

中深度サンゴ群集に関連した管理方針

1. 浅場や中深度のサンゴに関するデータを得るため政府機関との協力関係を強化する。
2. 面的だけでなく三次元的な視点に基づいてサンゴ礁や浅瀬を含んだ海中公園地域を評価する。
3. これらのサンゴ群集の将来的な脆弱性をさらに調査する。
4. 攪乱に対する避難地の潜在的な役割に関する既存の知見に基づいて、中深度サンゴ群集の生息場を最優先で保全する。
5. グレートバリアリーフにおいて確認された中深度サンゴ群集の生息地を、これまで行っている長期のモニタリングプログラムに追加することが望ましい。
6. 代表的な中深度サンゴ群集生態系が見られる海域を特定し、将来の管理計画に加える。

参考資料

「日本における中深度サンゴ群集の報告事例」

- 沖縄県本部半島 (Sinniger et al., 2013 ; Praselia et al., 2016)
- 沖縄県恩納村沖 (White et al., 2013)
- 沖縄県久米島 (木村ら, 2011)
- 沖縄県西表島・石垣島

(http://www.u-ryukyu.ac.jp/univ_info/announcement/data/press2014052701.pdf)

Praselia, R., Sinniger, F., Harii, S. (2016) Gametogenesis and fecundity of *Acropora tenella* (Brook 1892) in a mesophotic coral ecosystem in Okinawa, Japan. *Coral Reefs*, 35, 53-62.

Sinniger, F., Morita, M., Harii, S. (2013) “Locally extinct” coral species *Seriatopora hystrix* found at upper mesophotic depths in Okinawa. *Coral Reefs*, 32, 153.

White, K.N., Ohara, T., Fujii, T., Kawamura, I., Mizuyama, M., Montenegro, J., Shikiba, H., Naruse, T., McClelland, T.Y., Denis, V., Reimer, J.D. (2013) Typhoon damage on a shallow mesophotic reef in Okinawa, Japan. *PeerJ*, 1, e151.

木村匡・下池和幸・鈴木豪・仲与志勇・塩入淳生・田端敦・田端裕二・藤田喜久・座安佑奈・山野博哉・波崎直子・横井謙典・小笠原敬・安村茂樹 (2011) 久米島ナンハナリ沖で発見された中深度の大規模ヤセミドリイシ群集. *日本サンゴ礁学会誌*, 13, 43-45.

⑥

The NOAA Coral Reef Conservation Program and the Department of Land and Natural Resources, Division of Aquatic Resources (2017) Coral bleaching recovery plan: Identifying management responses to promote coral recovery in Hawai'i.

タイトル

白化からの回復計画：ハワイ州におけるサンゴの回復を促進させるための対応策の特定

対象：サンゴ、白化、管理計画

評価：アメリカのハワイ州において白化からの回復を促進させるための管理計画について検討した。

要旨

『Coral Bleaching Recovery Plan』の目標は、2014年から2015年にかけての全球的な白化現象後のサンゴの回復を促進させることである。サンゴの白化は主に高水温や強光によってもたらされるストレス反応であり、サンゴが共生している褐虫藻を放出することにより生じる。白化したサンゴは弱った状態となり、高水温や強光が続く場合には最終的に死亡する。今後の政策と DLNR (Department of Land and Natural Resources) により作成された規則に関連した公開されている知見と専門家の意見を集約することで、ハワイでの大規模白化の後のサンゴの回復を促進させることができる管理上の行動を特定することを目指した。

『Coral Bleaching Recovery Plan』はこれらの知見をまとめ、ハワイにおけるサンゴの回復を促進させるための管理行動を実行する有効的な能力をサポートする目標を立てた。

専門家による判断評価と文献調査によって最も重要だとされた行動は、永続的なノーテイク海洋保護区 (MPAs) 及び植食者の漁業管理を行う地域 (HFMA) のネットワークの確立であった。空間的な管理と漁業規制の選択を含む前述の最優先の行動をどこで実施することがサンゴの回復に関して最も好ましい効果を得られるかを評価することが次の課題である。また、管理行動がどのように将来のサンゴの白化に対する弾力性を高めることができるかに関する評価が必要である。白化現象は規模と頻度が将来的に増加すると予測されている。そのため、頻発する気候攪乱に抵抗を示すことのできるサンゴの能力を支えるため、回復力に基づく管理の枠組みを検討しなければならない。

内容

サンゴの回復を促進させるための手順及び対策は下記の1)～4)の通りである。

1) 資源管理プログラムの役割を定義する

200を超える文献調査から、以下の6つの管理目標を特定した。

- ①サンゴへのさらなる損傷を防ぐ、②藻類の過剰な増殖を抑制する、③植食者を保護する、④サンゴの新規加入を促進する、⑤死亡したサンゴを取り除く、⑥新たなサンゴの成長を促進させる

2) 管理を行う優先地域を選定する

高水温への曝露や2014年から2015年にかけての白化後の高い死亡率の情報に基づいて管理行動の介入を行う4つの優先的な地域を選定した。この優先地域は管理行動の介入が最も必要となる場所のテンプレートとなっている。

3) 生態学的に効果のある管理行動に関する専門家の意見を集約する

管理手段	管理行動
空間的な管理	永続的なノーテイク海洋保護区のネットワークを設定する
	一時的なノーテイク海洋保護区のネットワークを設定し、保護区を順番に移動させる
	白化の被害が大きい地域では水中での人間活動を禁止する
	植食者を保護するために、植食性魚類の採取を管理する永続的なエリアを設定する
陸上での方策	陸域からの土砂の負荷量を削減するため他機関と連携する
	陸域からの栄養塩・化学物質の負荷量を削減するため他機関と連携する
漁業規制	商用・非商用に関わらずウニ類の全ての採取を禁止する
	商用のウニ類の採取を禁止する
	商用・非商用に関わらず植食性魚類の全ての採取を禁止する
	商用の植食性魚類の採取を禁止する
	商用・非商用に関わらずブダイ類の全ての採取を禁止する
	ブダイ類を保護するためサイズの制限を設定する
	ブダイ類を保護するため漁具の制限を設定する
	観賞魚としての植食性魚類の採取を禁止する
	観賞魚としての植食性魚類の採取を一時的に禁止する
養殖方法	大型藻類の生長を抑制するために植食性魚類を養殖し放流する
	白化に強いサンゴを特定、採取、増殖し移植する

駆除方法	外来種であるアオノメハタ (<i>Cephalopholis argus</i>) の駆除を試みる
	オニヒトデ (<i>Acanthaster planci</i>) の駆除を試みる
その他	サンゴ礁の保護に関する規則の有効性を確保するための施行努力を高める
	サンゴに悪影響を与えることが知られているオキシベンゾンを含まない日焼け止めの使用を推奨する
	白化の被害が大きい海域に人工の礁を創出する

4) 最も高く評価された管理行動がどの程度回復目標を満たすことができるかを示す実証的証拠を検討する

管理手段	管理行動
空間的な管理	ノーテイク海洋保護区を設定する
	植食魚の漁獲を管理する地域を設定する
漁業規制	刺し網の使用を禁止する
	ヤスを用いた全ての潜水漁を禁止する
	商用・非商用に関わらず全ての植食魚の捕獲を禁止する
	商用・非商用に関わらず全てのブダイ類の捕獲を禁止する
	ブダイ類を保護するためサイズの制限を設定する
	ブダイ類を保護するため漁具の制限を設定する
陸上での方策	陸域からの土砂の負荷量を削減するため他機関と連携する
	陸域からの栄養塩の負荷量を削減するため他機関と連携する
養殖方法	白化に強いサンゴを特定、採取、増殖し移植する
その他	サンゴ礁の保護に関する規則の有効性を確保するための施行努力を高める

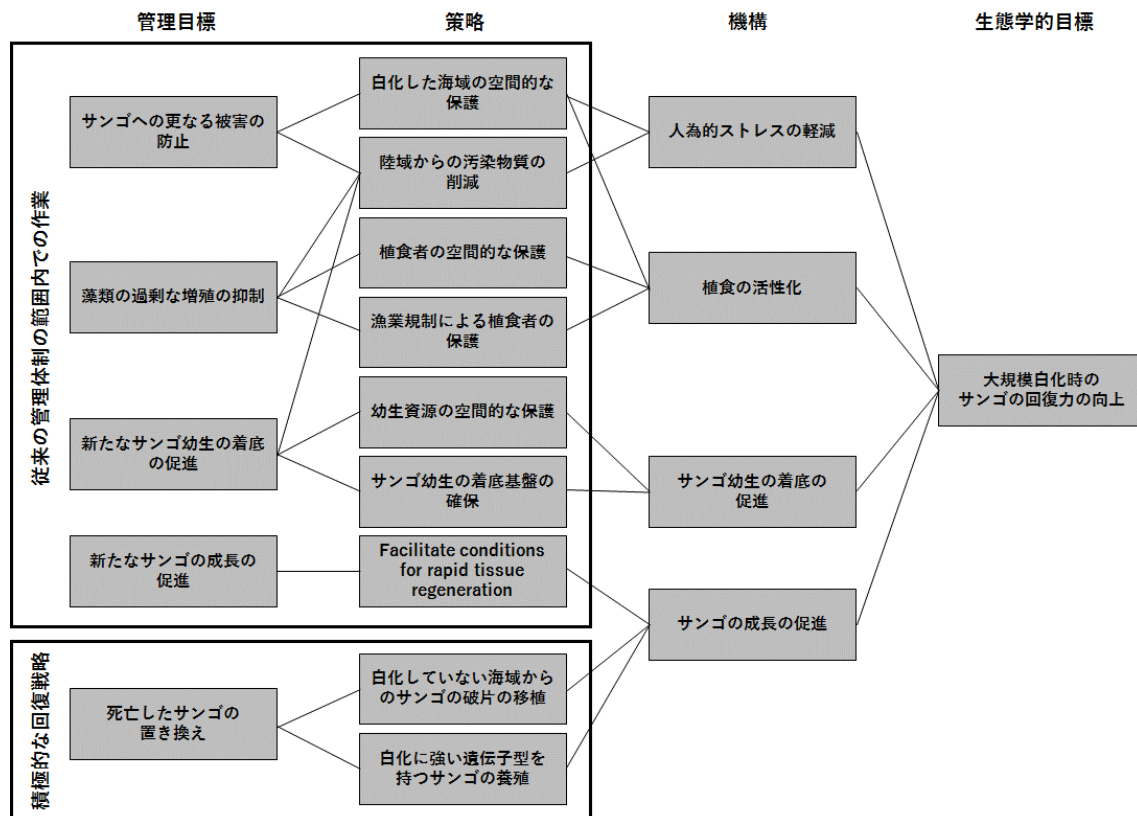


図. 文献レビューに基づく大規模白化後の管理目標及び生態学的目標の関係性に関する模式図.

⑦

Hagedorn, M., van Oppen, M.J.H., Carter, V., Henley, M., Abrego, D., Puille-Stephan, E., Negri, A., Heyward, A., MacFarlane, D., Spindler, R. (2012) First frozen repository for the Great Barrier Reef coral created. *Cryobiology*, 65, 157-158.

タイトル

グレートバリアリーフのサンゴを対象とした遺伝子の凍結保存

要旨

グレートバリアリーフ（GBR）におけるサンゴの保全と繁殖に関する新しい手法の開発のため、2011年11月の大規模産卵時に Reef Recovery Initiative として知られているサンゴ及び凍結保存に関する科学者の国際的なグループが協力体制を敷いた。GBRにおいてサンゴ礁を形成する重要な2種である *Acropora tenuis* 及び *Acropora millepora* を対象とした初の遺伝子の凍結保存が成果として挙げられた。数十億の細胞を持つ約190の冷凍サンプルが長期保管されている。精細胞の凍結保存は成功し、解凍後成熟した卵と受精させ、幼生が形成されたことが確認された。さらに、成育中の幼生を分離し、多機能細胞を凍結保存した後、解凍後には生存能力がみられた。現在、オーストラリアにおけるサンゴの多様性を保護する協力的かつ実用的な保全管理手法を開発するため、実験室からサンゴ礁へと活動の場を移しているところである。

対象：サンゴ、域外保全、遺伝子保存

評価：サンゴの遺伝子の凍結保存の手法を確立させ、実海域での複数のサンゴを対象としたサンプルの採取を進めている。

内容

全球規模でサンゴ礁は前例のない速度で悪化しつつある。地域スケールでみると、サンゴ礁は農地からの汚染物質や栄養塩、土砂の流入や漁業行為、採掘などで損傷を受けている。保護区の設定やサンゴへのストレスの軽減といった現場での保全活動はサンゴの遺伝的多様性の損失のスピードを低下させることはできるものの、気候変動による全球規模の影響は個体群の減少をもたらし続けると考えられる。そこで、グレートバリアリーフやその他の地域での脅威を弱めるため、冷凍サンプルを使用した遺伝子バンクを構築することにした。

2011年11月の大規模産卵時に Reef Recovery Initiative (<http://www.reefrecovery.org/>) と共同で調査・実験を行った。Pelorus 島の西側において *Acropora tenuis* (ウスエダミドリイシ) を8個体と *Acropora millepora* (ハイマツミドリイシ) を8群体採取し、24時間以内に実験室に持ち帰り、産卵の間は濾過海水で満たされた水槽の中で飼育した。

A. tenuis と *A. millepora* は雌雄同体であり、日没のおよそ 2 時間半後に卵と精子の放出がみられた。精子と海面に浮いた卵を分離し、ピペットを用いて採取した。精子は濾過海水と 10% の DMSO（ジメチルスルホキシド）に 20 分間曝露し、25℃ から -80℃ まで 1 分間に 18℃ の速度で冷却し、液体窒素の中に 10 分間以上放置した。凍結保存した精子はその後 30℃ で解凍し、卵と受精させた。世界的にミドリイシ類のサンゴが減少する中で遺伝的多様性を保護するため、この技術は今後規模を拡大するとともにより洗練されるであろう。凍結した精子のサンプルを用いることで、新たなサンゴを生み出すことや小規模な個体群での遺伝的多様性を増加させることが可能となった。

本研究の成果は、オーストラリアにおいてサンゴ礁を形成する重要な 2 種のサンゴ（*A. tenuis* 及び *A. millepora*）を対象とした初の遺伝子の凍結保存を行ったことである。数十億個の細胞を持つ約 190 もの凍結サンプルをオーストラリアの動物園内で長期保管を始めた。

参考資料

「Reef Recovery Initiative (<http://www.reefrecovery.org/>) による遺伝子保存を行っている種と採取海域」※2018 年 1 月時点

- オーストラリア グレートバリアリーフ : *Acropora aspera*, *Acropora cytherea*, *Acropora florida*, *Acropora loripes*, *Acropora millepora*, *Acropora nobilis*, *Acropora sarmentosa*, *Acropora spathulata*, *Acropora tenuis*, *Acropora valida*, *Acropora hyacinthus*, *Astrea curta*, *Goniastrea aspera*, *Platygyra daedalea*, *Platygyra lamellina*
- アメリカ ハワイ : *Fungia scutaria*, *Montipora capitata*, *Pocillopora meandrina*
- アメリカ フロリダ : *Acropora cervicornis*, *Acropora palmata*, *Orbicella faveolata*
- プエルトリコ : *Acropora palmata*
- ベリーズ : *Acropora cervicornis*

⑧

Kavousi, J., Keppel, G. (2017) Clarifying the concept of climate change refugia for coral reefs. ICES Journal of Marine Science, doi:10.1093/icesjms/fsx124.

タイトル

気候変動に対するサンゴの避難地の概念

要旨

避難地は人為起源の気候変動のような環境変化において生物多様性の持続性を促進させ、その結果多くの野生のサンゴの生残に大きく寄与する。文献量の増加にも関わらず、サンゴの避難地に関する概念は十分に定義されていないのが現状である。そのため、気候変動に対する避難地は、一時避難場所や原始の生息地、適応・順応といった生理学的なプロセスといった異なる現象と混同されてきた。本研究では避難地の潜在的な可能性に影響を及ぼす以下の6つの基準を提案する。①長期間の緩衝、②複数の気候ストレスからの防御、③アクセス性、④微気候の異質性、⑤サイズ、⑥気候以外の攪乱要因に対する弱い曝露。

①及び②(数十年規模の環境条件の長期的な緩和効果と複数のストレスへの緩和効果(気候変動、特に海水温の上昇と海洋酸性化に関する好適な環境条件の提供))に基づき、効果的で高い能力を有するサンゴの避難地を明らかにすべきである。③～⑥の残りの基準は必ずしも必須ではないが、潜在的な避難地の能力を定量化する際に重要である。

対象：サンゴ、気候変動、避難地

評価：気候変動に対するサンゴの避難地を選定する際に考慮すべき基準について議論した。

内容

● 気候変動に対する避難地の特定のための基準

長期間かつ信頼できる高解像度の環境データはサンゴの避難地を特定する際の鍵となる(Keppel & Kavousi, 2015)。カリブ海での研究を例にすると、毎年白化が生じるようになるタイミングは、水平解像度が1度×1度のデータを用いた場合(van Hooijdonk et al., 2013)と比べて、11 km と 4 km のデータの場合には10～15年ほど遅くなる結果が得られた(van Hooijdonk et al., 2015)。文献調査から、避難地の能力を定義する6つの要素を以下に挙げる。

①長期間の緩和効果

気候変動の影響に関するストレスは今後数十年に渡って増加するため、避難地は良好な環境条件を保ち続けなければならない。例えば、温暖化によって湧昇流が弱化する可能性が指摘されている。そのため、避難地は時間の経過とともに環境変化を緩和する能力に限界がある(Keppel & Wardell-Johnson, 2015)。さらに、これまでの白化時に避難地となって

いた場所は、その後のより激しい白化時には避難地とならなかった事例が指摘されている。長期間の緩和効果は生息地内（対象とする分類群の現在の分布域）の避難地に加えて、生息地外（現在の分布域外）の避難地を考える上でも重要である。

②複数の気候ストレスからの防御

気候変動は様々な機構を通じてサンゴ礁を含む全球の海洋生態系に影響を与えている。例えば、海水温の上昇や海洋酸性化、嵐の強大化、海面上昇、熱塩循環と ENSO パターンの変動、成層強度の変化、病気や侵入種などによる生物学的な脅威の悪化等が挙げられている。

実効的なサンゴの避難地は、サンゴ礁生態系や対象の分類群の持続性を促進するため、先に挙げた気候変動に関する要因に対する十分な緩和効果を有することが求められる。

③アクセス性

対象とする分類群の避難地へのアクセス性は陸上の避難地やサンゴの避難地に関して重要な判断基準であることが知られている。より隔離された避難地はより大きなチャンスを持つ。しかし、アクセス性はどの避難地にとっても必須とは限らない。例えば、避難地内に既に対象種が生息しているような場合には、高いアクセス性は外来種や競合種、捕食者が侵入することにつながる危険性がある。一方で、高緯度のような生息地域外の避難地に関しては、アクセス性は極めて重要な要因である。

④微気候の異質性

地形の複雑さは独特の微気候と大きな異質性を生み出す。これにより、対象とする分類群の持続性を促進する好適なマイクロハビタットが提供される機会が増加する。微気候の多様性が増加するにつれて、最適な気候が時間的に近接して存在する確率が高まるため、微気候の異質性はサンゴの生存率を高める可能性がある。不適な気候イベントを経過してのこのようなマイクロハビタットにおける持続はまた、サンゴの幼生供給に寄与することができるようになる。

⑤避難地のサイズ

サイズは対象とする分類群が存続可能な個体群を維持するための避難地の能力を特徴付ける。サイズの大きな避難地はより多くの種、個体群、遺伝的多様性を支えることができる。

⑥他の攪乱要因に対する弱い曝露

生息地の劣化など気候変動が要因でないストレスも深刻な影響を与えることがある。潜在的に高い能力を有する避難地が人間活動のインパクトが大きな場所で見出されるかもし

れないが、避難地の高い能力を実現するためにはこの影響に起因する二次的なストレス要因が軽減されることが望ましい。

⑨

Done, T. (2001) Scientific principles for establishing MPAs to alleviate coral bleaching and promote recovery. Coral Bleaching and Marine Protected Areas (Proceedings of the Workshop on Mitigating Coral Bleaching Impact Through MPA Design Bishop Museum), 53-59.

タイトル

サンゴの白化被害の軽減と回復の促進のための海洋保護区の選定に関する科学原理

要旨

海洋保護区 (MPAs) の設定は地域規模のサンゴ礁の多様性の保全にとって重要な管理手法である。地球規模の気候変動の観点から生息適地の特定は、海洋環境の悪化を考慮するとともに、サンゴの大規模白化や死亡の頻度の増加を明らかにする必要がある。個々の保護区の配置は、単に高水温への曝露だけを考慮するのではなく、全ての管理できない圧力に関するリスクを分散させるのが望ましい。そのため、保護区の選定過程では、地域規模の種の多様性や現存量に対する全ての脅威に関する評価に基づくことが重要である。

海水温の上昇の観点から、保護区に選定されるサンゴ礁は下記に示した 4 つの特性のうち少なくとも 3 つを満たしていることが望ましい。1) 将来予測されているような高水温に対してサンゴがこれまでに生存できている (高温耐性の遺伝子型を有する)、2) 将来的に高水温への曝露のリスクが低い、3) 広い面積かつ幅広い水深帯を有し、サンゴの多様性が高く、現存量も多い、4) ①多様な種の加入と②他地域への幼生の加入を最適化するような計画上重要な場所。

閉鎖の効果に関する生態学的な成果指標は、個々の海洋保護区及びネットワーク全体の生態系の質の維持・保全に着目すべきである。サンゴの被度のような簡易的な調査は最初の指標としては適しているが、自然の攪乱条件下で被度が大きく変化するような場所では期待される被度と比較して標準化する必要がある。そのため、モニタリングや成果の指標はサンゴの集団統計学やフェーズシフト、生態学的過程、機能群に従って総合的に考慮すべきである。

対象：サンゴ、白化、海洋保護区

評価：サンゴの白化に着目して海洋保護区を選定する際の枠組みについて議論した。

内容

サンゴの大規模白化を引き起こす気候変動に関連した海水温の上昇の頻度増加が高い可能性で生じると予測されており、今後数十年間に生じるであろうサンゴの死亡によってかかっていないほどにサンゴ礁や関連する生息地の有効な保全管理の重要性が増している。

水温上昇の観点から保護区として適している場所は「高水温にさらされていない場所」もしくは「高水温にさらされたにもかかわらず生存率が高い場所」である。高水温にさらされない要因が一時的な冷水塊の移流ではなく、恒常的な流れや湧昇などに基づくものであることが望ましい。保護区に選定されるサンゴ礁は下記に示した4つの特性のうち少なくとも3つを満たしていることが理想である。1) 将来予測されているような高水温に対してサンゴがこれまでに生存できている（高温耐性の遺伝子型を有する）、2) 将来的に高水温への曝露のリスクが低い、3) 広い面積かつ幅広い水深帯を有し、サンゴの多様性が高く、現存量も多い、4) ①多様な種の加入と②他地域への幼生の加入を最適化するような計画上重要な場所。

海洋保護区の計画と設置は、サンゴ礁生態学やサンゴの生理学、サンゴ幼生の生物学、海洋物理学、沿岸海洋学、衛星リモートセンシングといった様々な科学的解析の見識から利益を得ることができる。地球規模の気候変動の観点から、過去の大規模白化時の挙動に基づく将来の海洋保護区のサイトの脆弱性を解明することや、例えば、2020年や2050年にどのリーフが最も脆弱でないかを評価するために解像度の粗い全球・地域規模の気候モデルをダウンスケーリングすることが更なる課題である。

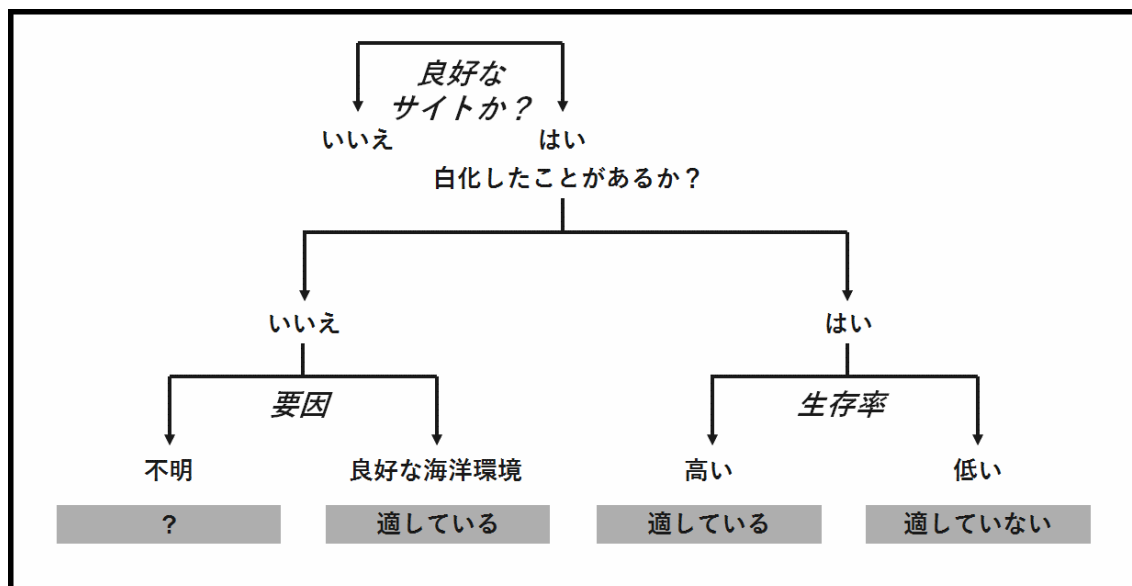


図. 温暖化シナリオにおいてどの地域が生物多様性が良好と評価され海洋保護区として適しているかの検討に関するフローチャート.

⑩

Meynecke, J.-O., Richards, R., Sahin, O. (2017) Whale watch or no watch: the Australian whale watching tourism industry and climate change. *Regional Environmental Change*, 17, 477-488.

タイトル

ホエールウォッチをするかしないか：オーストラリアのホエールウォッチ産業と気候変動

要旨

ホエールウォッチは世界中で 10 億ドル規模の産業である。ホエールウォッチの対象として最も一般的な種の 1 つはザトウクジラ (*Megaptera novaeangliae*) である。ホエールウォッチの際に使用される回遊路、餌場、休息および分娩場所は、海流および水温の変化の影響を受ける可能性がある。ここでは、ホエールウォッチ産業における気候変動の新たな課題に取り組む革新的なアプローチを採用した。ここでは、オーストラリアの東海岸の事例研究に基づいて、気候変動の潜在的影響を評価するためのシステム概念モデルを開発するために、ホエールウォッチ産業の主要な利害関係者による参加型モデリングを行った。この参加型アプローチは、ホエールウォッチの産業活動のシステムにおいて、異なる「要素」間の因果関係（フィードバック経路を含む）を特定した。また、システム全体の変化を評価するために、気候変動（温度など）、政策（ボートの数など）、生態学（クジラの頭数など）、社会経済学（観光客の数など）といった社会経済的および環境的側面を考慮した複数の要素を組み込んだ。次に、ステークホルダーが優先課題（収益率）としたシステムの概念からベイジアンネットワークモデルを開発した。ステークホルダーはこのモデルの構造と定量化に寄与し、感度解析から産業にとって重要な介入点を特定した。我々の研究は、このようなモデリングプロセスが、地元の観光事業者や関係者に対し、全体的またはシステムベースの枠組みの中で合理的な経営判断を行う上でどのように役立つかを示した。このアプローチは他の地域にも汎用できるものである。

対象：ホエールウォッチング、気候変動、利用、管理計画

評価：気候変動の産業に与える影響について、人の利用状況を考慮してモデルに組み込む案を提案。モデルの要素の提案にとどまる。

内容

ホエールウォッチ産業への気候変動などを含む影響について、概念モデルを開発した。Bayesian belief network (BBN) modelling を適用し、気候の変化だけでなく、クジラの個体数、管理戦略の評価などを組み込んだ。管理戦略などの人側の影響の要素の抽出には、ホエールウォッチ産業に携わる地元の方々を呼んだワークショップを開催し、ホエールウォッチ観光に影響し得る要素について、その内容を細かく検討、優先課題を抽出した。さらに、

優先度の高い課題の管理に影響する変数を選択させ、変数間の影響度合いを回答させた。変数としては、海面レベル、天気、休日、気温、水温、風速、行き先、料金、低気圧、規制、モニタリング、教育、海岸からの距離（業者的には遠いとコスト高）などが考慮された。こうした概念モデルとベイジアンネットワークモデルの併用により、適応オプションを提案することができる。適応オプションを導入しない場合は、顧客数の減少や観光運営時のコストの高騰によってホエールウォッチ産業が縮小する可能性を指摘した。ただし、ワークショップで得られる知見は地域によって大きく異なる可能性がある。

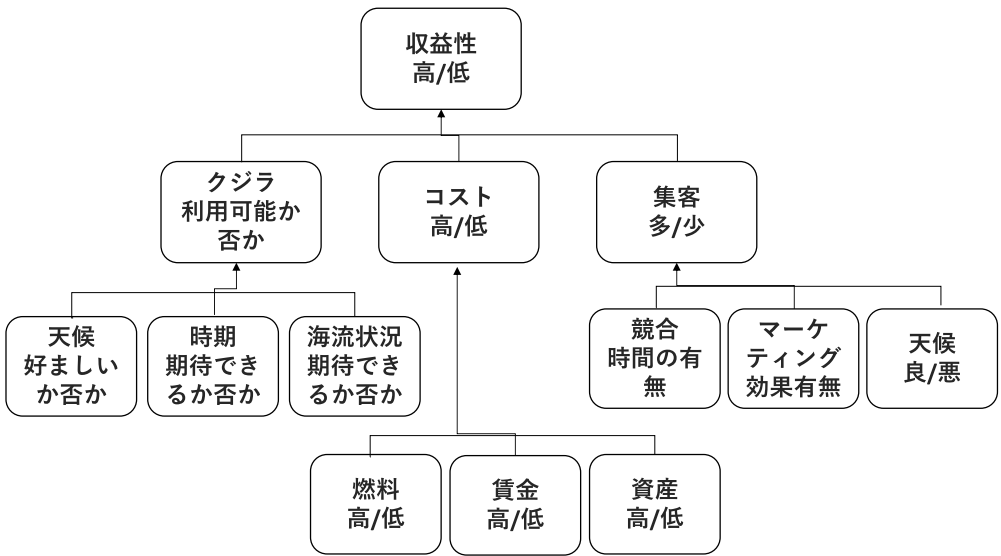


図. ワークショップ参加者が決定したベイジアンネットワークのノード

謝辞

本業務の遂行にあたり、大雪山国立公園の自然保護官の方々（桒 厚生氏、石田 美慧氏、原澤 翔太氏、内海 真弓氏）、自然保護官補佐の大久保 智子氏、岩城 大洋氏、渡邊 あゆみ氏、上村 哲也氏に、慶良間自然保護官事務所自然保護官の小池 大二郎氏、自然保護官補佐の前山 佳子氏、三石 裕弥香氏には現地調査全般の調整をして頂いたほか、現地に関してご教示を頂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頂きました。層雲峡ビジターセンター、旭岳ビジターセンター、ヒグマ情報センター、NPO 法人大雪山自然学校からは過去の植生調査記録をはじめ、定点撮影の写真を提供頂きました。ダウンスケーリングされた将来の気象データは気候変動適応プラットフォームから、積雪に関する将来予測データは国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所の小南裕志氏から、山岳気象観測データは信州大学鈴木啓助教授および立山室堂山荘から提供していただきました。ここに記して謝辞を示します。

付録 1. 大雪山国立公園登山道関係者による情報交換会にて用いた説明素材



平成 28年度、平成29 年度生物多様性分野における気候変動への適応策検討業務の内容

- 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執行し、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。
- 具体的には、現在入手可能な気候変動シナリオによる、①種・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、②生態系サービスに対する気候変動による影響評価、③具体的適応策の検討（保護区管理計画改定、気候変動下での適応策補填の選定、優先保護エリアの選定など）を行う。
- 大雪山国立公園における気候変動の影響評価は2年目であり、現状得られている結果について報告する。

将来予測における不確実性

将来予測には多くの仮定・不確実性が含まれていることに注意

排出シナリオ → 気候変動予測 → 気候予測の解像度 → 植生変化

入力データ：複数の予測シナリオ・不確実性 ⇄ 解析手法：確立の速上

・現在入手可能なデータと複数の手法の組み合わせによる不確実性の幅を推定

使用した排出シナリオ

RCP2.6: 世界平均地上気温の上昇を2℃以下に抑えるシナリオ。

RCP8.5: 2100年における温室効果ガス排出量が最大のシナリオ。気温上昇は2.6～4.8℃ ※ ※ ※。

※ ※ ※ 1986～2005年を基準とした、2081～2100年における世界平均地上気温の変化。IPCC第5次報告書によれば、RCP2.6では0.3～1.7℃、RCP8.5では2.6～4.8℃の範囲に入る可能性が高い。

裾合平（1700m付近）の月別平均気温の将来予測

人為起源の温暖化効果ガス排出シナリオ(RCP)

2050年 月別平均気温 (2046年・2050年)

2100年 月別平均気温 (2096年・2100年)

現状の排出削減以上の削減を行わないRCP8.5シナリオでは、2100年ごろに裾合平の6-8月の平均気温は5.8℃上昇すると予測

2100年の裾合平の気候 (6,7,8月の平均気温の比較)

現在の裾合平：標高1700m

RCP2.6 現在の標高1300m付近に相当

RCP8.5 現在の標高700m付近に相当

黒岳ロープウェイ駅 黒岳温泉付近

黒岳方面 上士幌

高山植生の将来予測

高山植生の区分

(自然環境保全基礎調査植生調査の凡例との対応)

雪田草原

ミヤマキンボウゲ群落
ミヤマクロスゲ、チシマクモマダサ群落
雪田草原
ツルコケモモ、ミズゴケケラス

高山低木群落

高山低木群落
コケモモ、ハイマツ群落
ダケカンバ、ハイマツ群落
ミヤマハンノキ、ダケカンバ群落

高山ハイデ及び風衝草原

高山ハイデ及び風衝草原
コマクサ、イワツメクサケラス
コマバツガザクラ、ミネズオウ群落
エゾマメヤナギ、エゾオヤマノエンドウ群落
風衝草原

高山植生と競合する植生の区分

(自然環境保全基礎調査植生調査の凡例との対応)

ササ群落

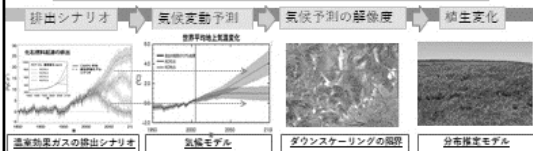
ササ、ダケカンバ群落
チシマザサ、クマイザサ群落
ササ群落
ササ自然草原

亜高山帯森林植生

アカエゾマツ群落
エゾマツ、ダケカンバ群落
ダケカンバ、イワノガリヤス群落
ダケカンバ群落
エゾマツ、ドマツ群落
ヤマハンノキ群落

使用した気候モデル、分布推定モデル

将来予測には多くの仮定・不確実性が含まれていることに注意



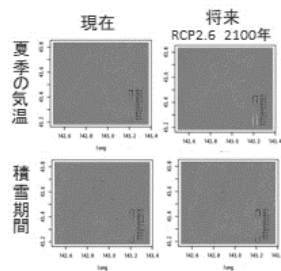
2つのシナリオ × 3つの気候モデル※ × 1kmメッシュ × 6つの分布推定モデル※※

※ 1km × 1kmの解像度の積雪期間のデータが入り可能な3つの気候モデルを選定:
Miroc5, IPSL, Mri-CGCM

※※ 代表的な分布推定モデルのうち、今回のデータに適する6つを選定:
GLM(ポアソン分布およびtobitモデル)、GAM(ベータ分布、tobit)、RandomForest、
Boosted Regression Trees

分布推定で考慮した要因

- 夏季の気温
- 降雨量
- 積雪期間
- 地質(崩れやすさ)
- 地形(平均傾斜、傾斜のばらつき、凹地率、北向き斜面率)



分布推定モデルの仮定

□ 移動分散等に制限がないと仮定

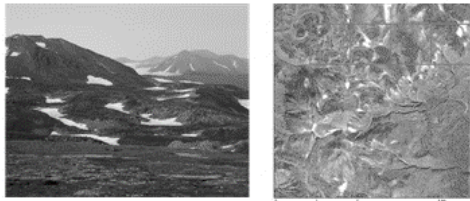
現実にはササや森林が侵入するには、地下茎の伸長速度、種子散布距離、稚樹の定着・成長にかかる時間、などの制約がある。

表裏の変化は、今回の予測よりタイムラグがある可能性大

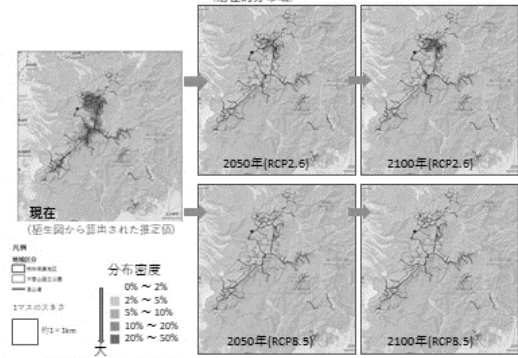


微地形を考慮していない

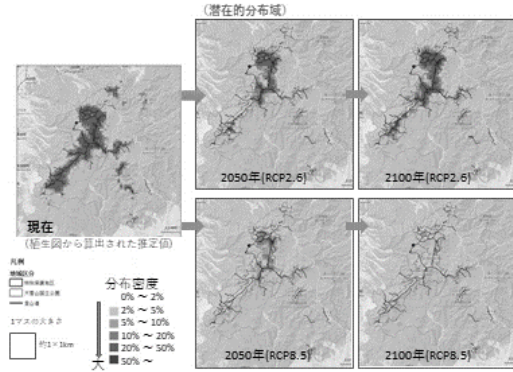
- 現在の積雪予測は約1km × 1kmの解像度
- より小さいスケールでの逃避地は推定できない



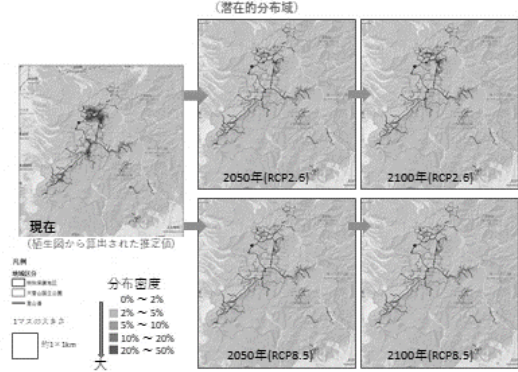
将来予測：雪田草原の分布が可能となる環境 (潜在的分布域)



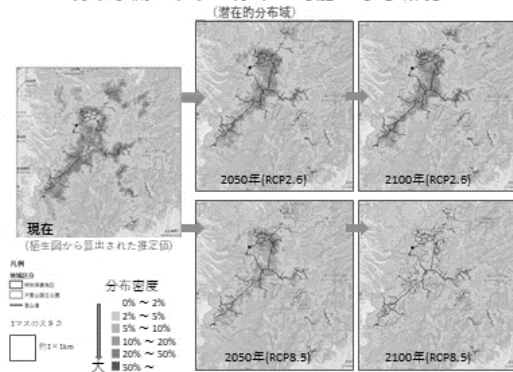
将来予測：高山低木群落の分布が可能となる環境 (潜在的分布域)



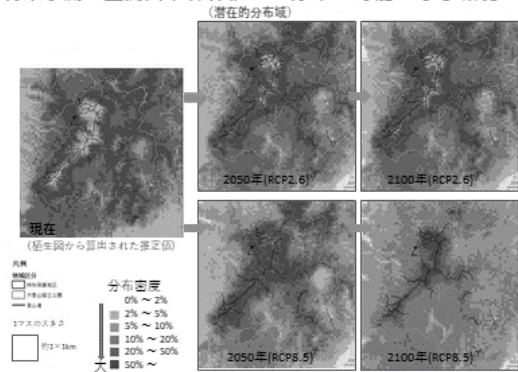
将来予測：高山ハイデ・風衝草原の分布が可能となる環境 (潜在的分布域)

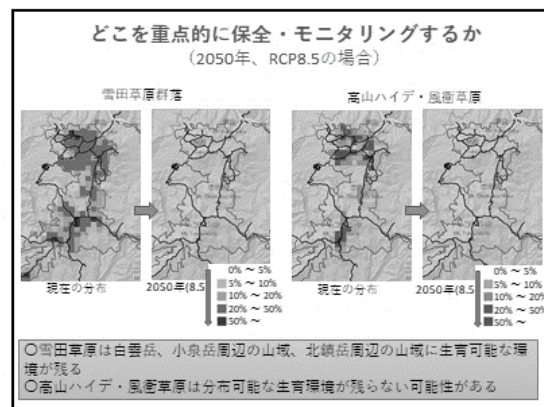
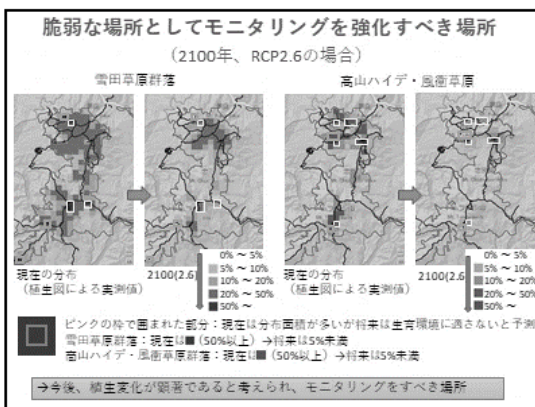
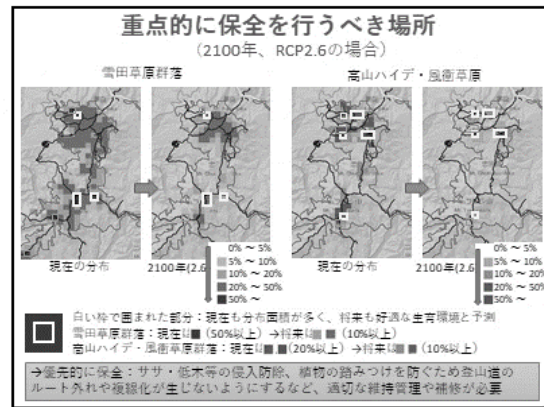
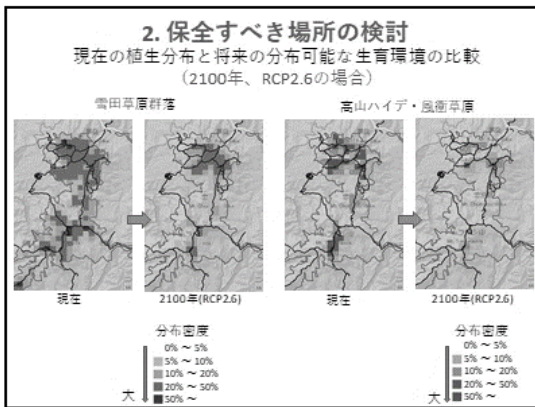
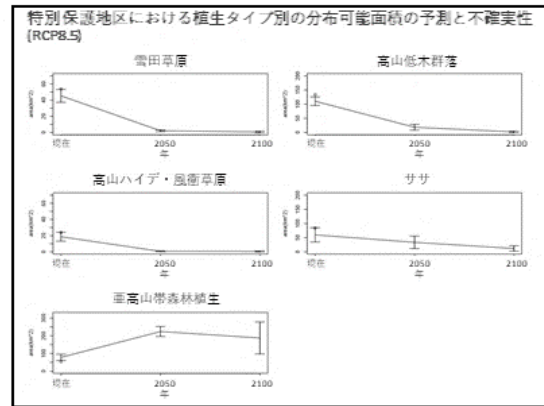
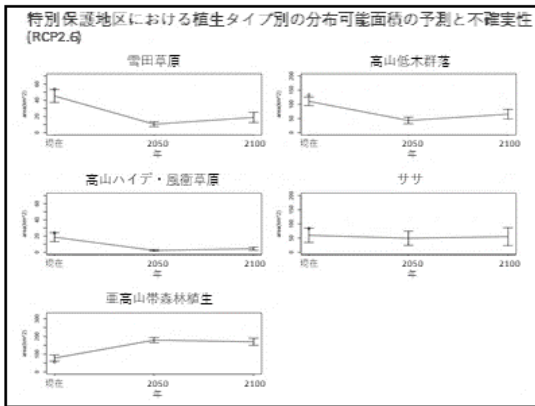


将来予測：ササの分布が可能となる環境 (潜在的分布域)

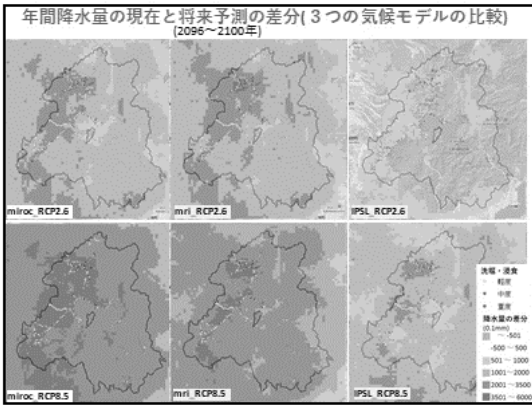
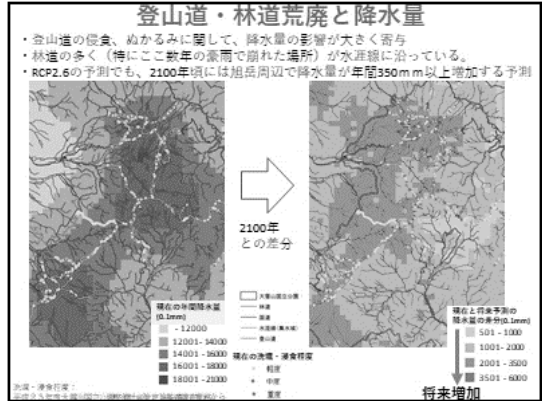


将来予測：亜高山帯森林植生の分布が可能となる環境 (潜在的分布域)





登山道・林道荒廃と降水量



全体のまとめ

高山植生の予測

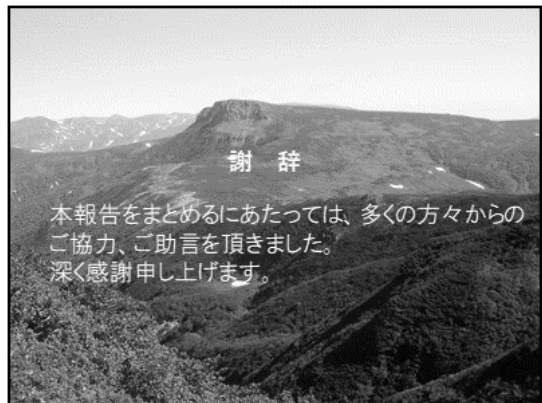
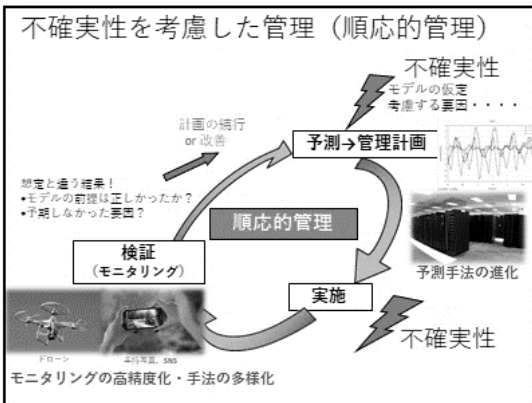
- 将来シナリオのRCP2.6と8.5について3つの気候モデル、6つの分布推定手法を用いた高山の将来的な植生分布を推定
- RCP8.5では2100年には雪田、風衝草原の生息地は消滅
- RCP2.6の2100年では、部分的に保全することにより雪田、風衝草原の生息地が残る可能性がある。

予測の不確実性

- 移動分散制限などにより、実際の植生変化は予測より遅い可能性あり
- 気候変動予測（特に雲の気候）のメッシュサイズの制約から、現状では過剰な見落とししている可能性がある。
- シナリオ・気候モデル自体の不確実性も大きい。
- 不確実性を考慮し、脆弱な環境として抽出された場所でのモニタリングを強化すべき
- モニタリング結果を踏まえた対策効果の評価・見直し、予測技術の信頼度を検証させる「順応的管理」が効果的

登山道

- 2シナリオ、3つの気候モデル全てにおいて、特に旭岳周辺の降水量が増加すると予測されている。現在洗掘・侵食程度が大きいところが将来的により崩れる可能性がある
- 気候予測に洪水、台風等の影響が入っていない（研究プロジェクトが進行中）



付録2. 大雪山国立公園登山道関係者による情報交換会にて用いたアンケート票および単
純集計「() 内の数字は回答の集計値」

※本報告書用にフォントサイズや体裁を一部修正済み

大雪山国立公園における気候変動の影響に関するアンケート

本調査は大雪山国立公園（以下、大雪山）における気候変動適応策の評価・検討に関する調査研究を
目的に実施しています。本調査における個別の回答内容が公表されることはありません。

担当: 国立環境研究所 久保雄広 (029-850-2897 / kubo.takahiro@nies.go.jp)

まずは今回の報告についてお聞きします。

**問1 あなたは大雪山における気候変動の影響について、本日参加される以前から関心がありまし
たか？当てはまる番号1つに○をつけて下さい。**

- | | |
|-----------------|-----------------|
| 1.全く関心がなかった（4人） | 2.関心がなかった（7人） |
| 3.関心があった（16人） | 4.とても関心があった（9人） |

**問2 今回の報告内容の中であなたが印象に残った内容は何ですか？当てはまる番号1つに○をつ
けて下さい。**

- | | | |
|---------------------|---------------------|-----------|
| 1.印象に残っているものはない（0人） | 2.気候変化(気温等)の予測（10人） | |
| 3.高山植生の予測（20人） | 4.登山道崩壊の予測（6人） | 5.その他（0人） |

**問3 今回報告した内容はあなたが今後の気候変動への対策を考える上で役に立つと思いましたか
？当てはまる番号1つに○をつけて下さい。**

- | | | |
|----------------|-----------------|-----------------|
| 1.全く役に立たない（0人） | 2.あまり役に立たない（2人） | 3.どちらとも言えない（5人） |
| 4.少しは役に立つ（16人） | 5.とても役に立つ（12人） | |

**問4 今回の報告内容について、あなたがより詳しく知りたいと感じたものは何ですか？当てはまる
番号1つに○をつけて下さい。**

- | | | |
|--------------------|---------------------|-----------|
| 1.詳しく知りたいものはない（0人） | 2.気候変化(気温等)の予測（11人） | |
| 3.高山植生の予測（16人） | 4.登山道崩壊の予測（8人） | 5.その他（0人） |

**問5 今回の報告内容は、あなたのお仕事や活動にどの程度関係すると思いますか？当てはまる番
号1つに○をつけて下さい。**

- | | | |
|---------------|-----------------|-----------------|
| 1.全く関係しない（0人） | 2.ほとんど関係しない（1人） | 3.どちらとも言えない（3人） |
| 4.少し関係する（13人） | 5.とても関係する（19人） | |

**問6 今回の報告全般に対し、あなたはどの程度満足しましたか？当てはまる番号1つに○をつけ
て下さい。また、よろしければその理由をお書き下さい。**

- | | | |
|------------------|---------------|---------------|
| 1.全く満足していない（0人） | 2.満足していない（3人） | |
| 3.どちらとも言えない（11人） | 4.満足した（17人） | 5.とても満足した（4人） |
| 理由) | | |

続いて、皆さまの大雪山との関わりについてお聞きします。

問7 あなたは年間どの程度、大雪山に行きますか？山開き期間中(6-10月)とそれ以外(オフシーズン)の時期について、当てはまる番号それぞれ1つに○をつけて下さい。

山開き期間中 (6-10月月初旬)	1.ほとんど行かない(5人) 2.山開き期間中に2,3回(10人) 3.月に2,3回(5人) 4.週に2,3回(11人) 5.ほぼ毎日(2人) 6.その他(具体的に) (2人)
それ以外 (オフシーズン)	1.ほとんど行かない(14人) 2.オフシーズン中に2,3回(8人) 3.月に2,3回(10人) 4.週に2,3回(1人) 5.ほぼ毎日(0人) 6.その他(具体的に) (1人)

問8 大雪山において、この数年(5年程度)で山岳地帯やふもとの自然環境や利用に関して変化を感じましたか？当てはまる番号それぞれ1つに○をつけて下さい。

自然環境	1.ない(14人) 2.ある(具体的に) (19人)
利用	1.ない(13人) 2.ある(具体的に) (21人)

問9 気候変動によって大雪山の魅力が失われる可能性があります。あなたは以下の魅力が失われることをどのように思いますか？当てはまる番号それぞれ1つに○をつけて下さい。

	とても 残念	残念	どちらとも 言えない	気にならない	全く 気にならない
高山植物の生息地が減る	1.(23人)	2.(8人)	3.(4人)	4.(0人)	5.(0人)
登山可能なルートが減る	1.(14人)	2.(13人)	3.(5人)	4.(2人)	5.(1人)

大雪山における気候変動への対策について皆さんのご意見をお聞きします。

次のページでは大雪山での気候変動への対策について、以下に示す6つの選択肢に対する皆さんのご意見をお伺いします。

現在の植生の維持	現在、高山植物等が生息している地域において、ササ刈り等の管理を継続的に行うことで植生を維持する
保護区域の見直し	将来に渡って高山植物が生息し続ける、もしくは新たに生息することが見込まれる場所を保護区域に設定する
高山植物の域外保全	将来、大雪山において生息が困難になると予測される高山植物を種子の保存や植物園での栽培等により生息域外で保全する
登山道の維持管理	台風や融雪等によって生じる登山道の侵食や崩壊を修復・整備し、登山の機会を確保する
観光利用ルールの変更	自然環境(紅葉等)の変化に伴い、観光利用の集中時期や場所の変化が予想されるため、マイカー規制等のルール変更を行う
新たな観光資源の発掘	高山植物や紅葉等、現在の観光資源が失われることに備え、新たな観光資源を発掘する

問10 前のページで示した大雪山における気候変動への対策として、あなたが優先的に取り組んだ方がいいと思うものは何ですか？

以下では、右の例が示すように、任意の対策の組み合わせを6回(1回目から6回目まで)お見せします。6回の設問それぞれについて、あなたが最も優先度が高いと思う対策に○を、最も優先度が低いと思う対策に×をつけて下さい。残り3つの選択肢については空欄のままにして下さい。

〇と×を1つずつ記入

例		登山道の維持管理
	○	観光利用ルールの変更
	×	現在の植生の維持
		保護区域の見直し
		高山植物の域外保全

※以下では、各対策の優先度合いを比較するために同じような設問を繰り返しています。ご面倒ですが6回すべてにお答え下さい。

〇と×を1つずつ記入

1回目		新たな観光資源の発掘
		現在の植生の維持
		登山道の維持管理
		観光利用ルールの変更
		保護区域の見直し

〇と×を1つずつ記入

2回目		観光利用ルールの変更
		高山植物の域外保全
		新たな観光資源の発掘
		登山道の維持管理
		現在の植生の維持

〇と×を1つずつ記入

3回目		登山道の維持管理
		観光利用ルールの変更
		新たな観光資源の発掘
		保護区域の見直し
		高山植物の域外保全

〇と×を1つずつ記入

4回目		新たな観光資源の発掘
		現在の植生の維持
		高山植物の域外保全
		登山道の維持管理
		保護区域の見直し

〇と×を1つずつ記入

5回目		保護区域の見直し
		登山道の維持管理
		高山植物の域外保全
		観光利用ルールの変更
		現在の植生の維持

〇と×を1つずつ記入

6回目		観光利用ルールの変更
		現在の植生の維持
		高山植物の域外保全
		新たな観光資源の発掘
		保護区域の見直し

**問11 大雪山における気候変動への対策は誰が中心となって実施するのが望ましいと思いますか？
当てはまる番号1つ○をつけて下さい。**

1.NPO (3人)	2.民間企業 (0人)	3.市町村 (0人)	4.北海道 (4人)
5.環境省 (24人)	6.林野庁 (1人)	7.その他 () (2人)	

問12 あなたにとって、大雪山はどのようなところですか？ 当てはまる番号にそれぞれ1つ○をつけて下さい。

	全くそう 思わない	←	どちらとも 言えない	→	とても そう思う
大雪山は私にとって特別なところだ	1. (2人)	2. (4人)	3. (7人)	4. (10人)	5. (13人)
大雪山は私にとって大切なところだ	1. (2人)	2. (3人)	3. (6人)	4. (9人)	5. (16人)
私は大雪山に愛着を感じている	1. (3人)	2. (3人)	3. (3人)	4. (10人)	5. (17人)
私は大雪山に親近感を覚えている	1. (2人)	2. (2人)	3. (5人)	4. (12人)	5. (15人)
大雪山には私の沢山の大切な思い出がある	1. (4人)	2. (2人)	3. (9人)	4. (8人)	5. (13人)
大雪山は私を形作っていると思う	1. (5人)	2. (7人)	3. (14人)	4. (5人)	5. (5人)

最後に、皆さま自身についてお聞きます。

問13 あなたの性別について、当てはまる番号 1 つに○をつけて下さい。

1. 男性 (30人)	2. 女性 (6人)
-------------	------------

問14 あなたの年齢について、当てはまる番号 1 つに○をつけて下さい。

1. 10代 (0人)	2. 20代 (4人)	3. 30代 (4人)	4. 40代 (7人)	5. 50代 (11人)
6. 60代 (8人)	7. 70代 (2人)	8. 80代 (0人)	9. 90代以上 (0人)	

問15 あなたのご職業について、当てはまる番号全てに○をつけて下さい。

1. 会社員 (0人)	2. ガイド (7人)	3. 観光業 (1人)	4. 農林業 (1人)
5. 自営業 (4人)	6. NPO/NGO (5人)	7. 学生 (0人)	8. 研究者 (2人)
9. 主婦・主夫 (0人)	10. 年金生活 (2人)	11. 地方公務員 (7人)	
12. 国家公務員 (11人)	13. その他 () (1人)		

問16 あなたのお生まれはどこですか？ 当てはまる番号 1 つに○をつけて下さい。

1. 北海道() 市・町・村 (24人)	2. 北海道以外() 都・道・府・県 (12人)
-----------------------	---------------------------

**これで本アンケートは終了です。長い間ご協力ありがとうございました。
もし大雪山や気候変動に関し、ご意見等がありましたら以下にご自由にお書き下さい。**

付録 2－ 表 1 個人属性 (n=36)

項目	人数	%	項目	人数*
性別			職業	
男性	30	83.3	ガイド	7
女性	6	16.7	観光業	1
年齢			農林業	1
20 代	4	11.1	自営業	4
30 代	4	11.1	NPO/NGO	5
40 代	7	19.4	研究者	2
50 代	11	30.6	年金生活	2
60 代	8	22.2	地方公務員	7
70 代	2	5.6	国家公務員	11
			その他	1

*職業の人数は複数回答あり