

平成 30 年度環境省請負業務

平成30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 31 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. 慶良間諸島国立公園における追加評価・予測及び成果還元	· · ·	p. 3
3.1 基盤情報の追加収集と整備	· · · · ·	p. 5
3.2 気候変動影響の分析・精度検証	· · · · ·	p.25
3.3 適応策の提案	· · · · ·	p.40
3.4 現地関係者との情報交換会	· · · · ·	p.43
3.5 まとめと今後の課題	· · · · ·	p.44
4. 大雪山国立公園における適応策実装に向けた予測結果の精緻化	· · · · ·	
4.1 概要	· · · · ·	p.46
4.2 大雪山国立公園への訪問目的および高山植物の選好に関するアンケート調査	· · · · ·	p.47
4.3 高山植生の将来分布推定	· · · · ·	p.52
4.4 対策実施場所の優先順位付け	· · · · ·	p.72
4.5 まとめと今後の課題	· · · · ·	p.85
5. 謝辞	· · · · ·	p.87
6. 引用文献	· · · · ·	p.88
付録 1. 慶良間諸島国立公園のサンゴ保全関係者による情報交換会にて用いた説明素材	· · · · ·	p.92
付録 2. 慶良間諸島国立公園の現地説明会の際に実施したアンケートの内容とその回答結果	· · · · ·	p.98
付録 3. 大雪山国立公園の自然環境の保全に関するアンケート調査の内容と集計結果	· · · · ·	p.107
付録 4. 国立公園等の保護区における気候変動への適応策検討に係わる手引き	· · · · ·	p.110

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健全な生態系を保全・再生する対策）を、地域の保護区等（国立公園等）の管理や種の保存、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・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 3 年目となるが、今年度は沿岸生態系の追加評価等を行うとともに、平成 28 年度から本業務のモデル保護区としている大雪山国立公園の将来予測結果に GIS データを重ね、保全活動のためアクセスが可能な場所の現地確認を行い、高山植生の保全を優先すべき場所をより詳細に予測する。また、平成 28 年度から平成 29 年度にかけて実施した高山帯・亜高山帯における調査結果を踏まえ、適応策を含む将来的な保全管理検討に活用できる手引きを作成するものとする。

2. 本業務の実施内容

平成 28年度および平成29年度で得られた本業務の結果を活用し、以下の調査を実施した。

(1) 慶良間諸島国立公園における追加評価・予測及び成果還元

平成 29 年度に本業務のモデル保護区として追加した慶良間諸島国立公園において、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った。このため、以下のことを行った。

- 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、2018 年 10 月 8 日から 13 日にかけて 1 名により、慶良間諸島海域での現地調査を行った。
- 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（生息種の分布予測を含む）を行った。
- ③ 平成 29 年度の本業務並びに①、②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、気候変動が慶良間諸島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するために、座間味村阿嘉島（2019 年 2 月 8 日）に 1 名で出張を行った。
- ④ 上記③を踏まえつつ、気候変動が慶良間諸島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) 大雪山国立公園における適応策実装に向けた予測結果の精緻化

平成 28 年度から本業務のモデル保護区としている大雪山国立公園について、昨年度実施した将来予測結果について、登山道等の GIS データを活用し、保全活動のためアクセスが可能な場所の抽出と現地確認を行い、高山植生の保全のための対策が実施可能かつ優先的に行うべき場所をより詳細に予測した。そのために 2018 年 7 月 19 日から 23 日にかけて 1 名により大雪山旭岳付近での現地調査を行った。

(3) 適応策に係る手引きの作成

平成 28 年度から実施している本業務の結果を踏まえ、自然環境（生物多様性、とりわけ保護区等）分野において、適応策を含む将来的な保全管理検討に活用できる手引きを作成した。

3. 慶良間諸島国立公園における追加評価・予測及び成果還元

慶良間諸島は、沖縄県那覇市の西方約 40 km の地点に位置する、大小 30 余りの島々と数多くの岩礁からなる島嶼群で（図 3-1）、平成 26 年 3 月 5 日に 31 番目の国立公園として指定された。透明度の高い海域景観や多様なサンゴが高密度に生息するサンゴ礁などが特徴的であり（図 3-2）、公園区域の大半が海域となっている（図 3-1）。

琉球列島では 1998 年以降、とくに高水温となった夏期にサンゴの共生藻類が減少する現象（白化）が目立つようになり、2016 年には石西礁湖で大規模な白化現象が発生したが、慶良間諸島では被害が軽微であったことが報告されている（<http://kyushu.env.go.jp/naha/161109sango.pdf>）。このため慶良間諸島のサンゴ群集は気候変動影響の避難地として機能する候補地であることが期待されている。慶良間諸島が避難地として機能すれば、慶良間諸島からのサンゴの幼生供給を介した他の海域との繋がり（コネクティビティ）により、一時的に衰退していたサンゴ群集の回復に貢献しうるだろう。

一方、気候変動影響の別の避難地の候補として、水温変動の安定している水深 30 m よりも深い場所に生息するサンゴが注目されており、中深度サンゴ群集（MCEs : mesophotic coral ecosystems）と呼ばれている（Hinderstein et al., 2010）。浅場と中深度に共通してサンゴが生息するならば、浅場に生息するサンゴが高水温の年に深刻な白化を受けたとしても、中深度から浅場へと再進出することによって群集の回復が望めるだろう。現在、海域公園地区は水深 30 m 以浅の区域に限定されているが（図 3-1）、より深場へと海中公園地区を拡大すれば、中深度サンゴ群集の生息域をも含めることができる。

平成 29 年度に実施した業務のうち、現地関係者を対象としたヒアリングの結果からは「気候変動による影響が懸念される生物（生態系）はサンゴ（サンゴ礁）」であり、「将来予測や適応策の検討の際に求められる空間スケールは 100 m 程度」であるとされた。現状の世界最高精度のサンゴ白化推定モデルは 1 km であるが（Kumagai et al., 2018）、本業務ではさらに 100 m の高空間解像度における解析・将来予測を試みた。高解像度のサンゴ白化推定モデルを構築するためには、サンゴの白化に関連する海水温や流速などの海洋環境を高解像度で再現する必要があり、その再現精度を向上させるためには、現地における多数・長期間の観測データを得る必要がある。

以上のような慶良間諸島のサンゴ礁の将来的な予測をもって気候変動適応策を検討する上で必要となる調査・解析として、基盤情報の追加収集・整備、海水温・流速等の現地観測、中深度サンゴ群集の調査、サンゴの幼生分散シミュレーション、高解像度の物理環境モデルの構築、サンゴの白化モデルの構築及び将来の白化予測を行った。さらに、これらの情報を重ね合わせることで気候変動適応策を検討した。

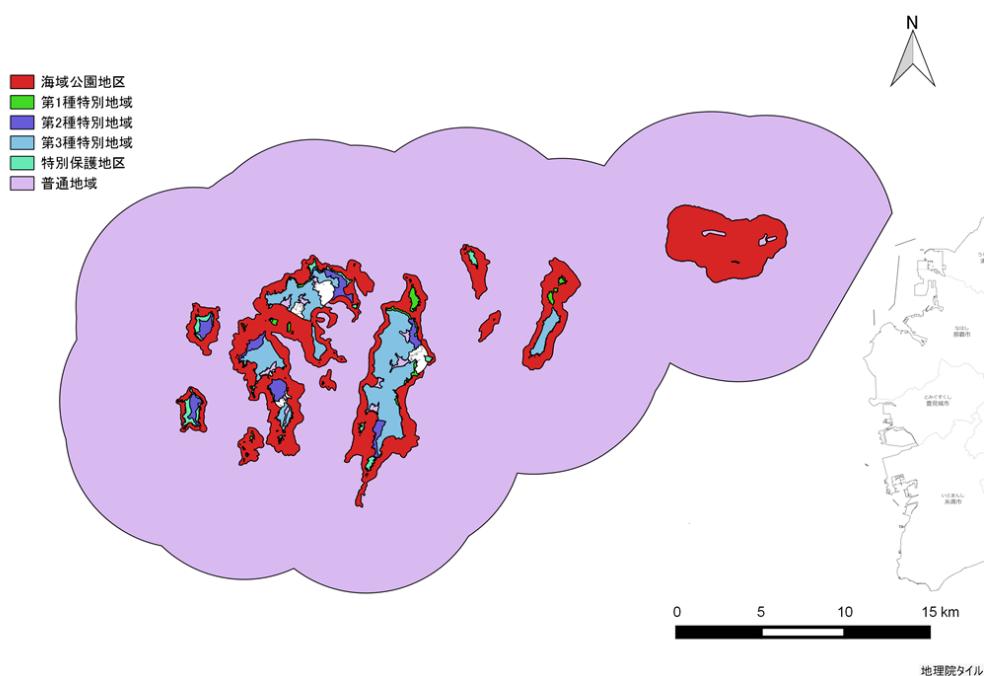


図 3-1. 慶良間諸島国立公園

地域区分の GIS データは環境省自然環境局の生物多様性センター
 (http://gis.biodic.go.jp/webgis/sc-026.html?kind=nps) から引用。



図 3-2. 慶良間諸島国立公園における陸上景観および水中景観の一例

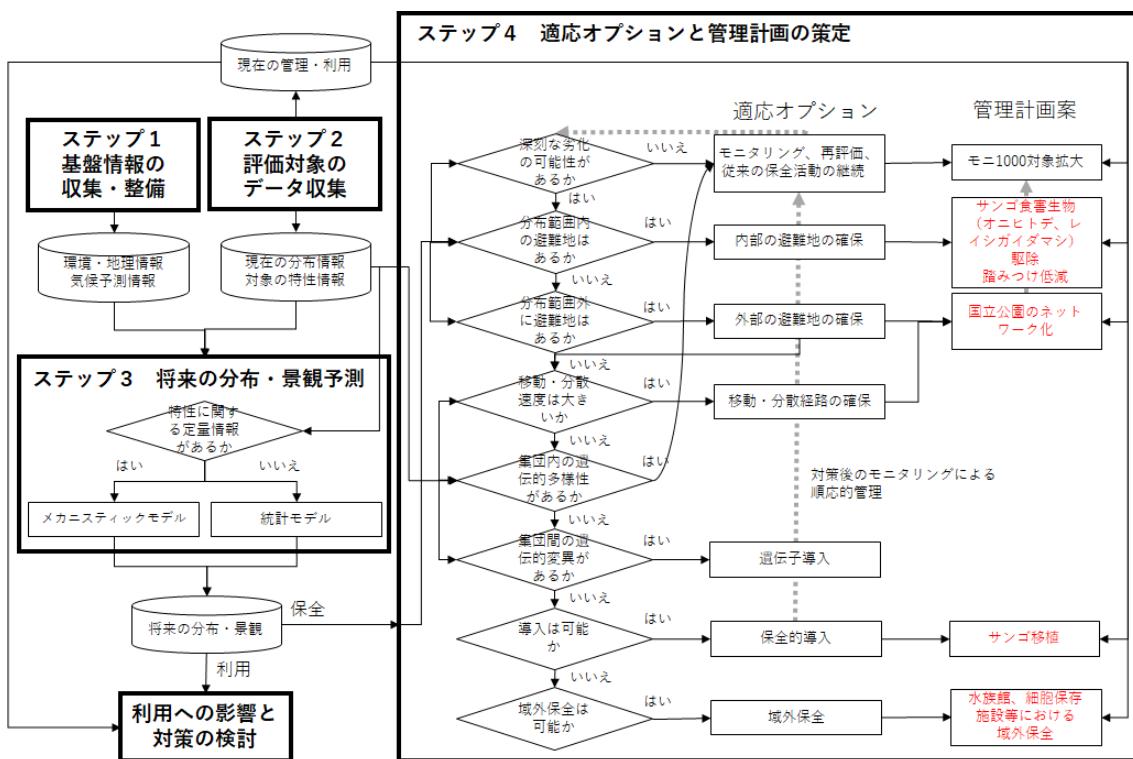


図 3-3. 慶良間諸島国立公園におけるサンゴの保全を目的とした評価の枠組みに関するフローチャート

3.1 基盤情報の追加収集と整備

3.1.1 慶良間諸島国立公園内外の環境の比較

(1) 土地利用

慶良間諸島内の土地利用形態をみると、各島の大部分を森林が占めており（図 3.1.1-1）、沖縄県内の他の地域と比べて農地や住宅地の占める割合が比較的小い傾向にあることが分かる。農地や市街地から流入する過剰な赤土や栄養塩類はサンゴの成育に悪影響を及ぼすが（Hongo & Yamano, 2003；大見謝, 2003；金城, 2017）、土地利用および赤土分布の特性から慶良間諸島では港湾施設周辺を除いて陸域負荷の影響は比較的小いものと考えられる。

(2) 水深

慶良間諸島から沖縄本島南部にかけては水深 200 m 程度の比較的浅い海域が広がっている一方で、北側には急激に水深が深くなる地形がみられる（図 3.1.1-2）。慶良間諸島の内海は、沈降海岸地形を示し多島海景観を有している。各島の間には水深 30 m を超えるような場所も広がっている。また、慶良間諸島内ではチービシ（ナガンヌ島、神山島、クエフ島）を除いてそれほど発達した礁池はみられず、海水交換は比較的大きいものと考えられる。

(3) 水温

2009年から2018年にかけての8月の海面水温の平均値をみると、宮古列島や八重山列島と比べて慶良間諸島周辺の水温が低い傾向にあることが分かる（図3.1.1-3）。琉球列島内で慶良間諸島やチービシ付近の海域では相対的に水温が低いことが知られており、その主な要因として陸棚縁辺部において外洋からの暖水塊の沿岸への波及がブロックされること（陸棚効果）が指摘されている（灘岡ら, 2001）。

(4) 流況

JCOPE-T-NEDO (Varlamov et al., 2015) の再解析データによる琉球列島周辺の流動場を図3.1.1-4に示す。慶良間諸島周辺では一方向に流れる卓越した流れはみられない。西岸境界流である黒潮は、琉球諸島西岸沖約200kmの陸棚斜面に沿って北東向きに流れしており、“直接的”には慶良間諸島周辺の流況には影響しないものの、後述するように間接的な影響が報告されている。黒潮流路と琉球諸島間の海域では黒潮反流や中規模渦がしばしば生じ、それに伴う移流効果によって黒潮暖流波及を強く受けることがある（灘岡ら, 2006）。黒潮の東側においては、黒潮と琉球海嶺の地形と島嶼群による地形性シアの影響による高気圧性のサブメソスケール渦が発生し、これらが黒潮由来の暖水の黒潮横断方向への輸送を促進している（上平ら, 2015）。

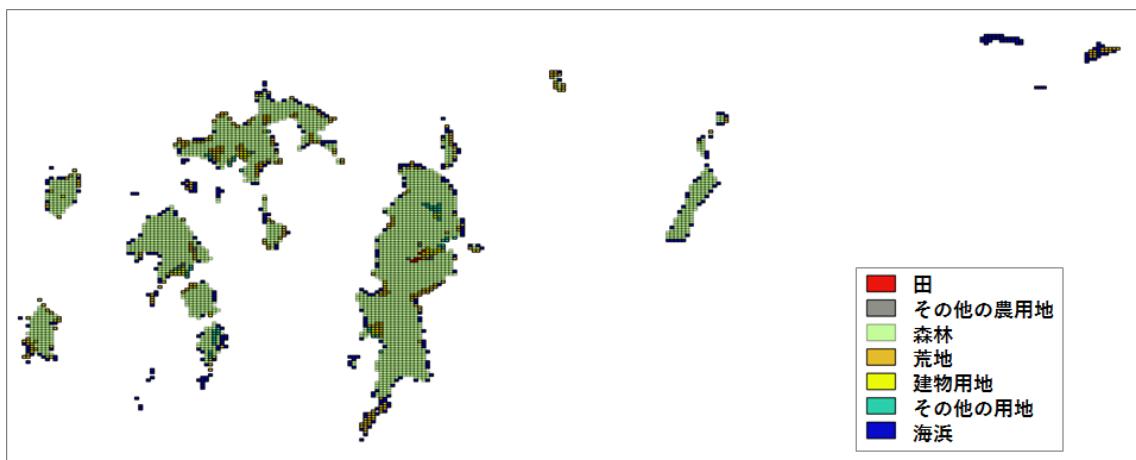


図 3.1.1-1. 慶良間諸島の土地利用図

国土交通省の国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ
 (http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html) をもとに作成。

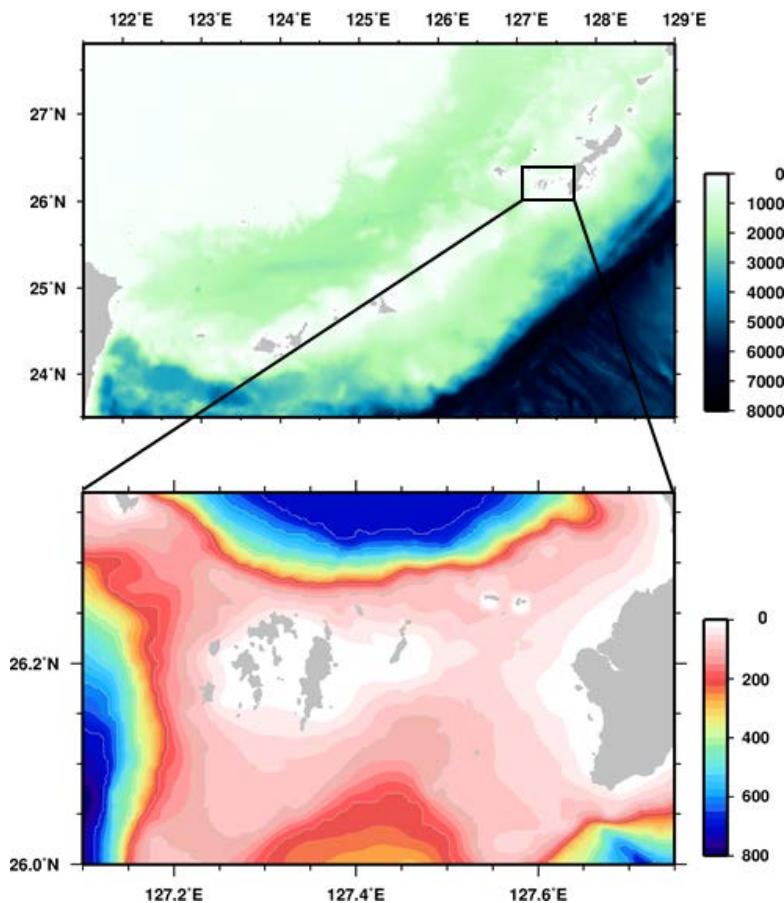


図 3.1.1-2. 琉球列島（上）および慶良間諸島（下）周辺の海底地形（水深 m）
 日本水路協会の海底地形デジタルデータ
 (https://www.jha.or.jp/jp/shop/products/btdd/index.html) をもとに作成。

2009-2018 August Surface Water Temperature (°C)

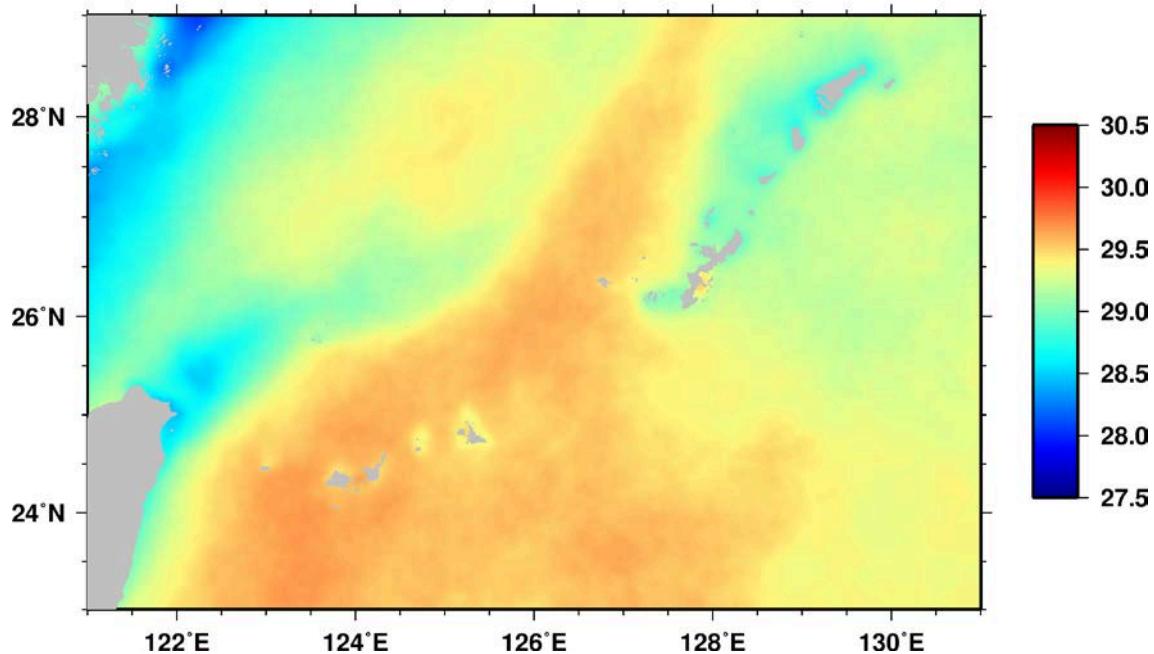


図 3.1.1-3. MUR SST (<https://mur.jpl.nasa.gov/>) による琉球列島周辺における 2009 年から 2018 年にかけての 8 月の海面水温の平均値

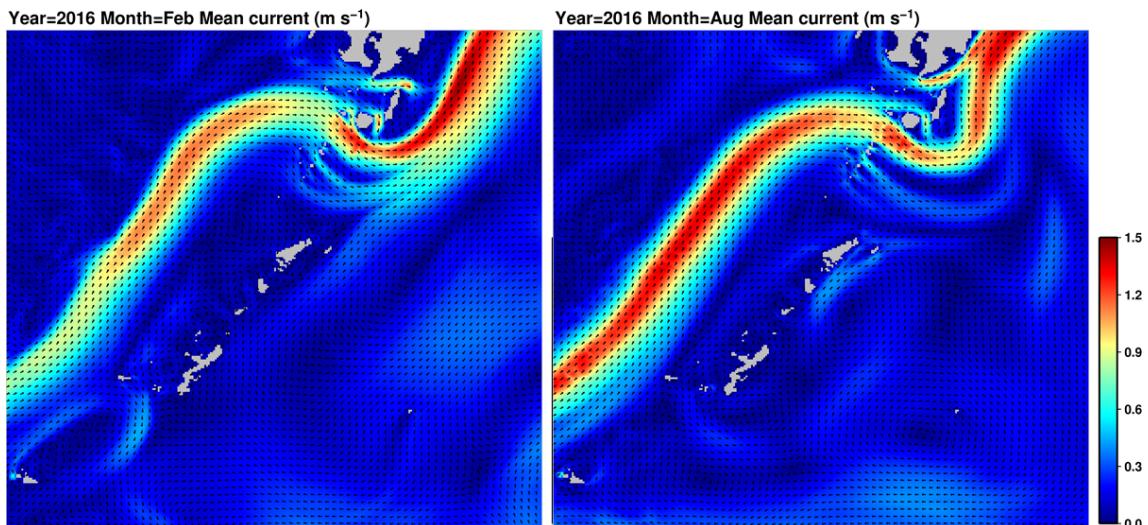
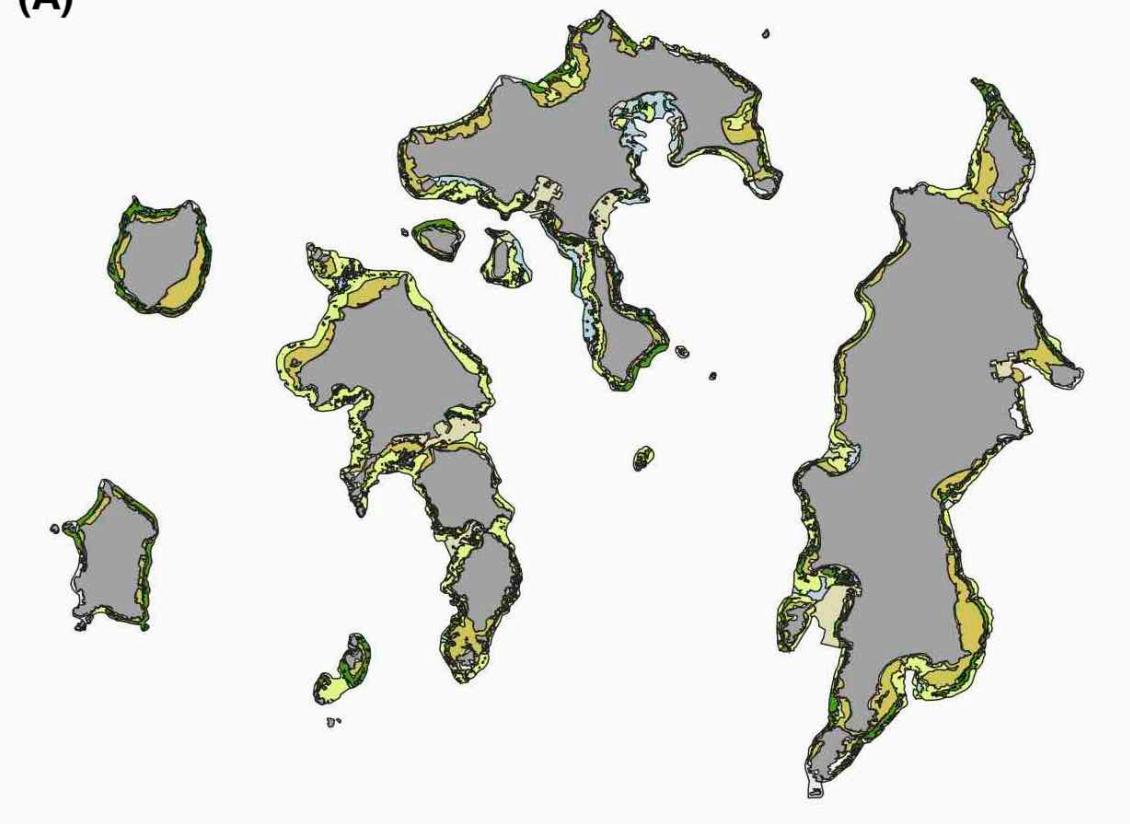


図 3.1.1-4. JCOPE-T-NEDO により計算された琉球列島周辺海域の流動場 2016 年 2 月 (左) と 8 月 (右) の月平均の流況を示している。

3.1.2 慶良間諸島内でのサンゴの分布、ダイビング利用ポイントなど利用、および捕食者駆除など管理の情報

現在の慶良間諸島海域におけるサンゴの分布と保全努力状況を把握するため、リモートセンシング観測による海底底質の区分（図 3.1.2-1）、サンゴ保全努力の目安としてサンゴ捕食者であるオニヒトデの駆除実施地点（図 3.1.2-2）、レイシガイ類の駆除実施地点（図 3.1.2-3）、ダイビング船係留用ブイの位置（図 3.1.2-4）の位置情報を収集した。ダイビングブイは各島の周辺のサンゴ被度の高い場所に分布しており、また保全努力量はいずれも座間味島と阿嘉島の周囲の高サンゴ被度の場所を中心に配分されていた。ダイビングポイントと保全努力は、座間味、阿嘉、渡嘉敷に囲まれて海況の安定した内海の中でサンゴの被度が高い場所に多く分布していた。なお、本海域でのダイビング利用に関しては、慶良間諸島内からアクセスするものと、沖縄本島からアクセスするものがあり、沖縄本島から利用する業者については図 3.1.2-4 に示した係留用ブイを基本的には使用しない。

(A)



(B)

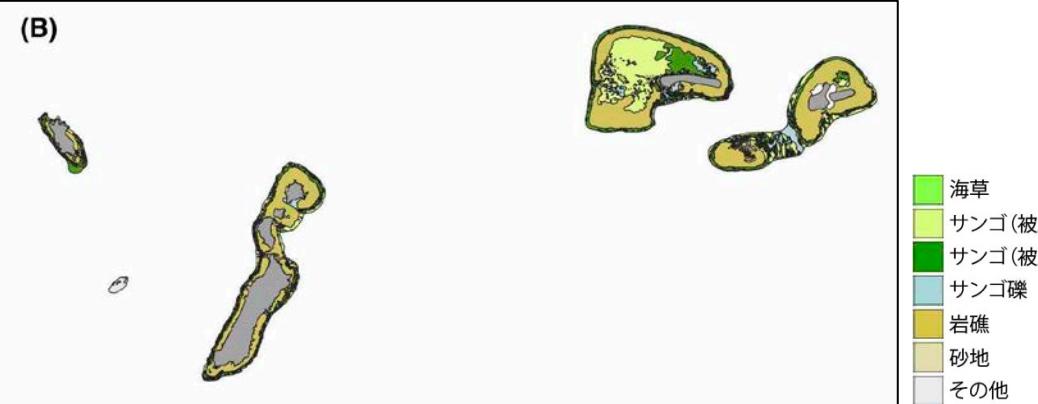


図 3.1.2-1. リモートセンシング観測による慶良間諸島の海底面の 2014 年の底質分類
(A) 慶良間諸島中心部、(B) 慶良間諸島東部。環境省作成。

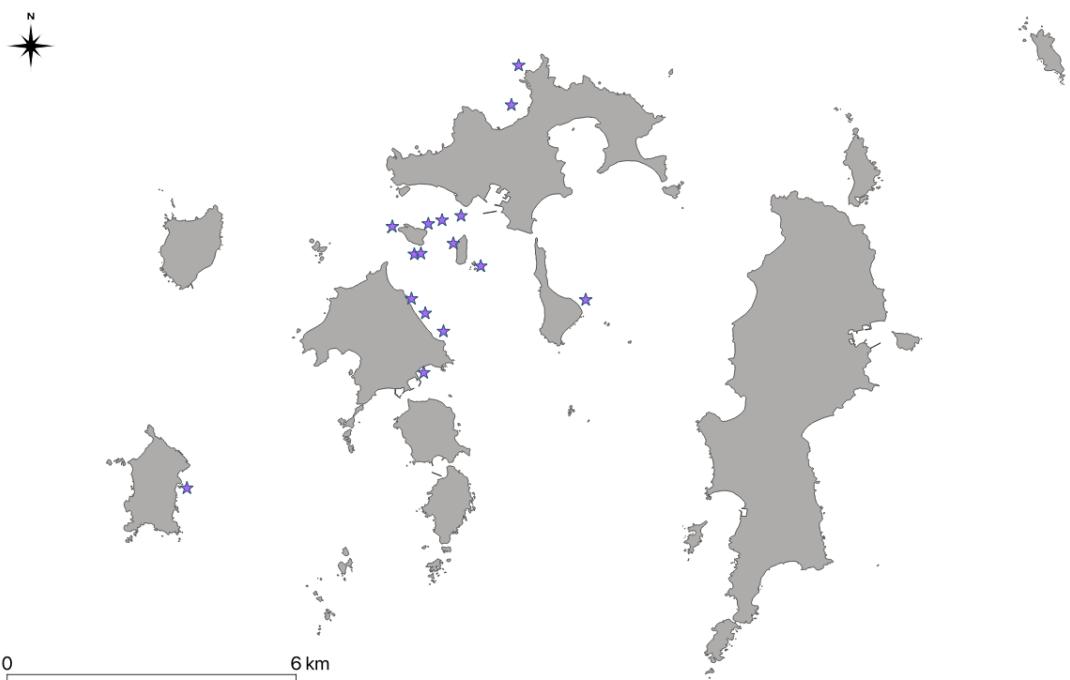


図 3.1.2-2. 慶良間諸島中心部におけるオニヒトデ駆除実施地点（2010～2016 年）

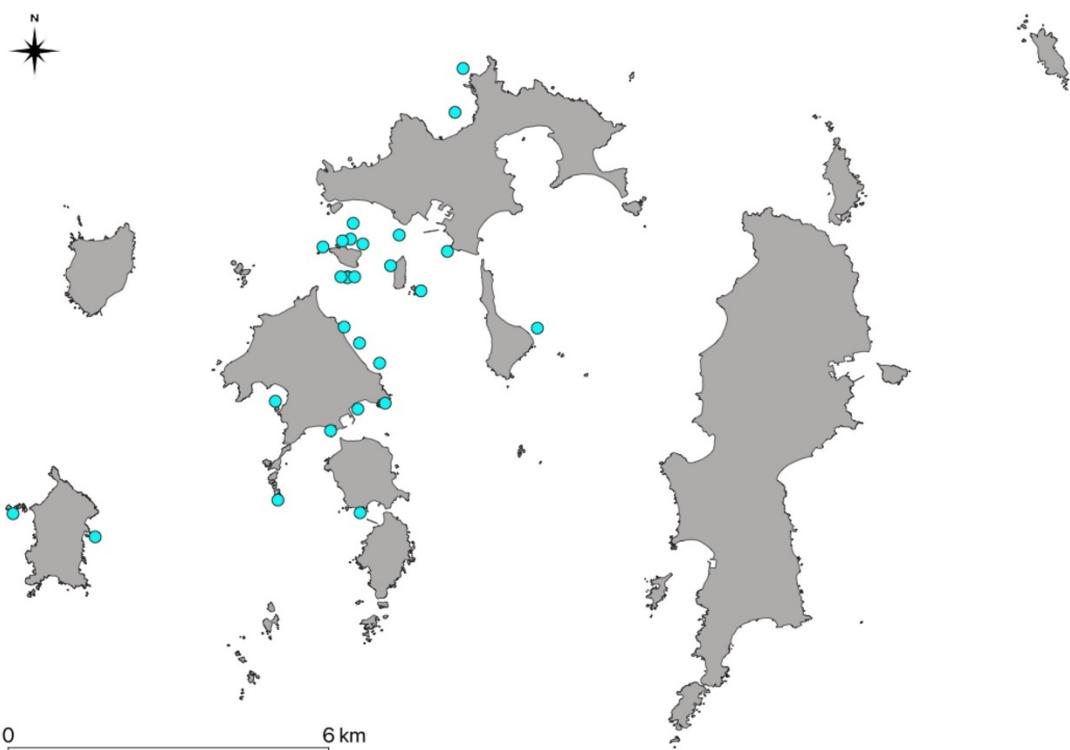


図 3.1.2-3. 慶良間諸島中心部におけるレイシガイ類の駆除実施地点（2010～2016 年）



図 3.1.2-4. 慶良間諸島中心部における主なダイビング船係留用ブイの位置

3.1.3 現地連続観測による物理環境データの取得

サンゴの成育や白化現象に関しては物理・生物・化学的な様々な要因が影響を及ぼす (Kleypas et al., 1999 ; 中村, 2012)。衛星観測や数値モデルを用いた物理環境の再解析シミュレーションの水平解像度は 1 km 以上であることがほとんどであるとともに、時間解像度も粗いことや利用できるパラメータが限られていることもあり、サンゴが分布する浅海域の環境の変動を詳細に捉えることは困難である。そこで、現地に計測機器を設置し、対象地点の水温等のデータを子細に取得することが重要である。なお、ここで得られたデータ（水温、水位変動、流向流速）は後述する物理環境モデルの再現性の検証用としても用いるものである。

(1) 測器の設置場所・設置方法

水温計 (HOBO ウォーターテンププロ v2, Onset 社製)、水位計 (HOBO U20 ウォーター レベルロガー, Onset 社製)、流向流速計 (INFINITY-EM, Onset 社製)、波高計 (INFINITY-WH, Onset 社製) を慶良間諸島内に設置した (図 3.1.3-1、3.1.3-2)。設置層は、水温計は基本的に表層および底層、その他の測器は底層とした。なお、水位計に関しては大気圧補正のため座間味島内の陸上にも設置した。水温および水位は 10 分間隔、流向流速および波高は 1 時間間隔でデータを取得した。データの取得期間は、水温が 2018 年 2 月から 10 月、水位

は 2018 年 2 月から 7 月、流向流速と波高は 2018 年 10 月から 11 月である。

(2) 物理環境の観測結果・考察

1) 水温

慶良間諸島国立公園内に設置した水温計の計測結果の一例を図 3.1.3-3 に示す。2 月から 10 月までの水温には明確な季節変動がみられ、8 月に最高水温を記録した。水深の深いアリガ (水深 15 m 程度) では嘉比南 (水深 5 m 程度) よりも夏場の表層と底層の水温差が大きかった。10 月に入ってからは水温の急激な低下が複数回観測された。水温の低下要因としては、気温や日射量の低下、冷水塊の進入、暖水塊の移動、鉛直混合、底層水の進入などが挙げられる。上記の一部の現象をもたらすものとして、台風の影響が非常に大きいことが知られている (仲座ら, 1999; 馬場ら, 2014; Bernardo et al., 2017)。後述のように、2018 年 10 月には慶良間諸島周辺に台風が襲来し、その影響により水温の急激な低下がもたらされたと考えられる。

2018 年 8 月の月平均水温を地点間で比較すると (図 3.1.3-4)、ナガンヌ島の北側の礁池内の底層 (水深 1 m 程度) で最も高い結果が得られた。チービシエリア以外の地点では表層の水温の差は小さかったものの、底層では水深の深い地点 (マエハマ、アリガ) では他の地点よりも低くなる傾向がみられた。

また、10 分間隔で測定された水温の変動特性を明らかにするために、時系列データのスペクトル解析を行った。日周期および半日周期に大きなピークがみられ、それぞれ日射、潮汐の影響を強く受けていることが示唆された。

2) 水位変動

大気圧補正を行った水位の変動傾向からは潮汐に応じた水位変動がみられ、測定を行った 2 地点間では振幅、位相は同程度であった (図 3.1.3-5)。また、25 時間移動平均した水位の変動からは、計測期間中に継続した顕著な水位上昇・下降はみられなかった。

3) 流速

阿嘉島周辺の 2 地点の底層に設置した流速ベクトルの経時変化をみると、アグでは沖側、マジャノハマでは岸側に向かう流れが卓脱していた。ウィルコクソンの符号順位検定による 2 地点間の絶対流速の比較からは、マジャノハマよりもアグで絶対流速が大きかった ($p < 0.01$)。また、東方流速、北方流速それぞれでスペクトル解析を行ったところ、アグでは東方・北方流速とともに半日周期の成分が卓越していたものの、マジャノハマでは明瞭なピークがみられず潮汐の影響が小さいものと考えられる。

4) 2016 年から 2018 年にかけての海象および気象

8 月の月平均海面水温は 2016 年と 2017 年は 30°C を超える海域が多く、特に慶良間諸島

の北側で高い水温となる傾向にあった。2018年は直近の2年と比べて水温が大幅に低かった（図3.1.3-7）。

那覇気象台における日平均気温をみると、6月中旬から10月下旬にかけては2016年および2017年と比べて2018年は数°C低く推移していることが多かった（図3.1.3-8）。また、全天日射量は日変動が非常に大きいものの、年による顕著な違いはみられなかった（図3.1.3-8）。沖縄地方への台風の接近数（台風の中心が沖縄県のいずれかの気象官署等から300km以内に入った場合）は2016年、2017年、2018年はそれぞれ7個、7個、13個であった（<https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/statistics/acccession/okinawa.html>）。台風の経路をみると、2018年には慶良間諸島周辺を通過した台風が2016年・2017年と比べて非常に多かったことが分かる（図3.1.3-9）。

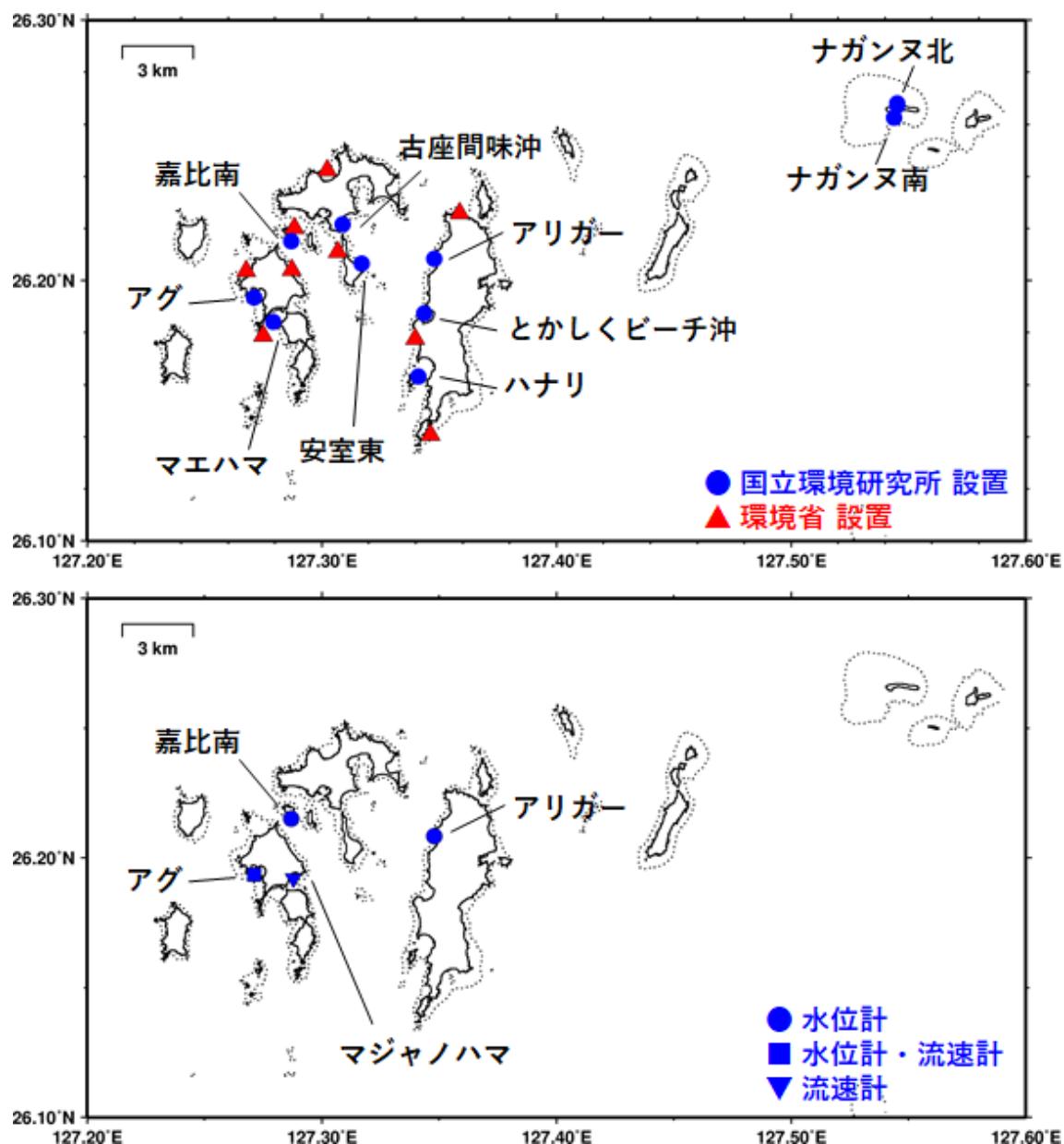


図 3.1.3-1. 測器を設置した地点

図中の点線は水深 10 m の等深線を示す。参考情報として環境省が水温計を設置している地点についても記載した。



図 3.1.3-2. 水温・水位・流向流速等を計測する測器の設置状況の一例

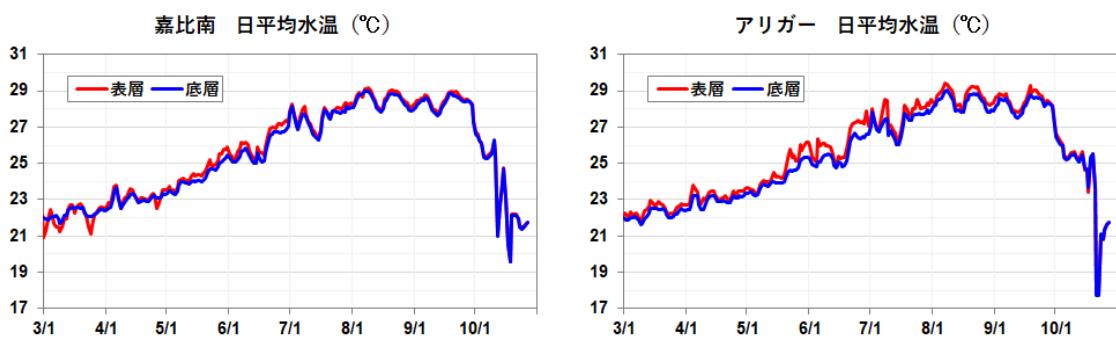


図 3.1.3-3. 水温の計測結果の一例（嘉比南、アリガー）

2018年2月から10月にかけての日平均値を示している。

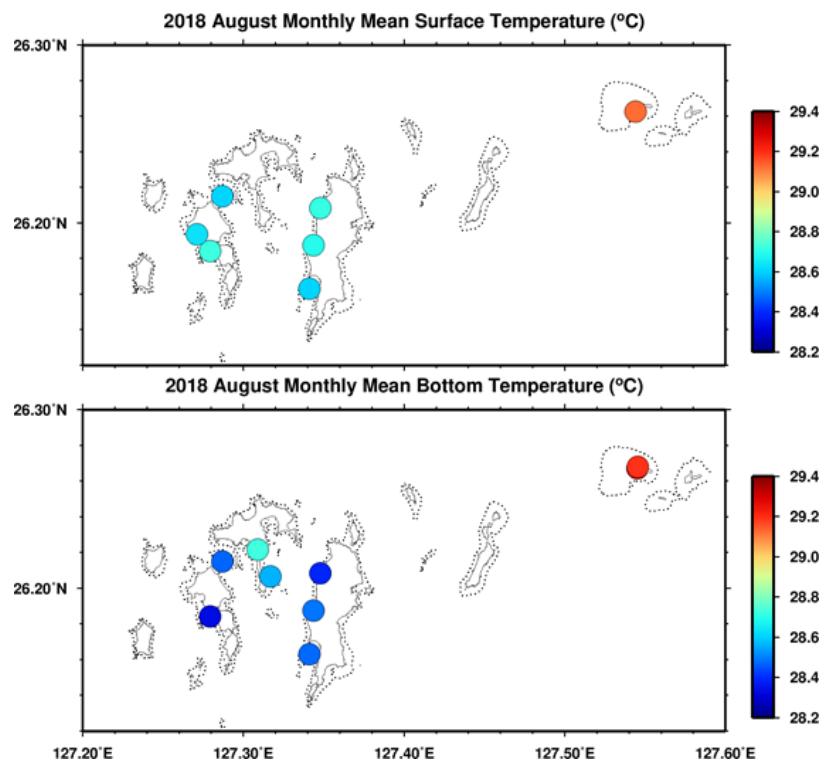


図 3.1.3-4. 連続観測により得られた2018年8月の月平均水温の水平分布

図中の点線は水深10mの等深線を示す。

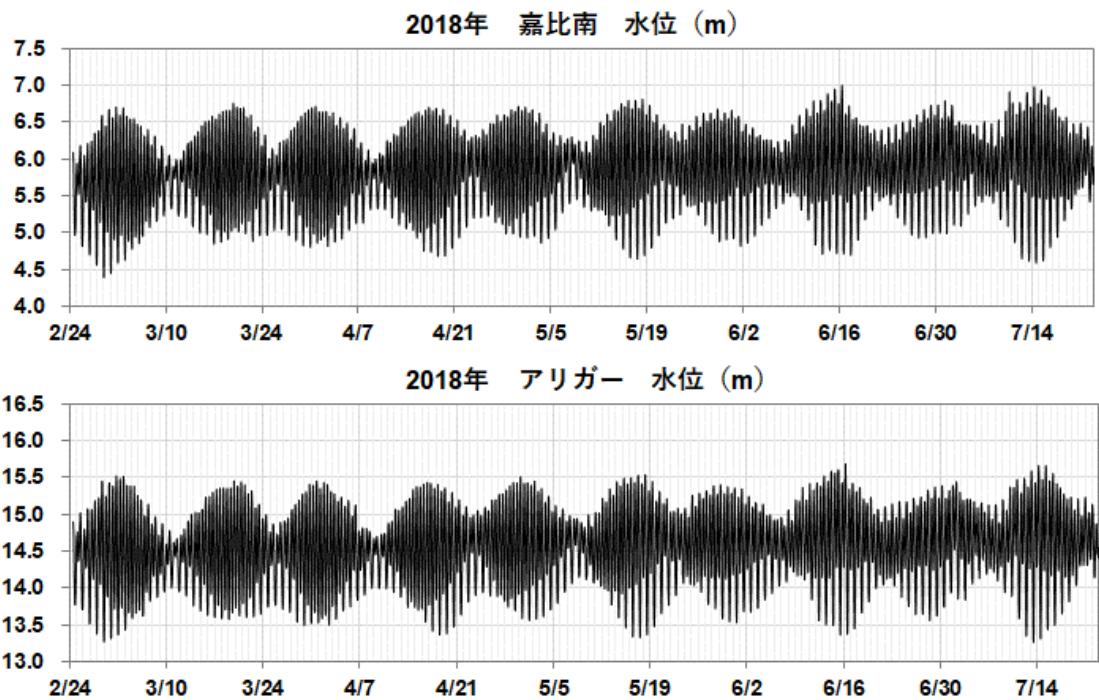


図 3.1.3-5. 水位の計測結果の一例（上：嘉比南、下：アリガエ）

2018年2月から7月にかけての10分毎の観測値を1時間平均に直した値を示している。

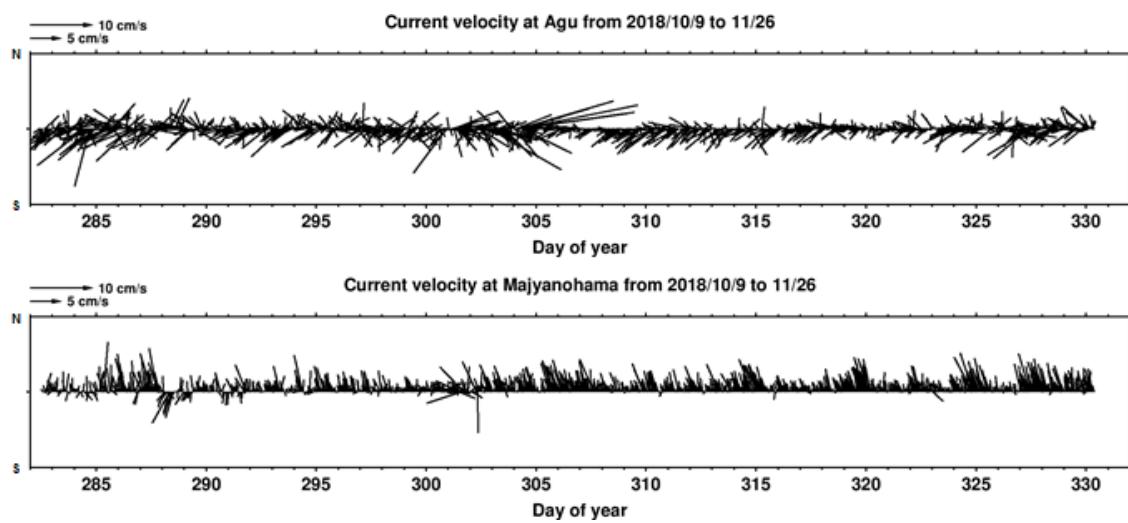


図 3.1.3-6. 流速の計測結果の一例（上段：アグ、下段：マジャノハマ）

2018年10月9日から11月26日にかけての底層での1時間ごとの観測値を示している。

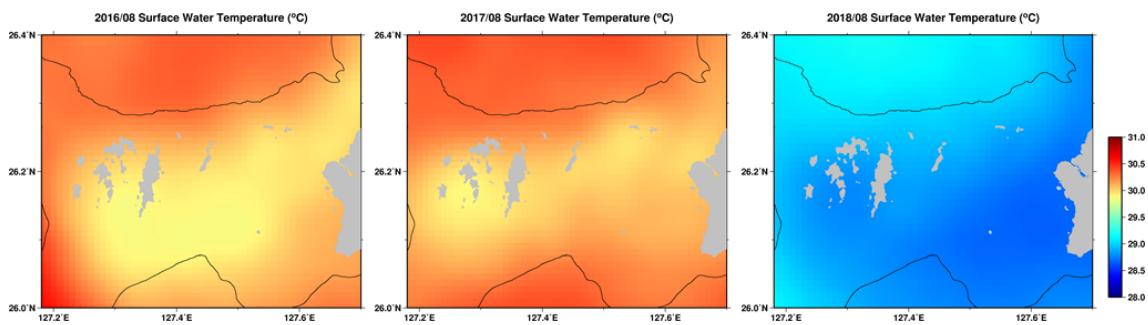


図 3.1.3-7. MUR SST (<https://mur.jpl.nasa.gov/>) による慶良間諸島周辺における
2016 年から 2018 年にかけての 8 月の月平均海面水温の経年変化
図中の黒線は水深 200 m の等深線を示している。

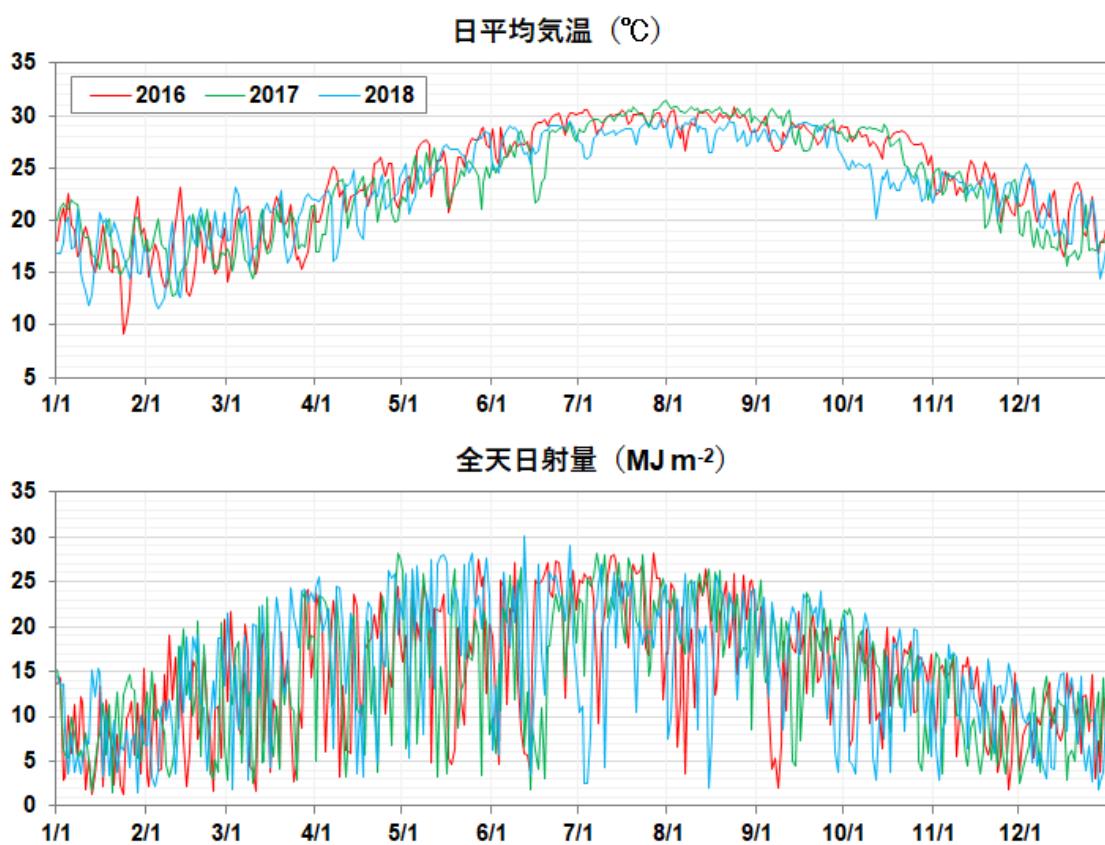


図 3.1.3-8. 気象庁の那覇気象台における 2016 年から 2018 年にかけての日平均気温（上
段）および全天日射量（下段）の観測値の比較
データは気象庁 (<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obssl/index.php>) から引用。

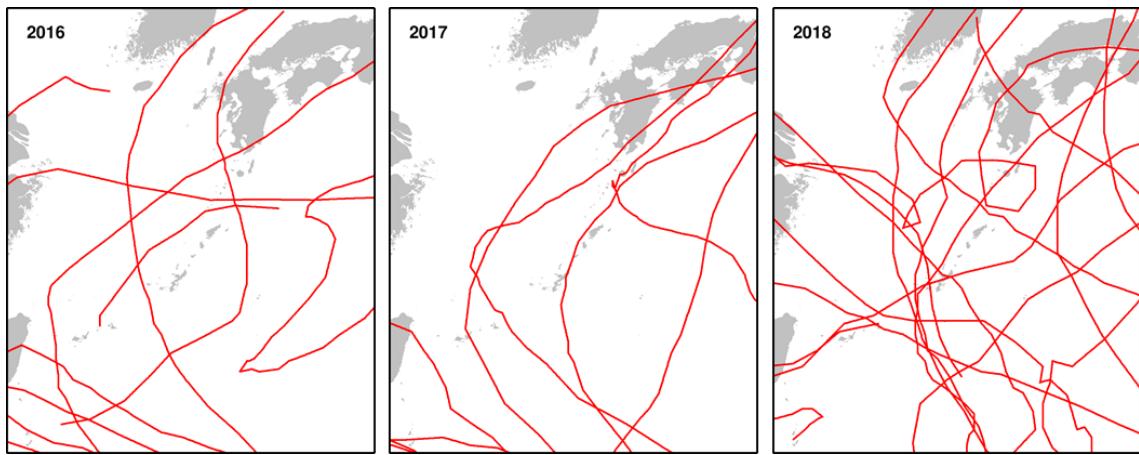


図 3.1.3-9. 2016 年から 2018 年にかけての西日本周辺における台風の経路図

データは気象庁ベストトラック (<https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-public/trackarchives.html>) から引用。

3.1.4 中深度サンゴ群集の調査

(1) 中深度サンゴ群集の探索方法

ROV (水中ドローン)、SCUBA 潜水、水中つり下げカメラを用いて水深 30 m 以深に生息するサンゴ (中深度サンゴ群集) の分布状況について調査した (図 3.1.4-1)。水中ドローンは BlueRobotics 社製の BlueROV2 を用い、新たに防水カメラ (GoPro HERO6, GoPro 社製) を装着した。のべ 30 地点において、前述の複数の手法を用いてサンゴの探索を行った (表 3.1.4-1、図 3.1.4-2)。

(2) 現地調査結果およびその考察

調査を実施した 30 地点のうち 21 地点で中深度域サンゴ群集が見られることが確認できた (表 3.1.4-1、図 3.1.4-3)。イシサンゴ類では特にミドリイシ属、センベイサンゴ属、キクメイシ属、クサビライシ科の種が多数の地域に渡って出現していたが、これらの多くは浅場にはほとんど分布しない中深度域に特化した種であると目視観察で同定された。出現した属は全地点の合計で少なくとも 10 科 27 属にわたり、中深度域においても種多様性が高い群集が多く見られた。特に座間味島南東においては、ヒメエダセンベイサンゴおよびエダミドリイシ属が水深 30–40 m に渡って 100% 近い被度で分布している地点が発見され、その地点での出現属数は少なくとも 7 科 11 属に上った。今後さらなる調査によりこの属数はさらに増加することが見込まれる。

しかしながら今年度の調査では同一海域において浅場および中深度域で共通して分布している種はほとんど見られなかった。また、イシサンゴの付着が見られない礫ばかりが多く堆積している場所や、砂地の場所も多くみられ (図 3.1.4-4)、サンゴ群集の分布の有無を広

範囲かつ効率的に、また、同一地点を継続的に探索およびモニタリングできる手法の構築が課題である。

(3) 中深度におけるサンゴの成育環境

水深 30 m 以深の中深度における水温のモニタリング例は非常に乏しい。浅場と比較して中深度の水温の季節変動がどの程度かを把握するため、流动場の再解析モデルである FRA-ROMS (Kuroda et al., 2017 ; <http://fm.dc.affrc.go.jp/fra-roms/>) を用いて慶良間諸島周辺海域 (北緯 25.95 度、東経 127.80 度) における水温の鉛直プロファイルの季節・経年変化を図 3.1.4-5 に示した。水温の再解析結果からは、2016 年と 2017 年には 2018 年と比べてより深い水深まで夏季に 30°C 以上の高水温となっていたことが分かる。沖縄県の瀬底島周辺海域では、表層と 40 m を比べると、平均水温は表層のほうが 1.7°C 高く、季節間でみると夏季には表層が、冬季には 40 m のほうが高水温であった (Prasetya et al., 2016)。また、水深 40 m での光量は表層の 10% 未満であった (Prasetya et al., 2016)。このように、サンゴの生息環境は鉛直的に大きな変動を示すことが分かるが、表層付近と比較して測定されていないパラメータも数多くあることからデータの蓄積が不可欠である。

浅場と比べて中深度では水温上昇が緩やかであり成育に対するストレスは比較的小さいと考えられるが、中深度においても台風等の熱帯低気圧によるサンゴの損傷 (Bongaerts et al., 2013 ; White et al., 2013) や高水温による白化 (Frade et al., 2018) が報告されている。そのため、中深度サンゴ群集が浅場のサンゴの避難地となりうるかについてはさらなる検討が必要である。浅場と中深度で同一の種が存在するか、存在した場合は鉛直的なコネクティビティを有するか、などを明らかにすることが課題である。

表 3.1.4-1. 中深度サンゴ群集の探索を行った地点および調査内容

調査地点名	北緯 (度)	東経 (度)	調査内容			中深度サンゴ 群集の有無	最大水深 (m)	調査日 (YYYYMMDD)
			ROV	SCUBA	水中吊り下げカメラ			
沈船	26.1408	127.2834	●			○	40	20181018
サクバル1	26.1763	127.2723	●			○	30	20181010
サクバル2	26.1789	127.2713	●				42	20181010
サクバル3	26.1742	127.2706	●				51	20181127
阿嘉島南西1	26.1843	127.2645	●			○	30	20181010
阿嘉島南西2	26.1842	127.2535	●				62	20181010
阿嘉島南西3	26.1819	127.2614	●			○	39	20181010
久場島北	26.1834	127.2358	●			○	42	20181127
屋嘉比西1	26.2087	127.2344			●	○	42	20181010
屋嘉比西2	26.2123	127.2349			●		35	20181010
屋嘉比西3	26.2111	127.2319			●		70	20181010
屋嘉比北1	26.2264	127.2437			●	○	50	20181010
屋嘉比北2	26.2259	127.2425			●	○	40	20181010
屋嘉比北3	26.2268	127.2381			●	○	40	20181010
屋嘉比北4	26.2264	127.2372			●	○	50	20181010
安室南1	26.1812	127.3176	●	●		○	44	20181011
安室南2	26.1934	127.3109		●		○	38	20181012
トウマ	26.2247	127.3289	●				failed	20181012
座間味島南東1	26.2226	127.3229	●			○	35	20181012

表 3.1.4-1. (続き) 中深度サンゴ群集の探索を行った地点および調査内容

調査地点名	北緯	東経	調査内容			中深度サンゴ群集の有無	最大水深 (m)	調査日 (YYYYMMDD)
			ROV	SCUBA	水中吊り下げカメラ			
座間味島南東 2	26.2293	127.3251		●		○	35	20181018
安護の浦	26.2324	127.3187	●				20	20181018
座間味島北西 1	26.2400	127.2887	●			○	31	20181126
座間味島北西 2	26.2412	127.2843	●			○	47	20181126
座間味島北西 3	26.2421	127.2798	●				60	20181126
ナガヌ南立標	26.2524	127.5302	●	●		○	33	20181018
ナガヌ島北西	26.2805	127.5336	●	●		○	40	20181017
ナガヌ北方 1	26.2787	127.5607	●			○	40	20181017
ナガヌ北方 2	26.2756	127.5591	●	●		○	50	20181017
ナガヌ北方 3	26.2777	127.5692	●			○	50	20181017

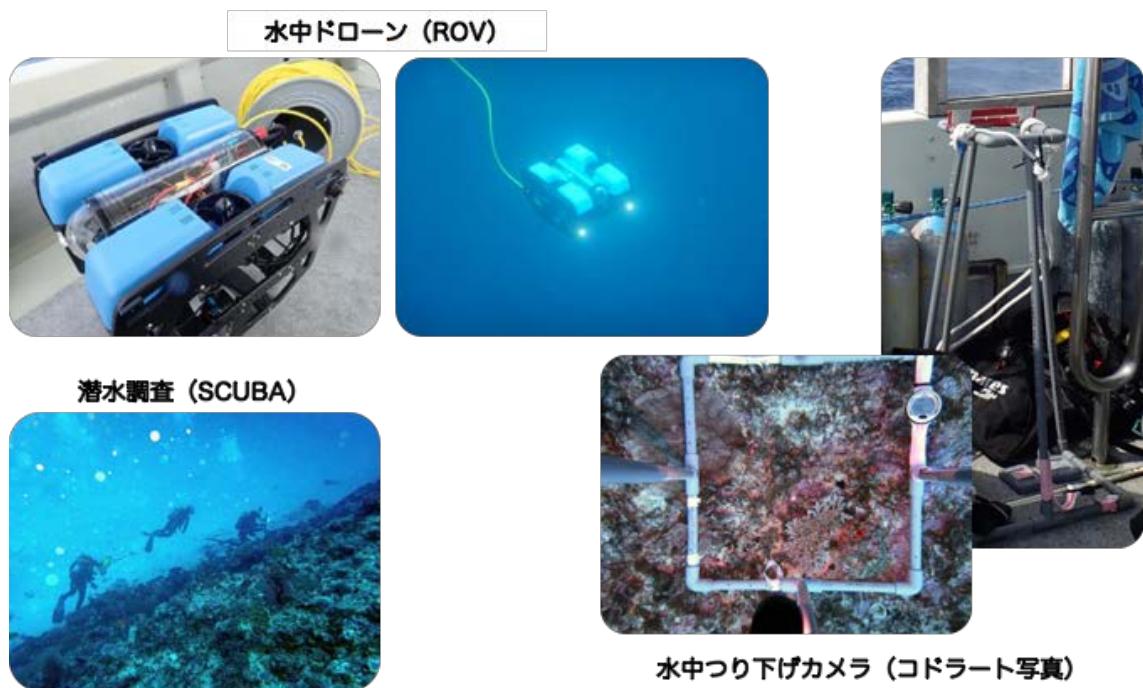


図 3.1.4-1. 中深度サンゴ群集の探索方法の概要

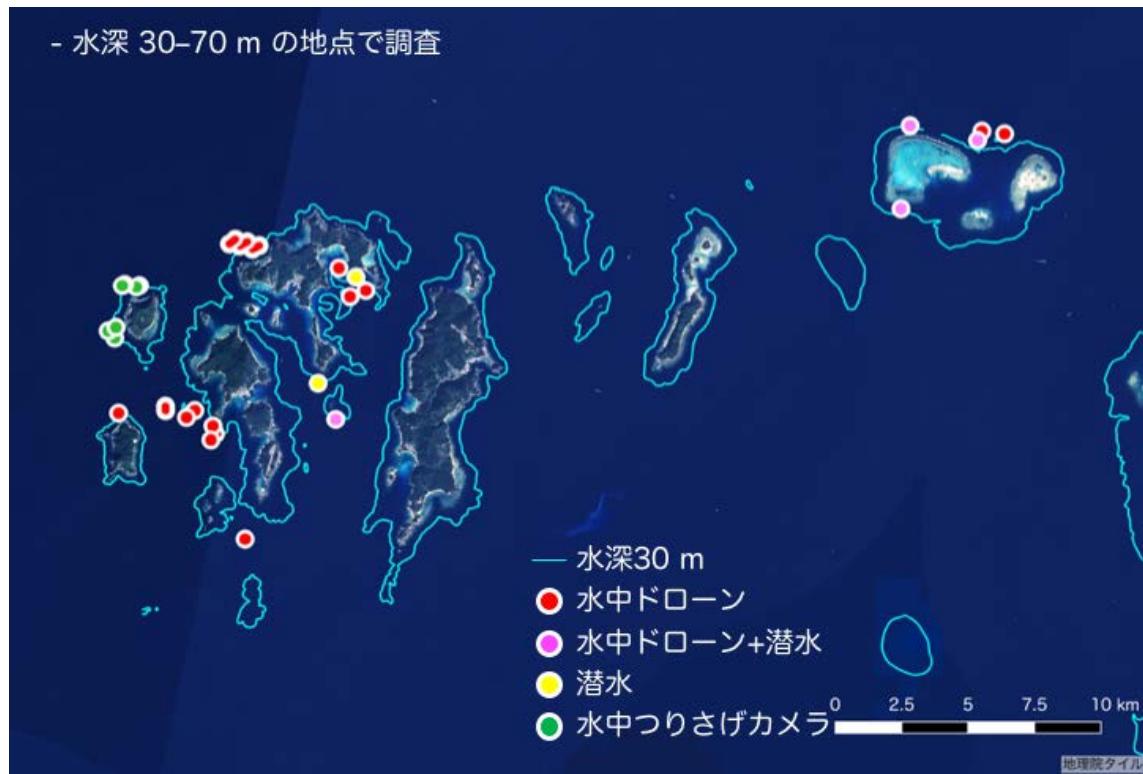


図 3.1.4-2. 中深度サンゴ群集の探索を行った地点

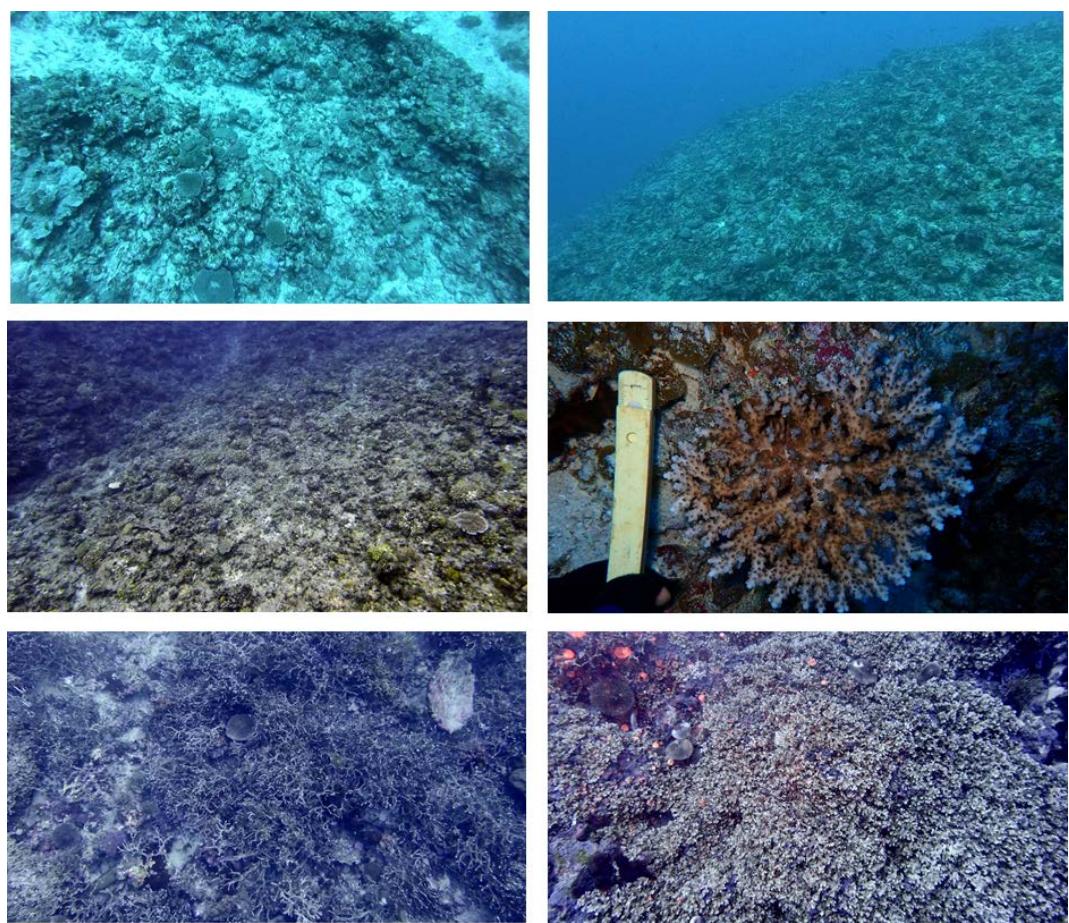


図 3.1.4-3. 慶良間諸島国立公園における中深度サンゴ群集の分布状況の一例

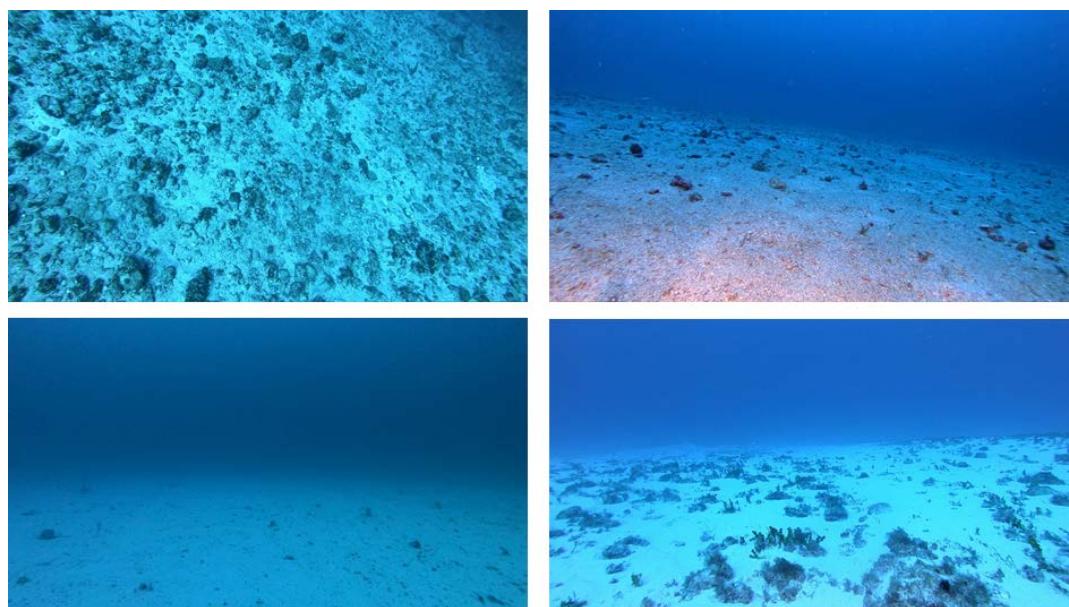


図 3.1.4-4. 慶良間諸島国立公園において中深度サンゴ群集がみられなかった地点の海底の状況の一例

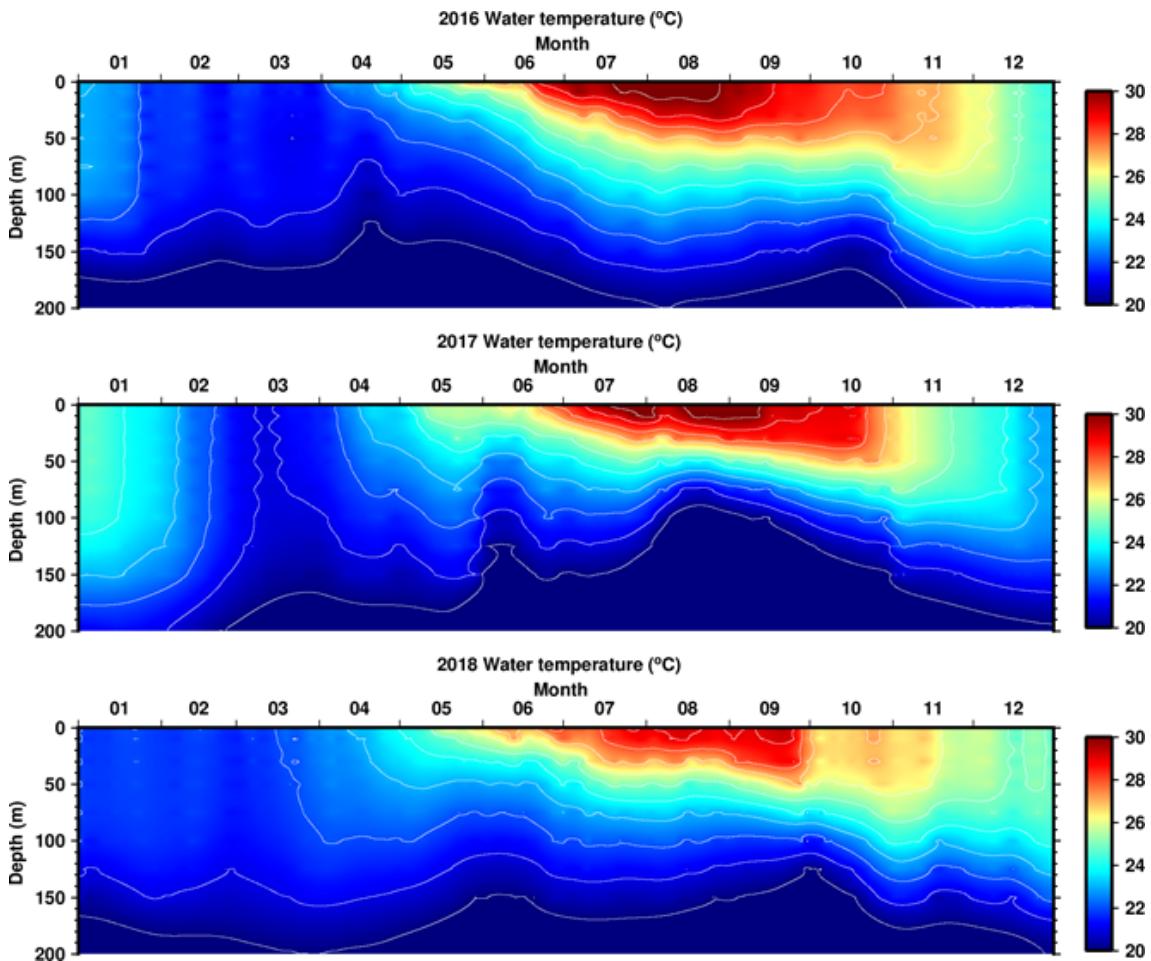


図 3.1.4-5. FRA-ROMS (<http://fm.dc.affrc.go.jp/fra-roms/>) の再解析計算結果による
2016 年から 2018 年にかけての慶良間諸島周辺における水温の経時変化
図中の白線は水温の等值線を示している。

3.2 気候変動影響の分析・精度検証

3.2.1 サンゴ幼生分散シミュレーション

(1) 幼生分散モデルの計算条件

流動モデルの計算結果を用いてオイラー・ラグランジェ法により、サンゴの浮遊幼生を想定した粒子の分散シミュレーションを行った。使用した流動モデルは、水平解像度が 1/12 度の JCOPE2 (Miyazawa et al., 2009) もしくは JCOPE2M (Miyazawa et al., 2017) をダウンサンプリングし、潮汐成分を加えた水平解像度が 1/36 度 (約 3 km) の JCOPE-T-NEDO (Varlamov et al., 2015) である。1 時間ごとの表層の東西流速及び南北流速の計算結果を用い、計算対象年は 2012 年から 2017 年までの 6 年分とした。

サンゴの浮遊幼生は流れに対して完全に受動的なトレーサーとして計算を行った。ある時刻 t における浮遊幼生の位置を X_t とすると、時刻 $t + \Delta t$ における位置 $X_{t+\Delta t}$ は、

$$X_{t+\Delta t} = X_t + 0.5\Delta t(V_t + V_{t+\Delta t}) + 0.5\Delta t^2(\nabla V_t)V_t + \alpha\gamma(0,1)\sqrt{2K_{hor}\Delta t}$$

と表すことができる（日向・戸簾, 2005）。ここで、 V は流速、 α はパラメータ、 $\gamma(0,1)$ は平均 0 標準偏差 1 の正規乱数、 K は水平拡散係数である。なお、水平拡散係数は東西流速 u 、南北流速 v の計算結果を用いてスマゴリンスキーモデルから次式により計算している。

$$K_{hor} = C \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \sqrt{\left(\frac{du}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dy}\right)^2 + 0.5 \cdot \left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx}\right)^2}$$

ここで、 C はパラメータ (0.02)、 Δx (m) は x 方向の格子間隔、 Δy (m) は y 方向の格子間隔である。

粒子は常に表層に分布しているものとし、分散期間は 3 週間とした。沖縄周辺海域では、これまでに 5 月～9 月にかけてサンゴの産卵が確認され、このうち大規模な産卵は 5 月または 6 月に観察されている (Hayashibara et al., 1993 ; 下池, 1999 ; 瀧岡ら, 2002)。粒子の放出のタイミングは村上ら (2015) を参考に、6 月に入ってからの最初の中潮の真夜中に設定した。粒子の放出地点は図 3.2.1-1 に示したとおり慶良間諸島の各島の周囲とし、1 地点当たりの放出粒子数は 1 万個である。沿岸近くに位置するモデル粒子が分散効果によって陸上格子に移動した場合には、過去の海上格子点に粒子を戻して計算をやり直した。

(2) 結果・考察

本計算で用いた JCOPE-T-NEDO は潮汐 (M2 分潮) の影響を考慮した流動モデルであり、慶良間諸島周辺では複雑な流れが生じているが、平均的な流況としては慶良間諸島の南側から沖縄本島の南東海域へ向かう流れが卓越していることが分かる (図 3.1.2-2)。粒子の分散傾向は海況の経年的な違いを反映し変動が大きいものの、南東方向へ輸送される粒子の割合が高かった (図 3.1.2-3)。一方で、年によっては沖縄本島の周辺に留まる粒子も多かつた。漂流ハガキ (木村ら, 1992) や漂流ブイ (瀧岡ら, 2002) の結果からも慶良間諸島から沖縄本島西岸への輸送過程が指摘されている。また、Nishikawa et al. (2003) によると、1998 年の沖縄本島での大規模白化後の回復を支えたのは慶良間諸島の個体群である。一方で、Shinzato et al. (2015) では逆の傾向が指摘されていることもあり、海水流動と遺伝子流動を組み合わせた更なる解析・評価が必要である。本シミュレーションの空間解像度は約 3 km であるが、慶良間諸島の内海を表現するには十分な解像度とは言えない。そのため、より高解像度の流動モデルを開発・適用することで、各島の間のコネクティビティについても検証できるようになることが期待される。

また、種によって産卵様式 (保育型、放卵放精型) や産卵のタイミングが大きく異なることから (波利井, 2008)、生活様式に応じた分散過程の表現や、水平方向に加えて鉛直方向のコネクティビティの検証 (Thomas et al., 2015 ; Holstein et al., 2016) も課題である。

本項では現況を対象とした再解析モデルの計算結果を用いて幼生分散シミュレーションを実施しコネクティビティを評価したが、この傾向が将来的に変化するかどうかの評価も

重要な課題である。気候変動の影響として、温暖化による海流の変化 (Sakamoto et al., 2005) や浮遊期間の変化 (Figueiredo et al., 2014)、酸性化による幼生の発育不良 (Nakamura et al., 2011) 等が考えられ、その影響は Munday et al. (2009) で議論されている。

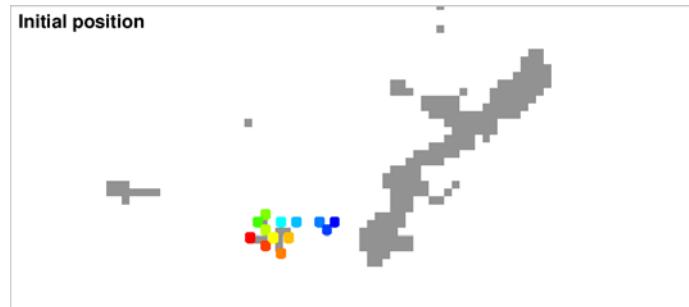


図 3.2.1-1. 幼生分散シミュレーションで設定した粒子の放出位置
丸の色の違いは粒子の初期位置が異なっていることを示す。

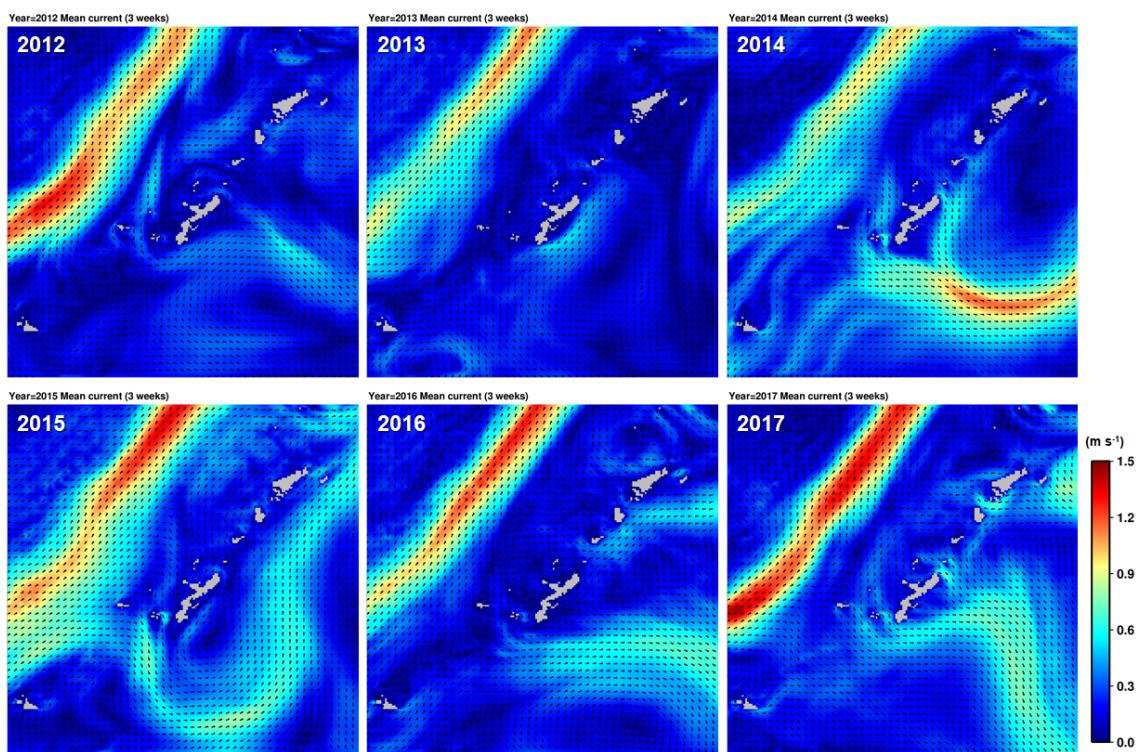


図 3.2.1-2. 2012 年から 2017 年にかけての幼生分散シミュレーションの計算期間中の平均的な表層の流況
流動モデルの結果は JCOPE-T-NEDO から引用。

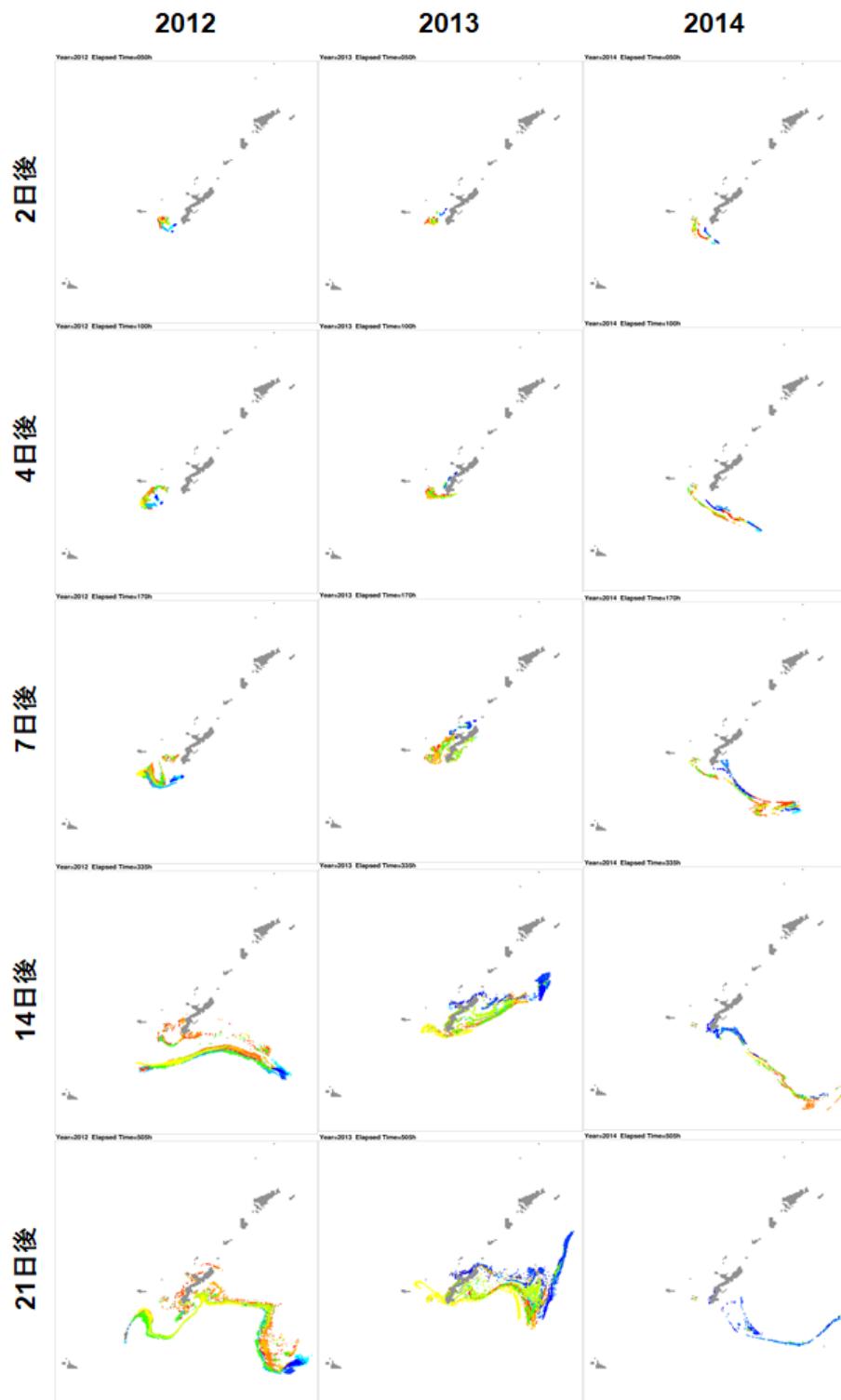


図 3.2.1-3. 2012 年から 2017 年にかけての幼生分散シミュレーションの計算結果
 粒子放出からおよそ 2、4、7、14、21 日後の位置を示した。粒子の各色は図 3.2.1-1 で示した初期位置に対応している。

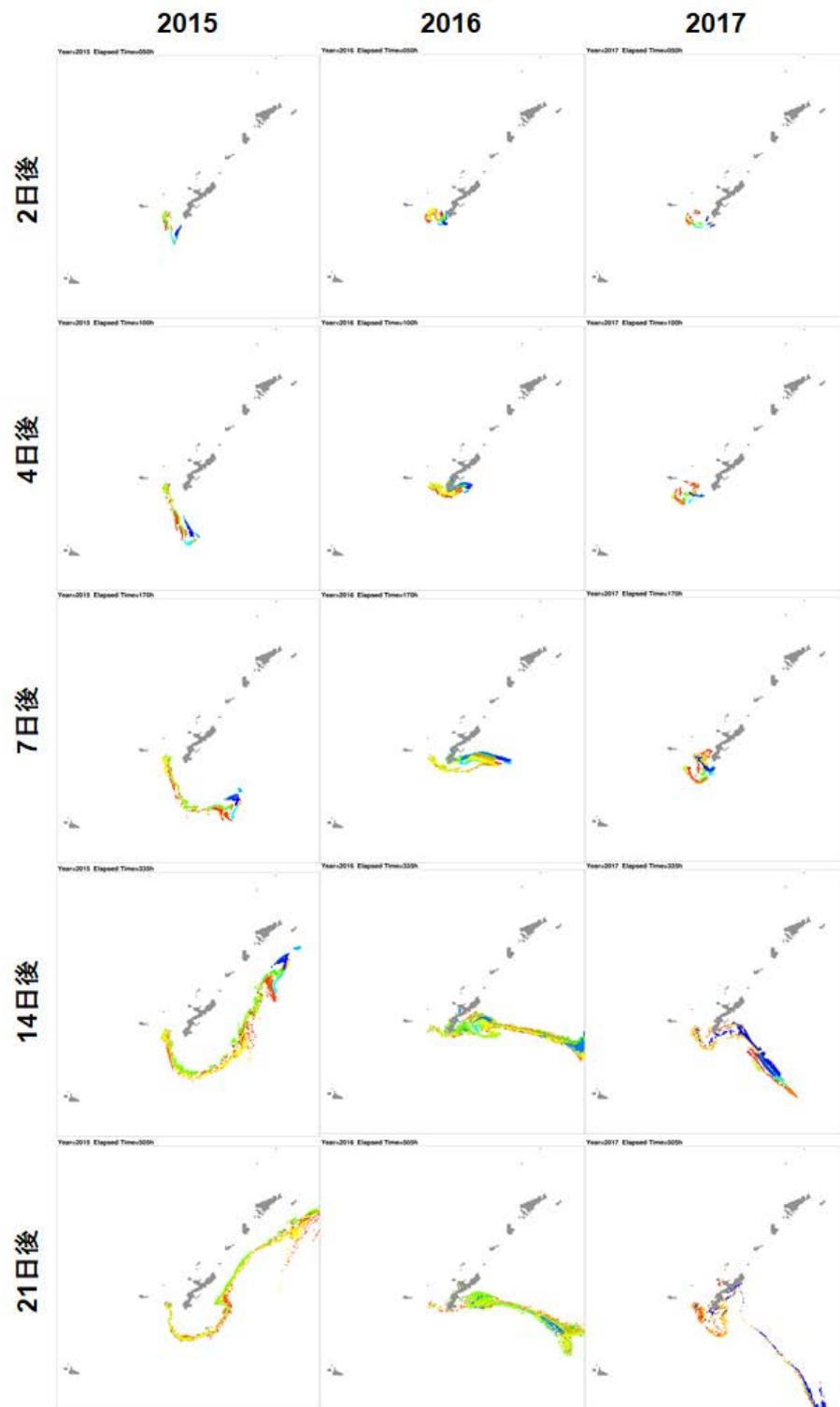


図 3.2.1-3. (続き) 2012 年から 2017 年にかけての幼生分散シミュレーションの計算結果

粒子放出からおよそ 2、4、7、14、21 日後の位置を示した。粒子の各色は図 3.2.1-1 で示した初期位置に対応している。

3.2.2 物理環境モデルの構築・再現性の検証

(1) 物理環境モデルの概要

物理環境モデル（3次元流動モデル）では流れ場、水温、塩分の時空間的な変動を計算し、その結果等に基づいてサンゴの生息適地を評価する（図 3.2.2-1）。流動モデルは Princeton Ocean Model (Blumberg & Mellor, 1987) を用い、基礎方程式は、流速に関しては Navier-Stokes 方程式および連続式、水温と塩分に関しては移流拡散方程式である。

(2) 計算条件

1) 計算領域・海底地形の設定

計算負荷の削減のため座間味島・阿嘉島・渡嘉敷島のそれぞれの島の周囲を含む領域を確保できるよう計算領域を分割した（図 3.2.2-2）。本来であれば、対象とする領域を同時に計算することが望ましいが、今回は座間味島・阿嘉島・渡嘉敷島それぞれの島周辺において、「どのような場所が比較的水温が上昇しにくいか・潮通しが良いか」を評価することに重きを置いている。水平格子間隔は 100 m × 100 m とし、鉛直方向には σ 座標で 10 層に等分割した。海底地形は一般財団法人日本水路協会による海底地形デジタルデータ（<https://www.jha.or.jp/jp/shop/products/btdd/index.html>）に基づいて作成し、浅場や水路など十分に現在の地形が表現されていない箇所に関しては適宜水深を調整した（図 3.2.2-2）。

2) 計算期間の設定

2016 年から 2018 年の 6 月から 10 月を計算対象期間とした。前述のように 2016 年および 2017 年は高水温であり、2018 年は前の 2 年と比べて比較的水温が低かったことが知られている。

3) 境界条件の設定

境界条件として、1 層目の水温は MUR SST (<https://mur.jpl.nasa.gov/>) の解析結果を、1 層目の塩分および 2 層目以降の水温と塩分は FRA-ROMS (Kuroda et al., 2017 ; <http://fm.dc.affrc.go.jp/fra-roms/>) の再解析結果を与えた。潮汐としては、開境界のメッシュに NAO.99Jb (Matsumoto et al., 2000 ; <http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/>) から水位変動を与えた。NAO.99Jb は、日本周辺海域を 1/12° の格子で分割し、さらに TOPEX/POSEIDON による海面高度計データや日本沿岸域の駿潮所データをデータ同化することで、高精度な潮汐計算を行っているモデルである (白木・柴木, 2010)。気象データとして、気象庁の AMeDAS 慶良間 (北緯 26 度 10.1 分、東経 127 度 17.6 分) もしくは那覇気象台 (北緯 26 度 12.4 分、東経 127 度 41.2 分) における海面気圧、気温、相対湿度、風向風速、降水量、全天日射量、雲量の観測値を用いた (<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>)。なお、気象条件は計算領域で一律の値を与えた。淡水負荷としては海面への直接の降水を考慮し、河川を通じての淡水供給は考慮しなかった。

4) 初期条件の設定

初期条件として、流速の初期値は北方成分・東方成分とともに 0 m s^{-1} とし、水温と塩分の初期値は開境界と同様の諸元から設定した。

5) その他の条件の設定

計算の安定化のため助走期間として 5 日間の計算を行ってから本計算に移行した。開境界付近での計算の発散を防ぐため、飯田ら (2018) と同様に開境界付近では動粘性係数を高くして緩衝領域を設定した。なお、本モデルでは干潟・礁嶺などの干出は考慮していない。流動モデルの計算で用いる海底摩擦係数 C_z は次式から求めた。

$$C_z = \text{Max} \left[\left(\frac{\kappa}{\ln(1 + \sigma_{kb-1}) H/z_0} \right)^2, 0.0025 \right]$$

ここで、 κ (no dimension) はフォンカルマン定数、 σ_{kb-1} (no dimension) は、 H (m) は水深、 z_0 (m) は粗度高さであり、GIS データを参考にサンゴが分布している格子点では 0.03 m 、分布していない格子点では 0.01 m とした。

(3) 計算精度の検証・計算結果の概要

3.1.3 で示した現地調査で得られたデータおよび環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所により 2016 年度、2017 年度に行われた「慶良間諸島国立公園におけるサンゴ礁モニタリング調査業務」で測定された水温のデータを用いて計算値と観測値の比較を行い、物理環境モデルの計算精度を検証した。水温については、1 時間ごとの変動は計算値が観測値よりも平滑化された変動を示したものの、季節変動や地点間の差については概ね表現できていた (図 3.2.2-3)。水位変動に関しては、位相が数十分程度異なることがあったものの、振幅は同程度であった (図 3.2.2-4)。流速は観測された速い流れについては十分再現できなかったものの、地点間の絶対流速の差は表現できていた (図 3.2.2-5)。本モデルにより計算された物理パラメータは観測値に対してある程度の誤差を有するものであるが、その誤差を小さくするためには、水平・鉛直方向の解像度を高くすることや、より正確な地形の表現、境界条件の見直し、波浪の影響の導入などが不可欠である。

阿嘉島、座間味島、渡嘉敷島の各島周辺における 2016 年から 2018 年にかけての 8 月の月平均海面水温の分布をみると、第一に 2018 年と比べて 2016 年と 2017 年は非常に高い傾向であることが分かる (図 3.2.2-6)。慶良間諸島は比較的潮通しが良く外洋水の流入の影響を強く受けるが、2016 年と 2017 年は図 3.1.3-7 に示したように高水温の水塊が広がっていることから、この影響を大きく反映していると考えられる。また、地点間でみると、水深が浅いとともに流れが滞りやすい場所 (図 3.2.2-7) では水温が上昇しやすいことが分かる。

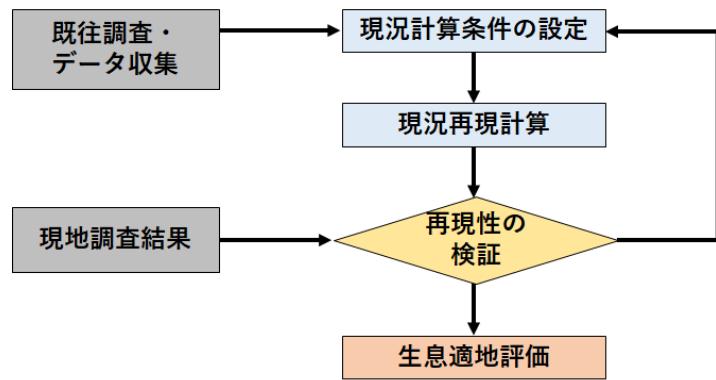


図 3.2.2-1. 物理環境モデルを用いたサンゴの生息適地評価の手順

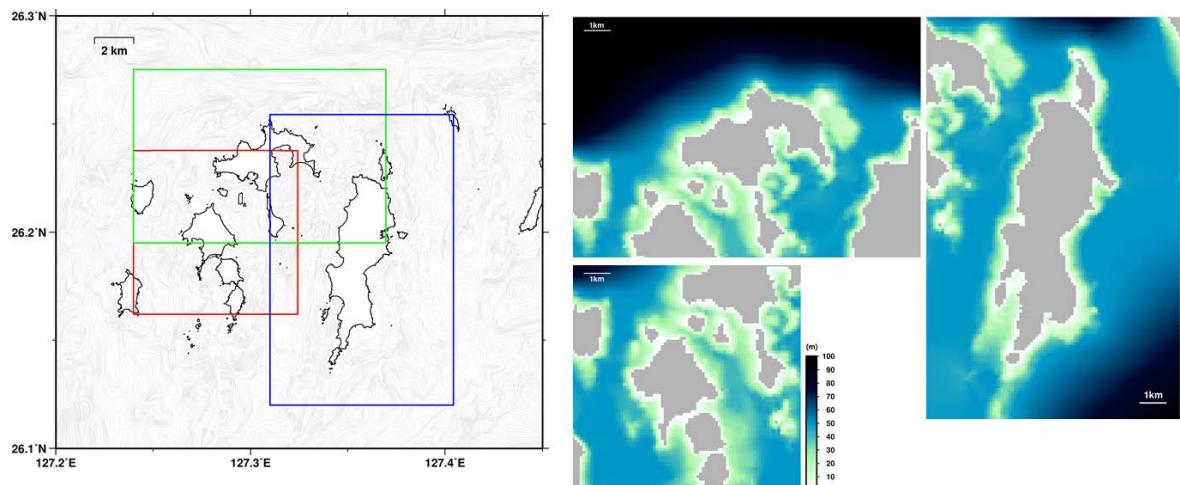


図 3.2.2-2. 物理環境モデルの計算領域（左）と各領域で設定した水深（右）

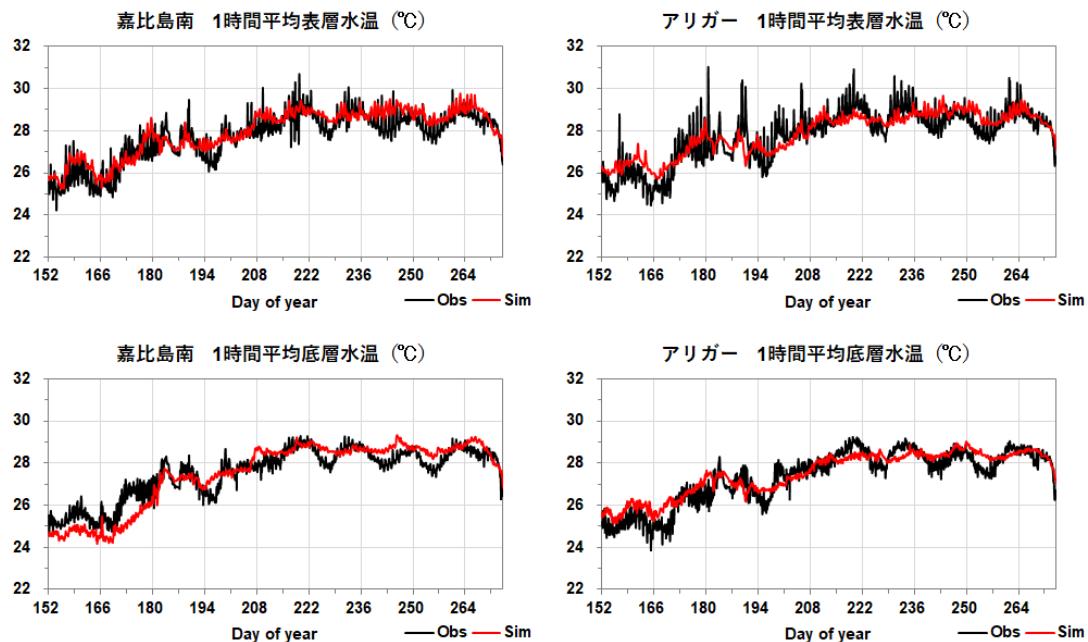


図 3.2.2-3. 2018 年 6 月から 10 月にかけての表層および底層における水温の観測値（黒色）と計算値（赤色）の比較（左：嘉比南、右：アリガ-）
1 時間平均値を示している。

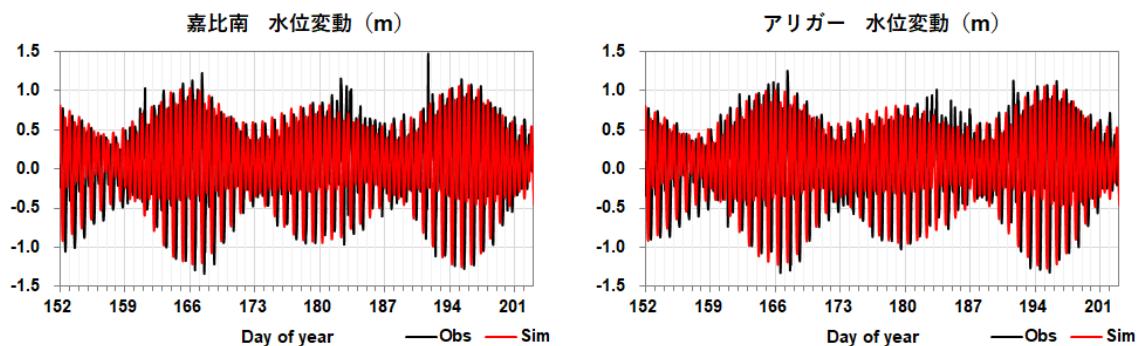


図 3.2.2-4. 2018 年 6 月 1 日から 7 月 21 日にかけての水位の観測値（黒色の実線）と計算値（赤色の実線）の比較（左：嘉比南、右：アリガ-）
1 時間平均した値を示している。

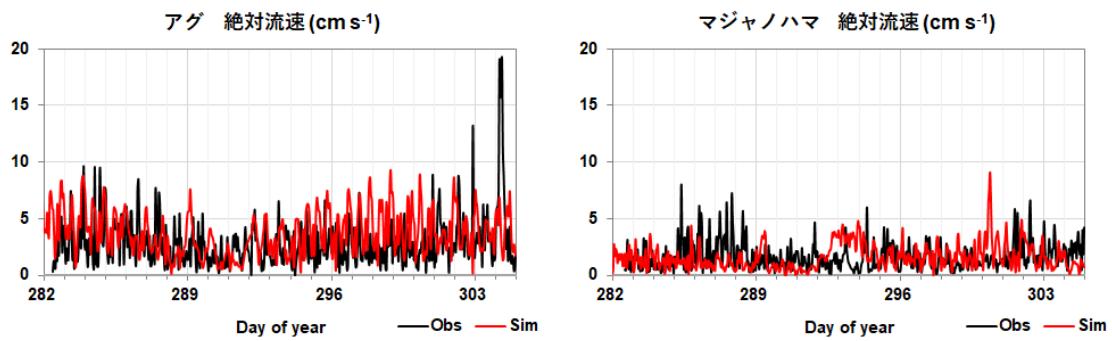


図 3.2.2-5. 2018 年 10 月 9 日から 10 月 31 日にかけての底層における流速の観測値（黒色の実線）と計算値（赤色の実線）の比較（左：アグ、右：マジャノハマ）
1 時間平均した値を示している。

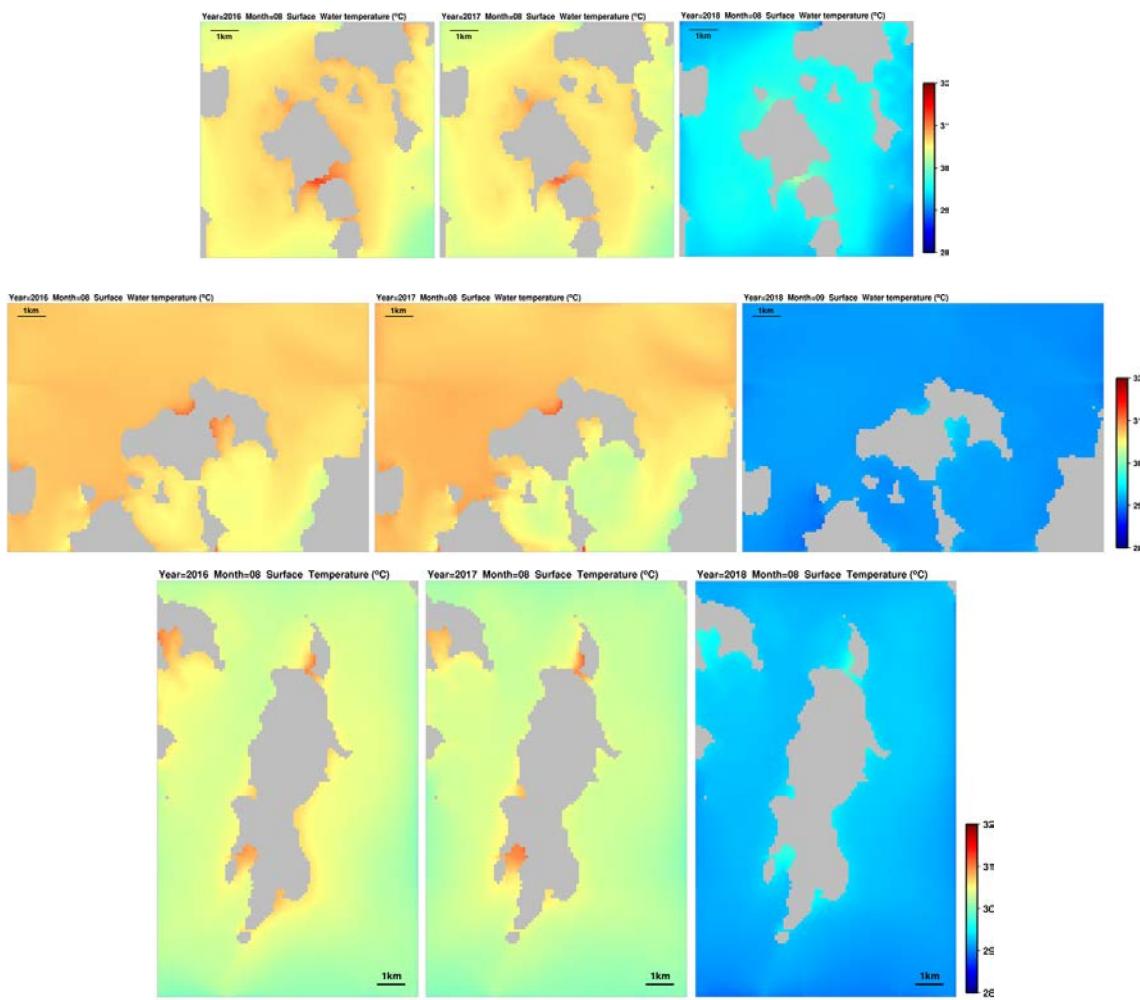


図 3.2.2-6. 阿嘉島周辺（上段）・座間味島周辺（中段）・渡嘉敷島周辺（下段）における 2016 年から 2018 年にかけての 8 月の月平均海面水温の水平分布
慶良間諸島内の位置付けは図 3.2.2-2 を参照。

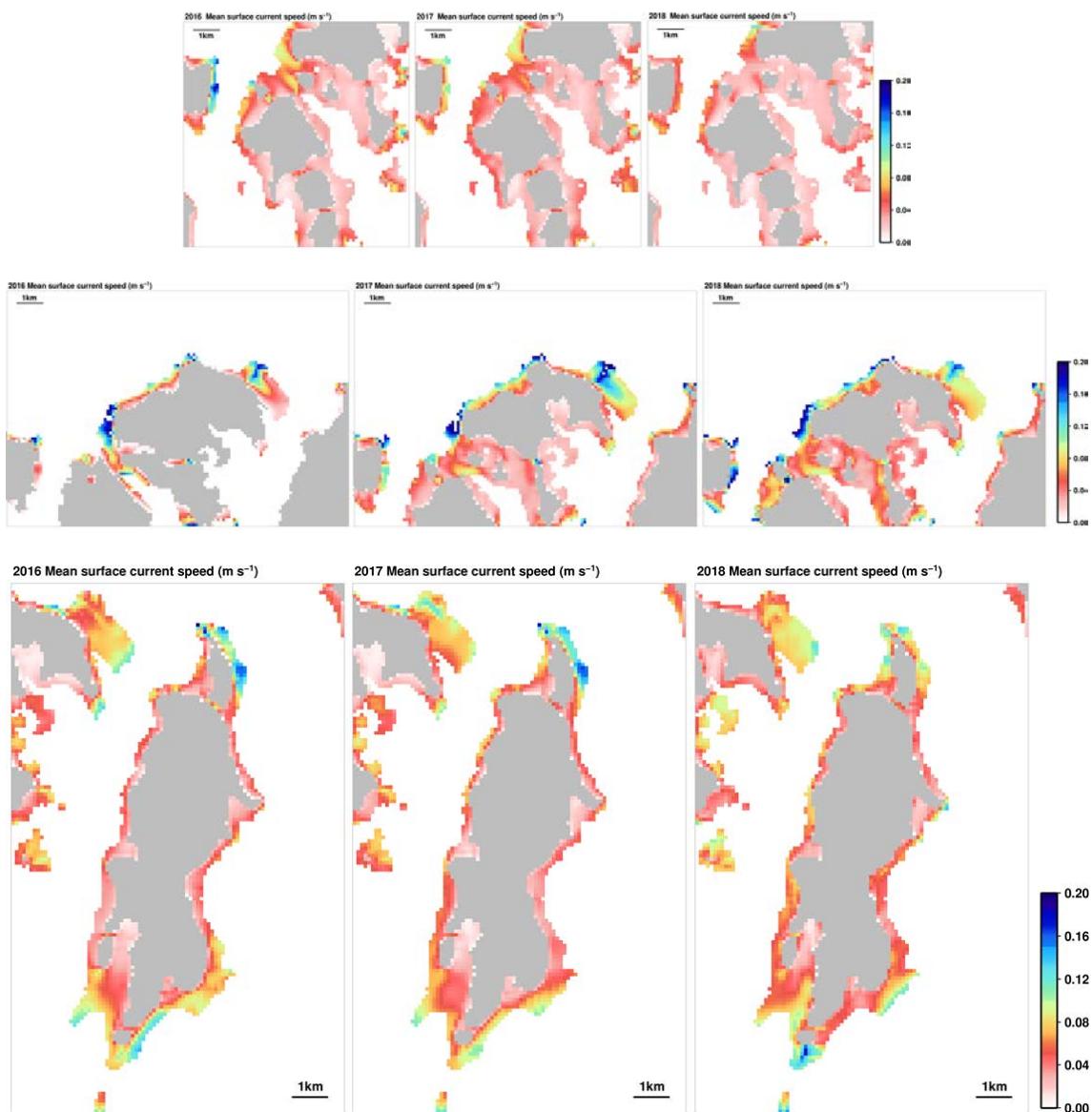


図 3.2.2-9. 阿嘉島周辺（上段）・座間味島周辺（中段）・渡嘉敷島周辺（下段）における 2016 年から 2018 年にかけての表層の絶対流速の平均値の水平分布
水深 30 m 以深の地点は白色でマスクしている。慶良間諸島内の位置付けは図 3.2.2-2 を参考。

3.2.3 サンゴ白化・死亡の推定モデル

慶良間諸島におけるサンゴ礁生態系を対象としたダイビング利用の気候変動適応策を考えるためには、慶良間諸島海域内においてどの場所がどれくらいサンゴの生残に適しているのかを地図上で面的に判断する資料が必要となる。そこで、物理環境モデル（3.2.2）による 8 月の海表面水温及び流速、さらに紫外線量及び濁度を用いて、実際に観察されたサンゴの白化及び白化による死亡を環境要因から推定する統計モデルを構築した。

実際のサンゴ白化及び白化による死亡の観察記録として、「環境省モニタリングサイト 1000 事業報告書」(平成 25~29 年度)、及び「環境省那覇自然環境事務所 慶良間諸島国立公園におけるサンゴ礁モニタリング調査業務報告書」(平成 28, 29 年度) に掲載の図表からの読み取り値を使用し、白化無し (0%)、軽度白化 (~25%)、中程度白化 (25~50%)、重度白化 (50%~)、死亡ありの 5 ランクに分類した。

環境要因はまず物理環境モデル (3.2.2) の 2016 年及び 2017 年の 8 月の海表面水温及び海面流速の出力値を用いたが、物理環境モデルは慶良間諸島中心部を対象に計算されており、渡嘉敷島より東側については未計算である。このため未計算領域については、海表面水温は MUR SST (3.2.2 参照)、流速は HYCOM+ NCODA Global 1/12° Analysis GLBu0.08 (<https://hycom.org/dataserver/gofs-3pt0/analysis/>; accessed 25 June 2018) を用いて補った。濁度は消散係数 K_{490} (4 km, Level-3 binned MODIS AQUA products) を用いた。紫外線量 (UV-B) は Japan Aerospace eXploration Agency Satellite Monitoring for Environmental Studies (JASMES; <http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/>; accessed 25 June 2018) 提供の MODIS Aqua 及び Terra の平均を取り使用した。

観察された白化・死亡を環境要因から推定する統計モデルとして、順序ロジットモデルを使用した。順序ロジットモデルは順位付けのあるデータについて、個々の順位が実現する確率を推定するモデルである。統計学的に環境要因と観察事象の関連を推定するには、環境要因と観察事象のいずれについても十分な値の幅と変動が必要であるが、順序モデルを単純に対象海域のデータに適用したのみでは、これらの値の幅と変動が小さすぎることが試行計算により判明した。そこで統計学的推定を 2 段階の空間スケールで同時に行うことにより推定精度の向上を図った。広域的な空間スケールは琉球列島全域に拡大し、狭域スケールを慶良間諸島に設定した。この同時推定により、各環境変数の回帰係数及びランク毎の切片の値を得た。求められた回帰式を 2016 年、2017 年の環境変数に適用することで慶良間諸島海域におけるサンゴの白化及び白化による死亡の推定値が得られた。

推定された白化及び死亡の分布は 2016 年と 2017 年で似通っており、いずれにおいても座間味島と阿嘉島の周囲、とくに小さい湾の奥において白化程度が高い結果となった。観察された白化記録においても 2016 年は座間味島周囲で白化程度が高く、また小さい湾奥部において白化程度が高いことも共通しており、概ね実際の白化を再現できた。一方で、2017 年では白化はほとんど起きていないかったにもかかわらず、過剰推定となっていた。この理由として、サンゴはある程度の高温ストレス耐性を獲得することが知られており (Brown et al., 2008)、とくに 2016 年は世界広域的に大規模な白化が起きた翌年であるため、2017 年も高水温であったにもかかわらず、さほど白化が起こらなかつたことがグレートバリアリーフにおいても報告されている (Hughes et al., in press)。サンゴの高温適応可能性を見積もることは、今後のサンゴ白化推定を向上させる上での課題となる。

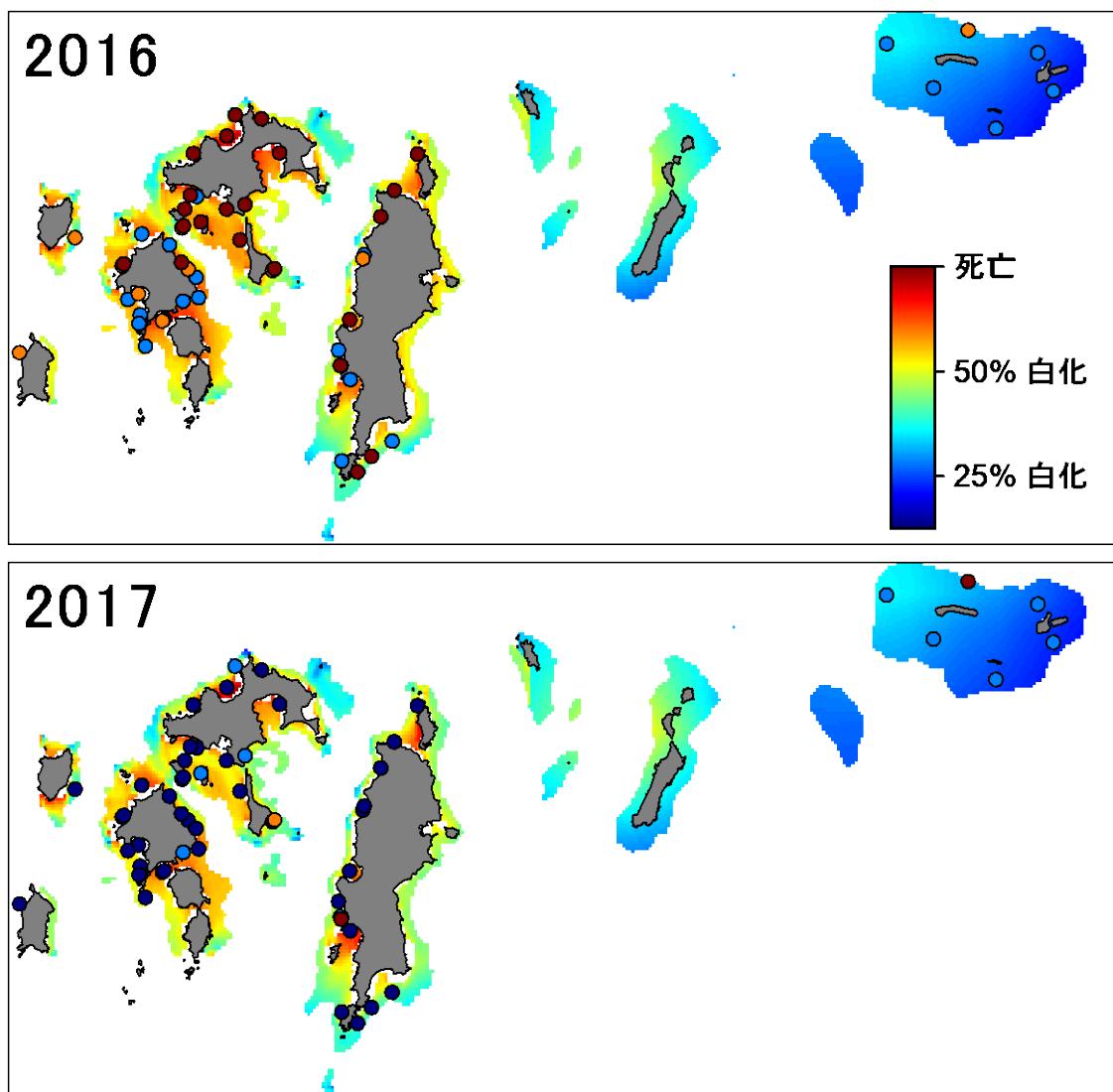


図 3.2.3-1. 2016 年及び 2017 年の慶良間諸島におけるサンゴ白化及び白化による死亡のモデル推定結果

各ポイントは実際に観察された白化と白化程度を表す。水深 30 m より浅い海域について推定された白化～死亡の程度を表した。

3.2.4 サンゴ白化・死亡の将来予測

サンゴの白化はおもに年毎の夏季の過剰水温によって引き起こされる年単位の現象である。このため将来気候モデルによる水温出力値を単純に適用することにより将来のサンゴ白化頻度を予測しようとすると、白化が生じる年の頻度は将来気候モデルが出力する水温の年変動に大きく依存する。しかし現状では、年毎の水温変動をも再現できるほどの高精度な将来気候モデルは開発されていない。このため本研究では、ベースラインとして現在の年毎の最暖月平均水温（8月とみなした）を 10 年分準備し、さらに昇温により将来水温を作

成し、これを前項（3.2.3）で構築したサンゴ白化・死亡の推定モデルに適用することで将来の白化・死亡の予測を行った。ベースラインの10年分の海表面水温は、物理環境モデル（3.2.2）による8月の値に対し2008～2017年のMUR SSTの差分を足し合わせることで表現した。さらに、これに+0.5°C、+1.0°C、+1.5°C、+2.0°C平行に全体的に昇温させることによって将来水温を作成した。

昇温に対するサンゴ白化頻度については、0.5°Cの昇温さえも10年あたり最多で8回も白化する予測となり、+1.5°C以上では慶良間諸島の全域が常態的に白化するという厳しい予測結果となった（図3.2.4-1）。一方、白化によるサンゴの死亡については、現在～+1.0°Cまではごく一部を除き10年あたり最大でも2回以下の予測となったが、+1.5°Cでは3回以上の死亡が生じる海域が生じ、+2.0°Cでは多くの海域が4～5回の死亡が生じると予測された（図3.2.4-2）。しかし+2.0°Cのシナリオにおいても、死亡が2～3回程度の海域は残存する予測となった。海水温の上昇は広域的な現象ではあるものの、影響の程度には地域スケール内でも変動があることを示している。また、この昇温予測ではサンゴの高水温への適応可能性を考慮していないが、サンゴはある程度は高温適応すると考えられており（Hughes et al., in press）、適応の程度によってはよりサンゴが白化・死亡を回避できる場合もあるだろう。

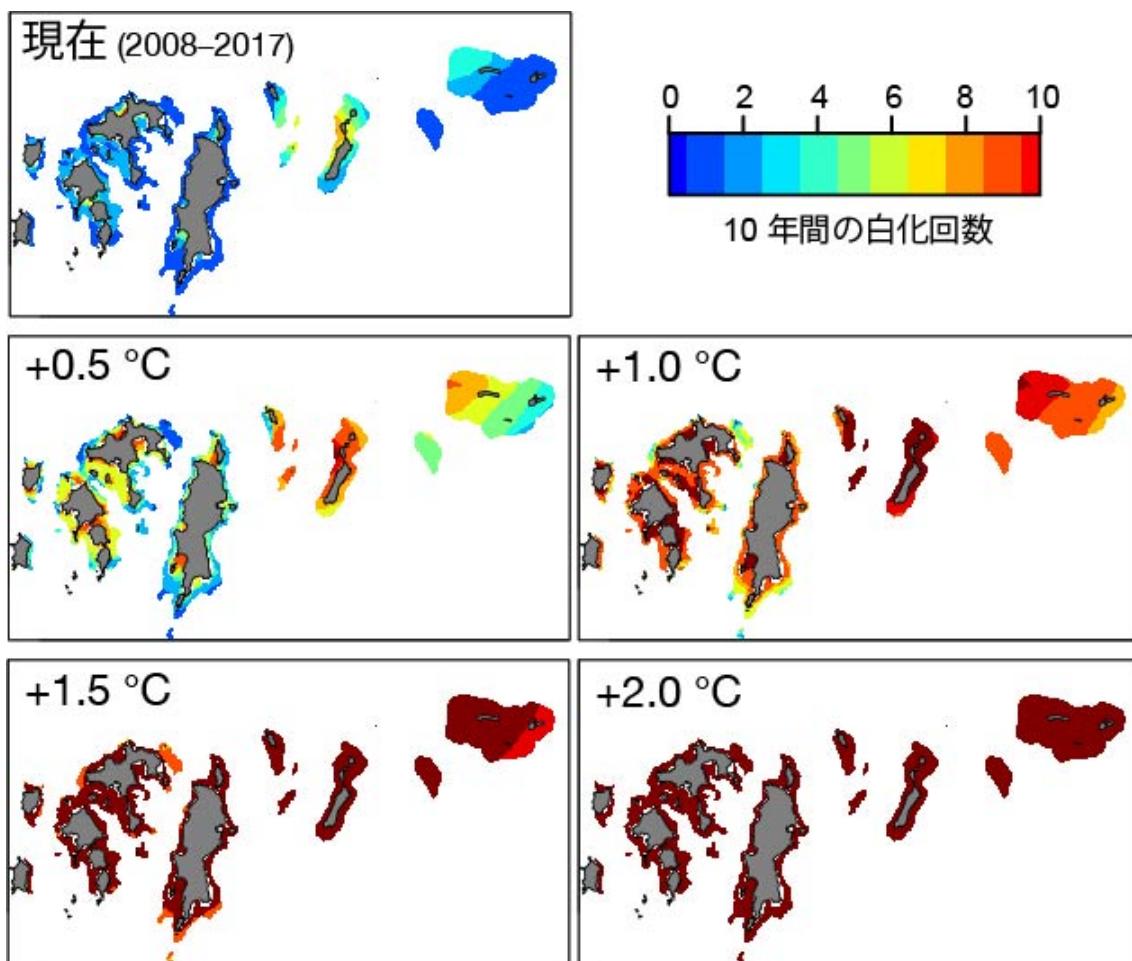


図 3.2.4-1. 慶良間諸島におけるサンゴ白化の将来予測推定結果

現在（2008～2017年）に対して全体的に、+0.5°C、+1.0°C、+1.5°C、+2.0°C昇温した場合の予測を示す。水深30mより浅い海域について推定された10年あたりの白化の頻度を表した。

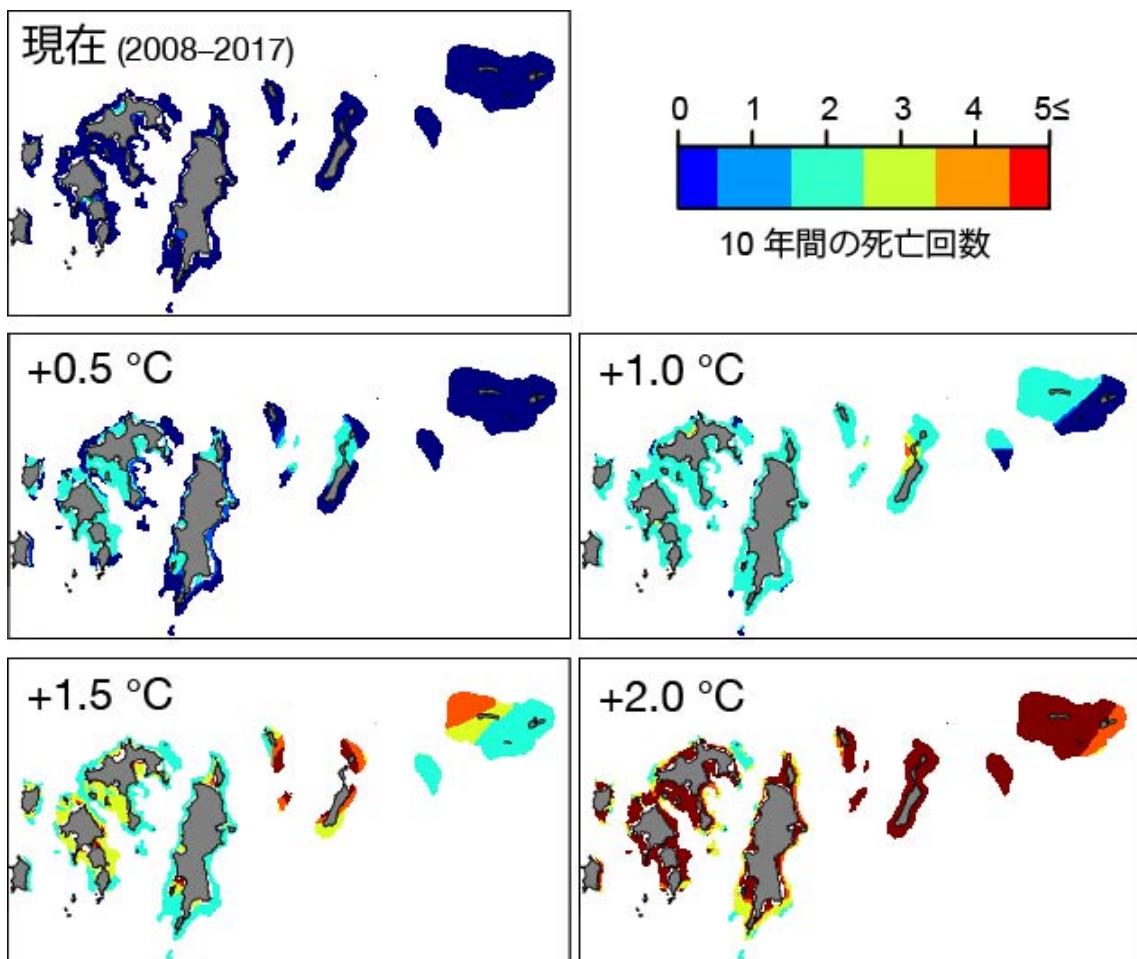


図 3.2.4-2. 慶良間諸島におけるサンゴの白化による死亡の将来予測推定結果

現在（2008～2017年）に対して全体的に、 $+0.5^{\circ}\text{C}$ 、 $+1.0^{\circ}\text{C}$ 、 $+1.5^{\circ}\text{C}$ 、 $+2.0^{\circ}\text{C}$ 昇温した場合の予測を示す水深30mより浅い海域について推定された10年あたりの白化の頻度を表した。

3.3 適応策の提案

自然生態系への気候変動影響に対する適応策としては、気候変動影響に対して脆弱な場所を優先的に対策する考え方と、逆に気候変動の影響を受けにくい場所に対策を集中する考え方があり得る。慶良間諸島国立公園ではサンゴの保全努力としてオニヒトデやレイシガイ類の駆除（3.1.2）等が行われている。これ以外にも将来の気候変動による直接的な影響からサンゴを保全・復元する試みとして、夏期の遮光（沖縄県, 2017 ; Kumagai et al., 2018）や移植（沖縄県2017など）等が知られているが、それらの技術は限定的な範囲にしか適用できておらず、大規模な白化・死亡に対抗しうるものではない。このような現状の技術的限界を考慮すれば、慶良間諸島国立公園のサンゴへの気候変動影響に対して取り得る適応策は、将来の気候変動下においても比較的サンゴが生存しやすい場所を守っていく方向性が妥当と考えられる。すなわち、気候変動下でもサンゴが生残しやすい場所を重点的に保全し

つつ利用すれば、持続的なサンゴのダイビング利用を目指す気候変動適応策が取り得るだろう。

ここでは、現在のサンゴ被度（3.1.1）、サンゴの利用・保全（3.1.2）、および将来の白化によるサンゴ死亡の将来予測（3.2.4）を重ね合わせ、将来的な+1.5°Cおよび+2.0°Cの温暖化シナリオのもとで、サンゴを保全しつつダイビングポイントとして利用するのに適した場所を選択する適応策の提案を行った。優先的に保全すべき場所の候補としては、現在のサンゴ被度が高く（25%以上）、また保全努力が行われているダイビングポイントのうち、各昇温シナリオにおいて比較的サンゴ死亡回数が少ない場所が挙げられる。

+1.5°Cの昇温シナリオのもとでは予測される最少のサンゴ死亡回数は2回だったため、死亡回数2回の範囲からダイビング利用と保全に適した場所の候補を探査した（図3.3-1A）。その結果、座間味島周囲では、北部1ヶ所、南東部2ヶ所、南西部1ヶ所、阿嘉島周囲では北東部1ヶ所、渡嘉敷島周囲では中西部1ヶ所、南部1ヶ所がそれぞれ選定された（図3.3-1Aのピンク色の円）。

+2.0°Cの昇温シナリオのもとでは多くの海域が予測される死亡回数が5回と厳しい予測だったが、サンゴ死亡回数が最少の2回の場所も僅かに残存していたため、死亡回数2回の範囲からダイビング利用と保全に適した場所の候補を探査した（図3.3-1B）。その結果、小規模な範囲ながら、座間味島周囲では、北部1ヶ所、南東部2ヶ所、阿嘉島周囲では北東部1ヶ所、渡嘉敷島周囲では中西部1ヶ所、南部1ヶ所がそれぞれ選定された（図3.3-1Bのピンク色の円）。

一方で、現状のダイビング利用がない場所のうちでも、座間味島の東西端などにサンゴ被度が高くかつ死亡回数が最少の2回である場所が見られ、将来的な新たなダイビング利用・保全の候補になり得ることを示唆する。しかし、これらの場所は波浪に対して遮蔽されておらず、よほど海況がよい季節・日でなければ、慶良間諸島の小型ダイビング船にとっては利用しづらいかもしれない。

今回の解析は、サンゴの高温適応可能性（Brown et al., 2002 ; Hughes et al., in press）が不明であるため考慮に入れることができず、また100mという空間解像度の解析は、現状の公表学術論文によって達成されている世界最高分解能である1km（Kumagai et al., 2018）を大きく上回る挑戦であった。このため将来的により高度化した解析が実現し予測精度が向上した際には、その予測をもって再び適応策を検討する必要があるだろう。

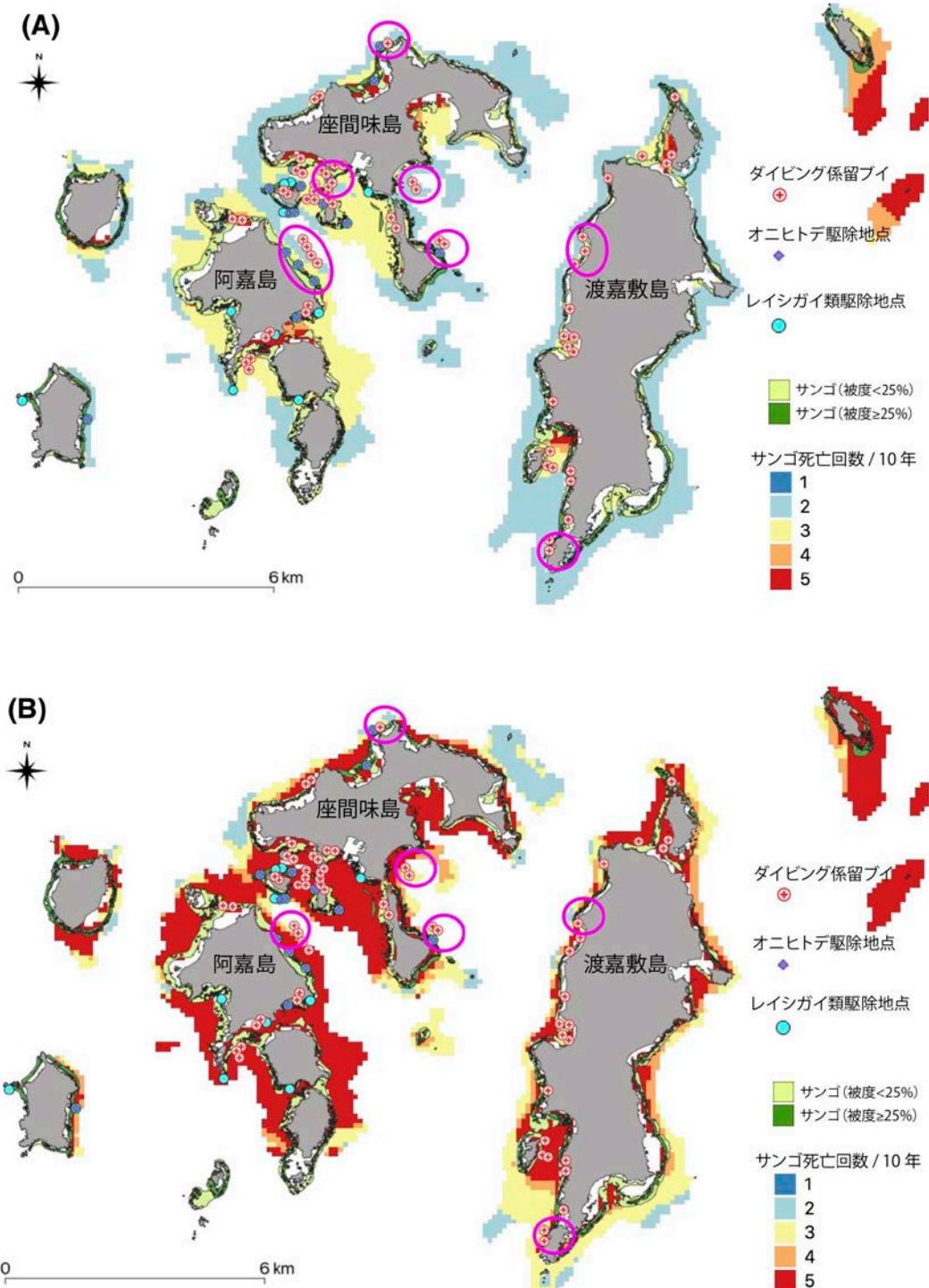


図 3.3-1. 慶良間諸島中心部における(A) +1.5°C、および(B) +2.0°C 昇温シナリオ下のサンゴ死亡予測に対するサンゴ被度、ダイビング利用及びサンゴ保全活動に適した場所の提案。

ピンク色の円は、現状のダイビング利用及びサンゴ保全活動が行われているサンゴ被度の高い場所のうち、予測されるサンゴの死亡が比較的生じにくい場所を示している。

3.4 現地関係者との情報交換会

平成 29 年度および 30 年度の本業務にて得られた気候変動が慶良間諸島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(付録 1)、慶良間諸島国立公園現地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。

説明素材の作成に際しては、国立公園などの保護区における適応策検討のフローチャートを示し、保全対象の決定や基盤情報の収集・整備、保全対象の将来の分布・影響予測など何が必要な情報かを示した上で、取り得る適応策のオプションを検討する手続きについて説明した。また、現在利用可能な情報・技術による保全対象の将来予測では、保全対象の利用にとって適した空間的解像度（海中で見渡せる 100 m 程度の範囲）での予測には限度があり不確実性を伴うことを説明した。

慶良間諸島のサンゴ利用・保全の現地関係者の活動拠点は、おもに座間味島、阿嘉島、および渡嘉敷島などの慶良間諸島中心部、おもに那覇市からアクセスする慶良間諸島の外海から東部（チービシなど）とに大別される。このため、現地関係者への説明とアンケート調査は 2 回に分けて行い、座間味島、阿嘉島、および渡嘉敷島の現地関係者へは、2019 年 2 月 8 日に阿嘉島のさんごゆんたく館（慶良間諸島国立公園ビジターセンター）で開催の「慶良間諸島国立公園のサンゴ礁の保全・再生に係る情報連絡会（第 5 回）」、那覇市内を拠点とする現地関係者へは、2 月 13 日に那覇市内の NPO 法人美ら海振興会の理事会に付随して時間を頂き同会の構成員を対象に行った。慶良間諸島における活動は多岐にわたり多くの島々と拠点にわたっているため、いずれも現地関係者が一堂に会する数少ない機会である。付録 1 のスライドを用いて本業務結果を説明するとともに、説明に対するアンケートを実施、説明会当日にその場で回答頂き回収した（付録 2）。

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、今回の報告内容について、慶良間諸島における気候変動への対策について、個人属性、の 3 部から構成されている。まず、問 1 の慶良間諸島における気候変動の影響については、阿嘉島での報告会の参加者（以下、慶良間）、那覇市での報告会の参加者（以下、沖縄本島）ともに関心が高いことが分かった。問 2 および問 3 の報告内容の中でとくに印象に残った内容、より詳しく知りたい内容としては、いずれの報告会でも、「サンゴの白化と死亡の予測」と「中深度のサンゴ群集」がとくに多く選ばれた。一方、慶良間では重点保全地域の絞り込みは関心を集めたが、沖縄本島では誰もこの選択肢を選ばなかった。問 4～6 の、報告内容が役に立つか、活動にどの程度関係するか、また報告内容への満足度は全般的に高いスコアを示したが、慶良間よりも沖縄本島の方が低い傾向にあった。また問 7 の「サンゴ保全のための望ましい取り組み」についての回答は多くの項目に分散したが、最多回答はサンゴ捕食者の「オニヒトデ・巻貝類」の駆除と共に通していたが、慶良間ではこれと並んで「観光利用制限」が最多だった一方、沖縄本島で「観光利用制限」を挙げた参加者は少なく、沖縄本島での次点は「使い捨てプラス

チック製品の規制」となっていた。問8の「とくに保全したい場所」においても、慶良間の参加者は慶良間諸島中心部、沖縄本島は慶良間諸島の外海や東部を挙げる回答が目立った。

慶良間と沖縄本島に共通して現地関係者のサンゴ保全と気候変動および適応策への関心は高いことが分かり、本事業の報告・説明に対しても一定の評価が得られた。また現地を訪れる研究者への協力や情報交換、講演などを通じて予備知識を備えている方も多いことが分かった。サンゴ保全の取り組みの回答が分散したことに関しては、“現場の人間が何をやればサンゴ保全につながるのか、どれくらい効果があるのか分からぬ”、といった意見も得られ、保全の取り組みの決め手がないという問題点も見えた。その他、今回の事業報告ではサンゴの種苗生産については触れなかったが、慶良間の情報交換会の中で現地関係者から報告があり関心が高いことがうかがえた。一方で慶良間と沖縄本島の間での意見の相違の多くは、利用する海域の違いが主な理由と考えられる。とくに慶良間諸島の内海域に設置されているダイビング係留ブイは座間味島、阿嘉島、渡嘉敷島を拠点とする現地関係者が管理・利用しており、沖縄本島の現地関係者はブイを使用せずにダイビング利用を行っていることが分かった。今後は将来予測の精度を向上させると共に、利用する海域と利用様式に応じた適応策の検討を進める必要があるだろう。



図 3.4-1. 現地説明会の様子（A・B：座間味村阿嘉島のさんごゆんたく館、C：那霸市内のNPO法人美ら海振興会）

3.5まとめと今後の課題

平成29年度業務にて、慶良間諸島国立公園の地元関係者へのヒアリングや基盤情報の収集および文献調査を通じ、気候変動下における生物多様性保全および生態系サービスの観点から重要となるサンゴ群集（評価対象）を決定した。平成30年度業務においては、他の国立公園海域にとってのサンゴ避難地としての価値（慶良間諸島から他の海域へのサンゴ幼生供給）（Nishikawa et al., 2003）、慶良間諸島国立公園の周縁部のサンゴ避難地（国立公園範囲外の水深30m以深の中深度サンゴ群集）（Hinderstein et al., 2010）を解析・調査しつつ、慶良間諸島の将来のサンゴ白化予測や適応策の検討を行った。

サンゴの白化に影響する海水温や流速といった海洋環境に関する数値データは、リモートセンシング観測等による 1 km の空間解像度が一般に得られる限界精度であるが、本年度は現地観測により取得した水温・流速などの長期観測データを用いて物理環境モデルを精度向上し、100 m という高い空間解像度の海水温・流速出力値を得ることができた。さらにこの出力値をベースとすることで、100 m 解像度のサンゴ白化・死亡の推定・予測モデルを構築した。これは現状の公表学術論文によって達成されている世界最高分解能である 1 km (Kumagai et al., 2018) を大きく上回る挑戦であったが、予測精度の向上のためにには物理環境とサンゴの白化記録の双方においてデータ数を増やし、また未解明であるサンゴの高温適応のポテンシャル (Brown et al., 2008) についても研究を進める必要がある。

慶良間諸島の気候変動の避難地としての価値に関して、海流流動分散シミュレーションにより、慶良間諸島から他の海域へのサンゴ幼生供給のポテンシャルが高いことが示された。これは先行研究 (木村ら, 1992 ; 瀧岡ら, 2002 ; Nishikawa et al., 2003) を指示する結果だが、反対の見方もあり (Shinzato et al., 2015)、今後より精度の高いシミュレーションによる再検討が必要だろう。また、サンゴの遺伝的解析による他の海域への幼生供給ポテンシャルの解析についても、沖縄本島の報告会参加者の間で関心が持たれていた研究である。

慶良間諸島内の気候変動の避難地候補として、水深 30 m 以深の中深度サンゴ群集の探索を行い、多数の生息地を発見することに成功した。実際に浅場のサンゴと種が共通するか、また浅場と遺伝的交流があるかなど、研究上の課題は残るもの、現地報告会でも最も興味を集めた研究課題のひとつである。

現地報告会における現地関係者への説明では、報告内容の理解は高くまた気候変動及び適応策への高い関心あることが分かった。しかし、現地の関係者が具体的に何をやればサンゴ保全につながるのか、効果的な手段や効果の評価の提示、利用拠点による利用・管理海域の違いに対する対処など今後の課題が示唆された。将来的に、利用・管理や海洋環境の基盤情報の情報収集を進めつつ、サンゴ白化・死亡の予測モデルなどについて、より高度化した解析によって予測を行い、適応策を再検討するための情報として提供・利用する必要があるだろう。

4. 大雪山国立公園における適応策実装に向けた予測結果の精緻化

4.1 概要

平成 28 年度から本業務のモデル保護区としている大雪山国立公園について、昨年度実施した将来予測結果について、登山道等の GIS データを活用し、保全活動のためアクセスが可能な場所の抽出と現地確認を行い、高山植生の保全のための対策が実施可能かつ優先的に行うべき場所をより詳細に予測した。

平成 28 年・29 年度に実施した現地関係者へのヒアリングを通じて、気候変動による分布域の縮小などの影響が懸念される高山植生や、逆に高山植生群落へ分布域が拡大しつつあるチシマザサなど生物多様性保全の観点からの評価対象を明らかにし、分布推定モデルによる将来予測を行ってきた。一方、大雪山国立公園における高山植生は生物多様性の保全対象であることに加え、高山植生の開花時期にはいわゆる「お花畠」として重要な観光資源ともなっている。そこで高山植物の持つ観光資源としての価値も考慮した気候変動適応策の策定に資するため、本年度は同国立公園の来訪者に対してアンケート調査を行い、訪問動機や公園内に生育する代表的な高山植生に対する来訪者の選好を明らかにした。この調査結果を反映して将来予測の対象となる植生群落の構成を見直し、将来気候シナリオによる分布推定を行った。

更に、高山植生の保全対策が実施可能かつ優先的に行うべき場所を選択した。対策場所選定にあたり、まず国立公園の重要な機能である生物多様性の保全と観光利用とを両立させるため、生物多様性の保全対策を行う場所と、観光利用のための植生維持を行う場所とを分け、それぞれ考慮すべき項目を整理した。それを踏まえて保全対策を行う場所の選択と優先順について解析し、現地調査により妥当性を確認した。

4.2 大雪山国立公園への訪問目的および高山植物の選好に関するアンケート調査

4.2.1 目的

本調査の目的は、高山植物の持つ観光資源としての価値を考慮した気候変動適応策の策定に資するため、気候変動によって消失、減少または生息域が変化しうる植物種に着目し、各種に対する観光客や地域住民の選好を明らかにすることである。

4.2.2 アンケート調査の設計

本調査では、大雪山国立公園を訪れる観光客や地域住民（以下、訪問者とする）の高山植物に対する選好を解明することを目的として、調査票の設計を行い、以下に示すように大雪山国立公園（旭岳姿見展望台、ロープウェイ旭岳姿見駅）においてアンケート調査を実施した。アンケート調査に用いた調査票は、全 6 ページ、計 21 間の設問から構成されている（付録 3）。具体的な調査票の設計は、はじめに本調査の簡単な導入として、大雪山国立公園への訪問動機や観光形態に関する設問群（設問 1-4）、高山植物や雪渓に対する選好を把握するための設問群（設問 5-10）、個人属性を把握するための設問群（設問 13-21）の 4 つの設問群からなる。これらの設問は、全て観光や自然環境保全に関する先行研究をもとに作成した。そのうち本報告書では設問 3 と 4（訪問動機に関する設問）、設問 7（訪問者の高山植物に対する選好を調べる設問：写真で示された高山植物各種について、それぞれ見たいと思う種に丸をつけてもらう）、設問 16, 17, 19, 21（個人属性に関する設問）に対する回答について報告する。設問 7 に使用した高山植物の写真は、大雪山の生育環境（雪田草原群落、風衝草原群落、高山荒原群落、高山湿原群落）を反映するような 18 種に加え、高山低木群落を代表するハイマツ、チシマザサを合わせた計 20 種とした。

4.2.3 解析方法

設問 3, 7, 16, 17, 19, 21 について、回収できた調査票から集計を行った。特に、設問 7 においては、アンケート調査に用いられた高山植物について、どのような形や色などの特徴（形質）が訪問者に好まれているかを統計解析した。

4.2.4 サンプリング

本調査では、大雪山国立公園の最高峰である旭岳の旭岳姿見展望台とロープウェイ旭岳姿見駅において、2018 年 8 月 4 日から 6 日、11 日から 13 日の 6 日間にわたり調査票を配布した。調査票の配布対象者は、観光客、地域住民を問わず、旭岳姿見駅に訪問した全ての訪問者とし、散策路を歩かない訪問者も対象とした。合計 1201 部の調査票を配布し、郵送にて 451 部の調査票が回収できた（回収率 37.6%）。なお、調査票の回収については、2018 年 12 月 28 日までに国立環境研究所に郵送された調査票のみを有効な回答とし、それ以降に郵

送された調査票は集計から除外した。

4.2.5 結果・考察

(1) 回答者の個人属性および公園への訪問動機

本項では、回収された 451 通の回答を元に、訪問者の個人属性および大雪山国立公園への訪問動機について報告する。

最初に、回答者の個人属性についてまとめる。男女比は、男性が 197 名 (50.1%)、女性 196 名 (49.9%) と男女均等であった。年齢構成に関しては、男女共に 50 代が最も多く、次いで 60 代、40 代という結果であった。また、回答者の約半数に当たる 212 人 (48.8%) が北海道出身者であった。回答者の年収に関しては、400 万円未満が最多であり、回答者の最終学歴に関しては、大学 4 年卒が最多という結果となった。(表 4.2-1)。

表 4.2-1 回答者の個人属性について

() は回答者数 (n) を示す

年齢	10-20 代 (25), 30 代 (51), 40 代 (103), 50 代 (116), 60 代 (104), 70 代以上 (34), NA (17)
性別	男性 (197), 女性 (196), NA/その他 (58)
年収(万円)	-400 (95), 401-600 (65), 601-800 (65), 801-1000 (53), 1001-1400 (60), 1401- (39)
最終学歴	中学卒業 (5), 高校卒業 (86), 専門学校卒業 (34), 短期大学卒業 (39), 大学卒業 (220), 大学院卒業(修士号) (28), 大学院卒業(博士号) (13)

最後に、大雪山国立公園への訪問動機についての結果を図 4.2-1 に示す。なお、訪問動機に関する設問はすべて、7 段階での回答形式 (1:全くそう思わない, 2:そう思わない, 3:どちらかというとそう思わない, 4:どちらとも言えない, 5:どちらかというそう思う, 6:そう思う, 7:とてもそう思う) とした。大雪山国立公園への訪問動機に関しては、「自然の美しさを眺めるため」という目的が最も多く選択され (平均=6.66, 標準偏差=1.04)、次いで「自然の中で高山植物などの野生の植物を見る」という目的が多い結果 (平均=6.05, 標準偏差=1.37) となった。一方、「自分の体力や技術を試す」という目的は訪問動機としての評価が最も低い結果 (平均=4.62, 標準偏差=1.87) となった。これらの結果から、訪問者の多くが、大雪山国立公園に豊かな自然やその風景、高山植物をはじめとする植物種を目的に訪問していることがわかった。

訪問動機

当てはまる番号（1-7）で回答してもらった平均値を示す
(1=全くそう思わない, 4=どちらともいえない, 7=とてもそう思う)

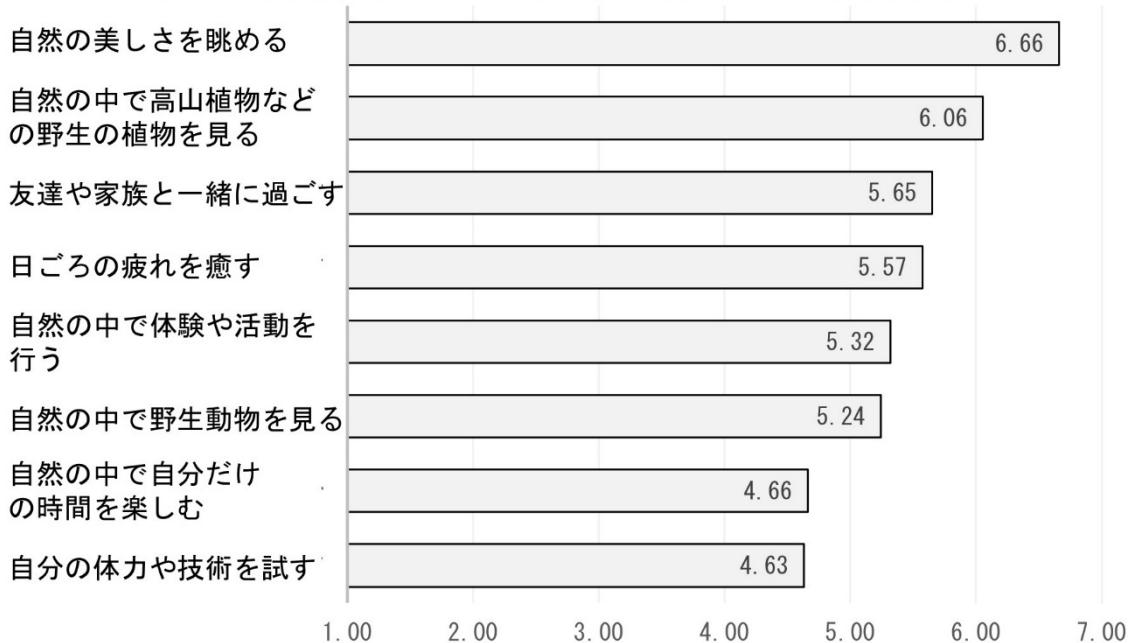


図 4.2-1 回答者の訪問動機に関する結果

(2) 高山植物に対する回答者の選好

図 4.2-1 から、訪問者の多くが大雪山国立公園に豊かな自然やその風景、高山植物をはじめとする植物種を目的に訪れていることがわかった。そこで、本項では、数ある高山植物の中で、訪問者に特に好まれており、観光資源としての価値が高いと考えられる植物種に関する分析とその結果を示す。回収された 451 通の回答から問 7 に関する回答が欠損していた 9 通を除いた 442 通の回答を用いて分析を行った。分析の結果、本調査で扱った植物 20 種の選好順序は、最も高い方からチングルマ、リシリリンドウ、エゾコザクラとなり、最も低い方からミネハリイ、チシマザサ、ハイマツとなった（図 4.2-2）。

高山植物種に対して、大雪山国立公園への訪問回数や個人属性が選好に与える影響を解析したところ、過去に大雪山国立公園を訪れた経験のある訪問者（リピーター）は、今回初めて大雪山国立公園を訪れた訪問者よりもチングルマ・コマクサをより好む傾向があった。また、男性よりも女性の方が、若年層より高年層の方が、全体的な植物への選好が高いという傾向が得られた。

次に、本調査で扱った植物 20 種の写真から、訪問者の選好が高い高山植物の特徴を一般化するために、植物を花の形質（写真で花がついている 15 種）と全体の形質（20 種）にわけ、それぞれ図鑑（大井・北川, 1992）から各形質の特徴を抜き出し、一般化線形モ

デル (GLM) の二項分布により解析を行った。その結果、花の形質においては、花序は扁平で、花数は少なく、色はピンク>紫>白≥黄色の植物において選好が高くなることがわかった。また、全体の形質においては、葉は光沢をもち、葉のサイズは小さく、植物高は低く、鋸歯が大きい植物が、訪問者にとってより好まれる傾向が得られた。

以上の結果から、訪問者は高山植物の中でも特にチングルマを高く評価しており、特に重要な観光資源であることが伺える。チングルマは東日本の高山帯に広く生育しており大雪山系の固有種ではないが、大雪山の登山道沿いには大群落を形成している。本研究の結果から、チングルマは大雪山系のお花畠のイメージを代表しているといえる。また、チングルマはリピーターの確保など国立公園における持続的な観光を考える上でも重要な種であることもわかった。一方、チシマザサやハイマツが低評価であったが、これらの種は高山植物の生育環境への拡大が懸念されており、拡大を抑えた高山お花畠の維持が必要といえる。また、訪問者に好まれうる高山植物の特徴と、GLM による形質の選好値から順位付けの結果より、背丈が低く・花数が少ないなどの特徴を選好していたことから、矮小な高山植物が訪問者の興味を引いていることが示唆された。



図 4.2-2 20 種の各高山植物に対する回答者の選好

- 1)円グラフの橙色の部分は各植物種を見たいと回答した回答者の割合を示している
- 2)植物名の後に示されている肩掛け数字は、それぞれの植生区分を表している。(1 : 雪田草原, 2 : 風衝草原, 3 : 荒原植生, 4 : 高山湿原, 5 : 高山低木群落, 6 : ササ群落)

4.3 高山植生の将来分布推定

4.3.1 目的

大雪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将来予測モデルの高度化を行う。

4.3.2 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。昨年度業務では、現在の植生分布情報として自然環境保全基礎調査の5万分の1植生図（第4-5回調査）のデータを使用したが、最新のデータである2.5万分の1植生図（第6-7回調査）のデータに基づいてモデルの再構築を行った。また、分析対象とする植生区分、説明変数として用いる地質区分についても見直しを行った。

（1）データ

自然環境保全基礎調査の植生調査、2.5万分の1植生図（第6-7回調査）のデータに基づき、各3次メッシュ内の雪田草原、高山低木群落、風衝草原、荒原植生、ササ群落、亜高山帯森林植生の3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。

それぞれの従属変数は、自然環境保全基礎調査の植生調査データに基づき、表4.3-1のように群落をまとめた。第6-7回植生調査では、一部の凡例が第4-5回の植生調査と異なることも踏まえ、より適切なものとなるように群落の組成の見直しを行った。昨年度は高山ハイデおよび風衝草原、もしくは雪田草原に含んでいたいくつかの群落について、生息地特性が異なると考えられたことから、新たに荒原植生の区分を設けた。亜高山帯森林植生についても、生息地が異なると考えられる（低標高域に拡がっている）エゾマツトドマツ群集を抜くなどして、より生態的にまとめた内容となるように見直しをした。

説明変数には、気象条件、地形、地質に関する各変数を用いた。気象条件に関しては、昨年度の本業務同様夏季（6-8月）の平均気温、積雪期間、年降雨量を説明変数に含めた。地形についても昨年度同様に、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、昨年度は崩壊のしやすさの観点から地質の脆弱性を説明変数として選定したが、説明変数としての寄与が非常に低かった。そのため、見直しを行い、土壤の発達度合の観点から説明変数の選定を行った。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に基づき、大雪国立公園内に含まれる地質凡例のうち、特に地質年代の新しい火山性の地質を、土壤が未発達で植生が成長しにくい地質として抽出した。具体的には表4.3-2に挙げた6凡例を抽出し、これらの合計面積が3次メッシュ内に占める

割合を説明変数とした。

表 4.3-1 分布推定モデルの従属変数として用いた群落の組成

従属変数名	含まれる群落
雪田草原	イワイチョウイトキンスゲ群落、エゾコザクラ群落、エゾツガザクラーアオノツガザクラ群落、エゾツガザクラーチングルマ群落、シナノキンバイーミヤマキンポウゲ群団、ツルコケモモーミズゴケクラス、雪田草原
高山低木群落	ウラジロナナカマド群落、エゾメシダーウコンウツギ群団、コケモモーハイマツ群集、ダケカンバーハイマツ群落、ハイマツ群落、ミヤマハンノキ群落（北海道）、ヤナギ低木群落（IV）
風衝草原	ウラシマツツジークロマメノキ群集、エゾマメヤナギーエゾオヤマノエンドウ群集・コマクサーイワツメクサクラス複合体、コマクサーイワツメクサクラス、コメバツガザクラーミネズオウ群集、コメバツガザクラーミネズオウ群集・コマクサーイワツメクサクラス複合体、高山ハイデ及び風衝草原、ミヤマクロスグーシラネニンジン群落・コメバツガザクラーミネズオウ群集複合体
荒原植生	火山荒原植生、岩壁植生、高山岩塊地植生、自然裸地、雪田荒原、多年性雪渓、風穴植生、噴気孔原植生、硫氣孔原植生
ササ群落	ササシラカンバ群落、ササダケカンバ群落（北海道）、ササ群落（II）、ササ群落（III）、ササ群落（V）、ミヤコザサ群落
亜高山帯森林植生	アカエゾマツ群集、ケショウヤナギ群落、ダケカンバーエゾマツ群落、ダケカンバーエゾマツ群落（風倒跡地自然再生林）、ダケカンバ群落（II）、ダケカンバ群落（III）、ダケカンバ群落（V）、ハンノキーヤチダモ群集、ハンノキ群落（IV）、ヤナギ高木群落（IV）、ヤマハンノキ群落

表 4.3-2 大雪山国立公園内に含まれる地質年代の新しい火山性の地質凡例

シームレス地質図凡例	地質年代
完新世(H)の非アルカリ苦鉄質火山岩類	約 1 万 8000 年前～現在
後期更新世(Q3)の火山岩類(非アルカリ火碎流)	約 15 万年前～約 1 万 8000 年前
後期更新世(Q3)の非アルカリ苦鉄質火山岩類	約 15 万年前～約 1 万 8000 年前
中-後期中新世(N2)の苦鉄質深成岩類	約 1500 万年前～700 万年前
中期更新世(Q2)の非アルカリの苦鉄質火山岩類	約 70 万年前～15 万年前
中期中新世-後期中新世(N2)の非アルカリ苦鉄質火山岩	約 1500 万年前～700 万年前

夏季の平均気温、地形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。

(2) 分布推定モデル

分布推定モデルの手法の違いによる不確実性の大きさを評価するため、昨年度業務同様に、複数の分布推定モデルを用いて将来予測を行った。昨年度同様に、一般化線形モデル (GLM)、一般化加法モデル (GAM)、RandomForest (RF)、Boosted Regression Trees (BRT)、を用いた。ただし、モデルの挙動の安定性の観点から見直しを行い、ポアソン分布を誤差分布とした GLM は使用しないこととし、GLM の誤差分布には tobit モデル、GAM はベータ分布および tobit モデルを用いた。

GLM および GAM 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 については、昨年度同様にクロスバリデーションに基づいてパラメータのチューニングを行った。

温室効果ガスの排出量の不確実性についても、昨年度同様に、IPCC 第 5 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 RCP8.5 を用いた。

気候変動予測については、昨年度業務と同じく、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 GCM (MIROC5、MRI-CGCM3、IPSL-CM5A-LR) を A-PLAT から入手し、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。

ただし、将来予測に際しては、モデル構築時の説明変数の値の範囲を大きく超えた外挿には非常に注意する必要がある (Elith et al., 2011)。これは、外挿範囲においては、同じ関数型の当てはめが適切である保証がないためである。例えば、現在の気候値の範囲内であれば、気温に比例して成長速度が高くなる、右肩上がりの直線的な応答が得られたとしても、現在では観測されないような高温域でも無制限に成長速度が増加するとは考えにくく、ある程度以上の高温域では増加が頭打ちになると考えるのが妥当である。このような考え方に基づいて外挿を抑制する処理として、Clamping がある (Elith et al., 2010)。Clamping 処理では、予測時に用いる説明変数の値が、モデル構築時の説明変数の最高値を超える場合には、構築時の最高値に対応した応答変数の値を予測値として用いる。つまり、構築時の最高値で予測値を頭打ちとするのである。最低値を下回る場合も同様に、最低値に対応した応答変数の予測値を下限として用いる。本業務においても、上記の考え方に基づいて、Clamping 処理を行った。

上記での 2 つのシナリオ、2 時期、3 つの GCM、5 つの分布推定モデルに基づいて 60 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。

4.3.3 結果

分布推定の基となる植生の分布データを、第4-5回植生調査のデータから、最新の第6-7回植生調査のデータに変えて、推定されたモデルの構造や将来予測について、大きな傾向に変化はなかった。

説明変数の寄与についても昨年度同様に、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、地質年代、地形の寄与は限定的であった（図4.3-1）。

モデルの分布推定精度については、高山植生についてはもともと精度が十分高かったためあまり改善は見られなかつたが（図4.3-2）、その中でも風衝草原については、モデルのクロスバリデーション推定値と実測値の相関係数が昨年度業務では平均で $r=0.68$ ($r^2=0.47$) であったのが、今年度業務では平均で $r=0.80$ ($r^2=0.64$) と、やや改善が見られた。また、ササについては昨年度業務では平均 $r=0.57$ ($r^2=0.32$) であったのが、今年度業務では 0.69 ($r^2=0.48$) に、亜高山帯森林植生についても同様に $r=0.60$ ($r^2=0.36$) から $r=0.81$ ($r^2=0.66$) に改善が見られた。新たに分離した荒原植生については、現在の分布メッシュが少ないため、分布推定モデルの精度は低く、 $r=0.46$ ($r^2=0.21$) であった。これらのモデルの精度の向上がみられたのは、植生調査のデータの精度が上がったことに加え、風衝草原および亜高山帯森林植生については、より生態的にまとまったものになるように群落の組成を見直したことの効果があったと考えられる。また、亜高山帯森林植生にはダケカンバ林が含まれているが、第4-5回植生調査では伐採跡地あった場所が遷移の進行により第6-7回調査データではダケカンバ林になっている例が見られ、植生遷移に伴って人為影響が減少したことでもモデルの精度向上に寄与したと考えられる。

将来予測に関しては、昨年度と共通する傾向として、RCP2.6での2046年から2050年および2096年から2100年の気候条件において、雪田草原、風衝草原、高山低木群落については、分布面積はかなり減少するものの、比較的広い範囲に生育可能な場所が残ると予測された（図4.3-3(a), (b), (c)）。また、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場所が残るもの、風衝草原は生育可能な場所がほとんどなく、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も、昨年度同様であった。特に、風衝草原のRCP8.5での2100年の減少傾向は、昨年度より更に顕著になっているが、これは、荒原植生の区分を設けたことで、風衝草原の面積のかなり多い割合が荒原植生へと再区分された影響と考えられる。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（図4.3-3(e)）、亜高山帯森林植生が高山帯に侵入するという推定結果（図4.3-3(f)）も昨年度同様である。しかし、RCP8.5の2100年における亜高山帯森林植生の合計面積は2050年に比べて減少する結果となった（図4.3-4(b)）。これも、亜高山帯森林植生の区分を見直し、トドマツなど、より低標高域の群落を含まない区分とした影響と考えられる。

亜高山帯森林植生の RCP8.5 での 2100 年の分布面積の予測値は減少した（より高標高域に限られるようになった）ものの、より低標高域にはトドマツ等で構成される別の森林植生が侵入してくると考えられ、高山植生が森林に置き換わるという予測の大きな傾向には変わりないと考えられる。

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合計面積の違いは比較的小さかった（図 4.3-4）。

4.3.4 考察

分布推定の元となる植生図データを最新の第 6-7 回植生調査のデータに更新しても結果に大きな変化がなかったことから、元の分布情報に起因する予測の不確実性は小さいと考えられた。その一方で、一部の植生タイプについてはデータの更新や構成する群落の見直しによってモデルの精度の向上が見られ、より信頼性の高い将来予測が可能となったと言える。

しかし、積雪量の将来予測値の空間解像度不足によるマイクロレフュージアの見落としの可能性や、将来シナリオ間での結果の大きな違い、移動分散制限や種間競争に起因する植生変化の進行の時間遅れの可能性などは引き続き課題である。積雪を始めとした気候データのダウンスケーリングと、移動分散制限や種間競争を考慮した解析を可能とするようなデータ取得の努力が引き続き必要とされている。また、適応策の検討に際しては、RCP 間の結果の大きな違いを考慮し、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が引き続き重要であると考えられる。適応策の実施場所の候補地については、次節で検討を行う。

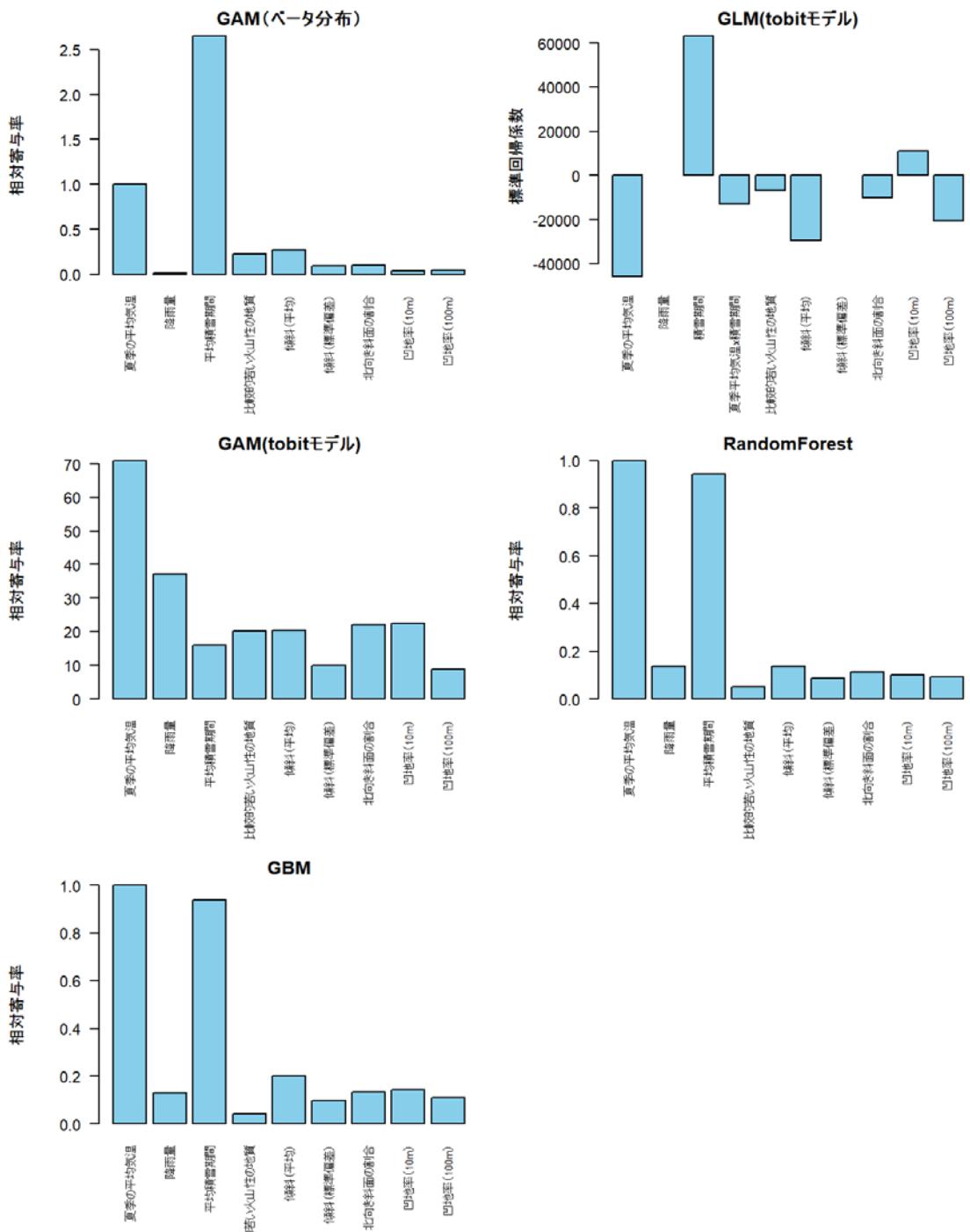


図 4.3-1(a) 各統計モデルにおいて、雪田草原の分布に影響を与えていたる要因の寄与率

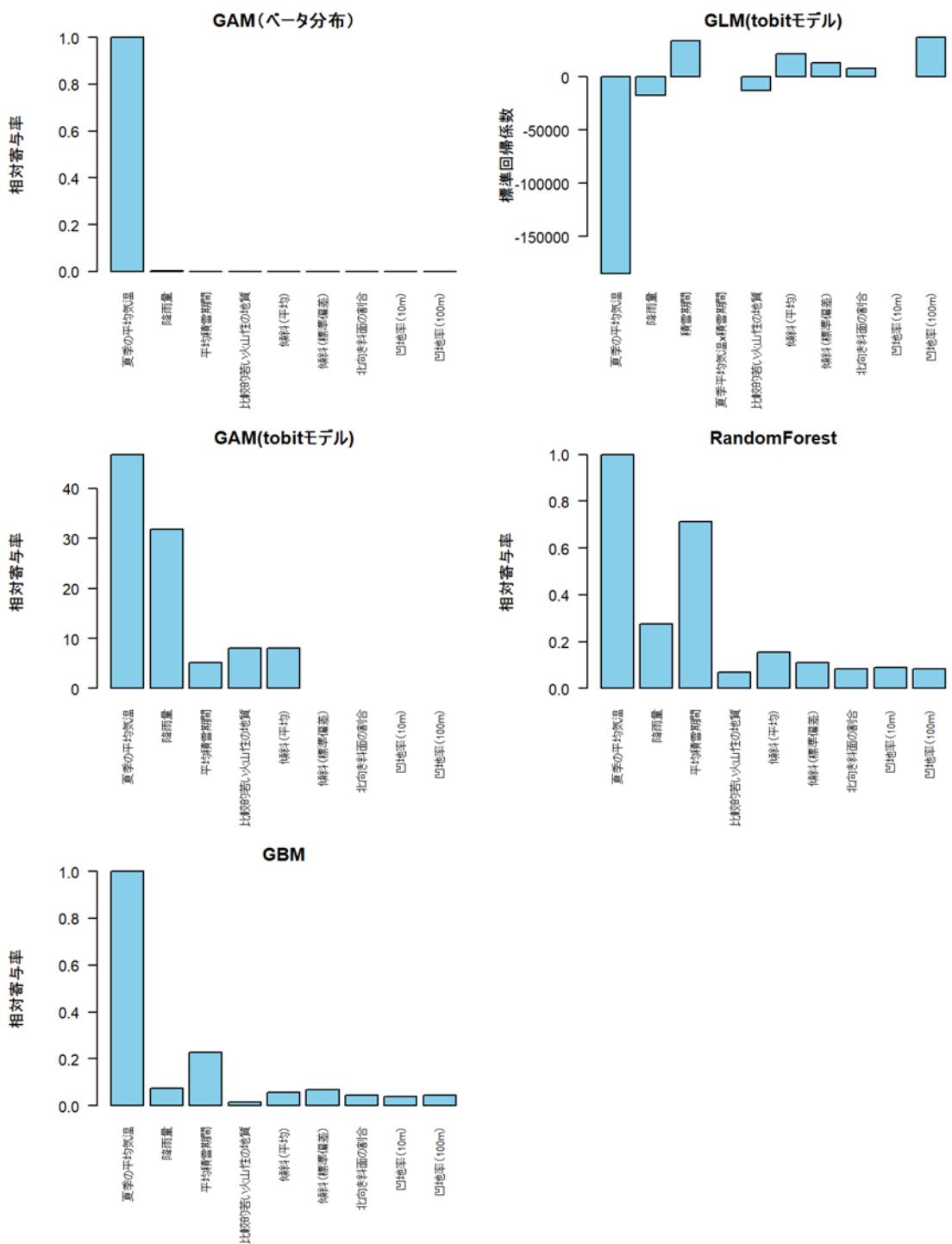


図 4.3-1(b) 各統計モデルにおいて、風衝草原の分布に影響を与えている要因の寄与率

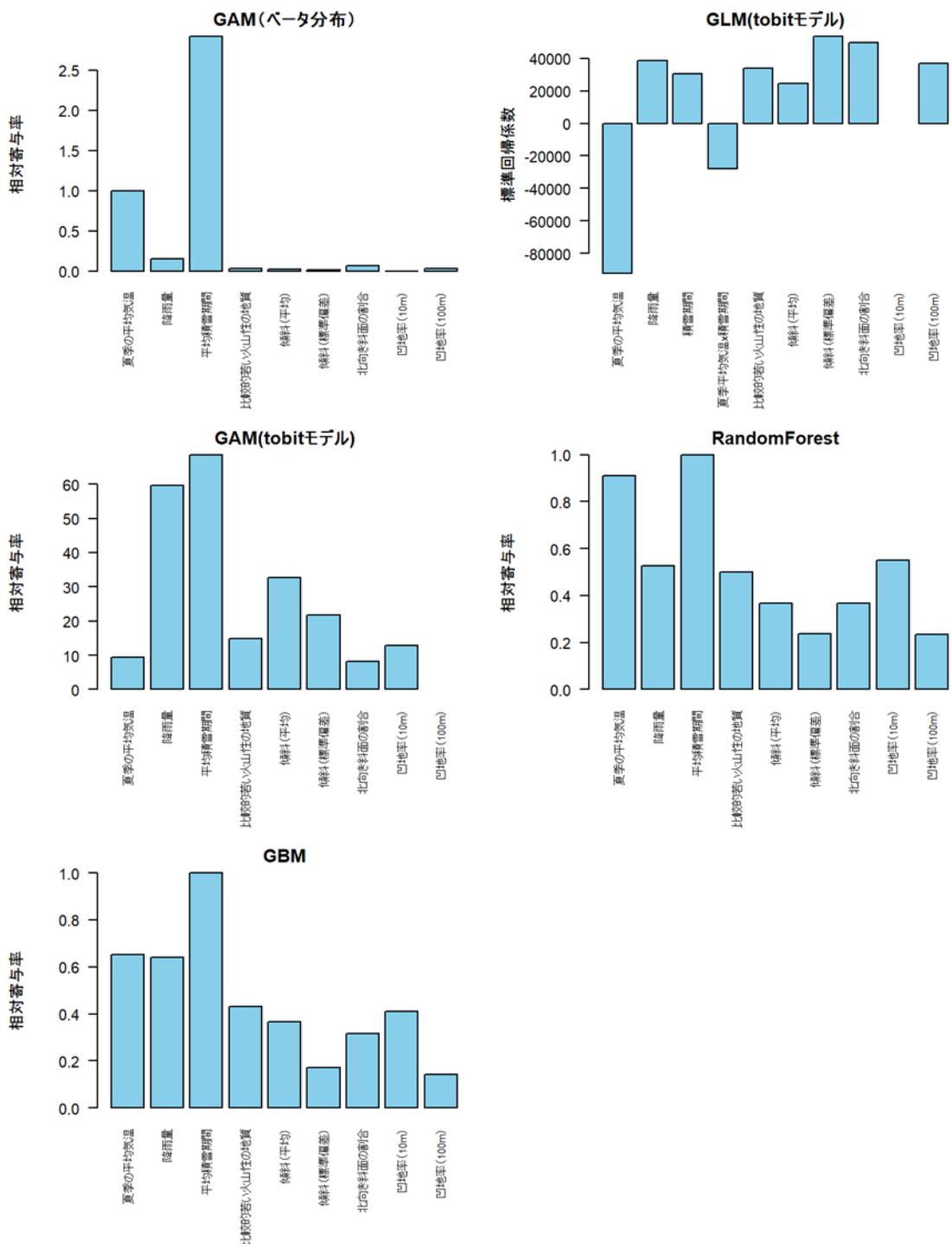


図 4.3-1(c) 各統計モデルにおいて、荒原植生の分布に影響を与えてる要因の寄与率

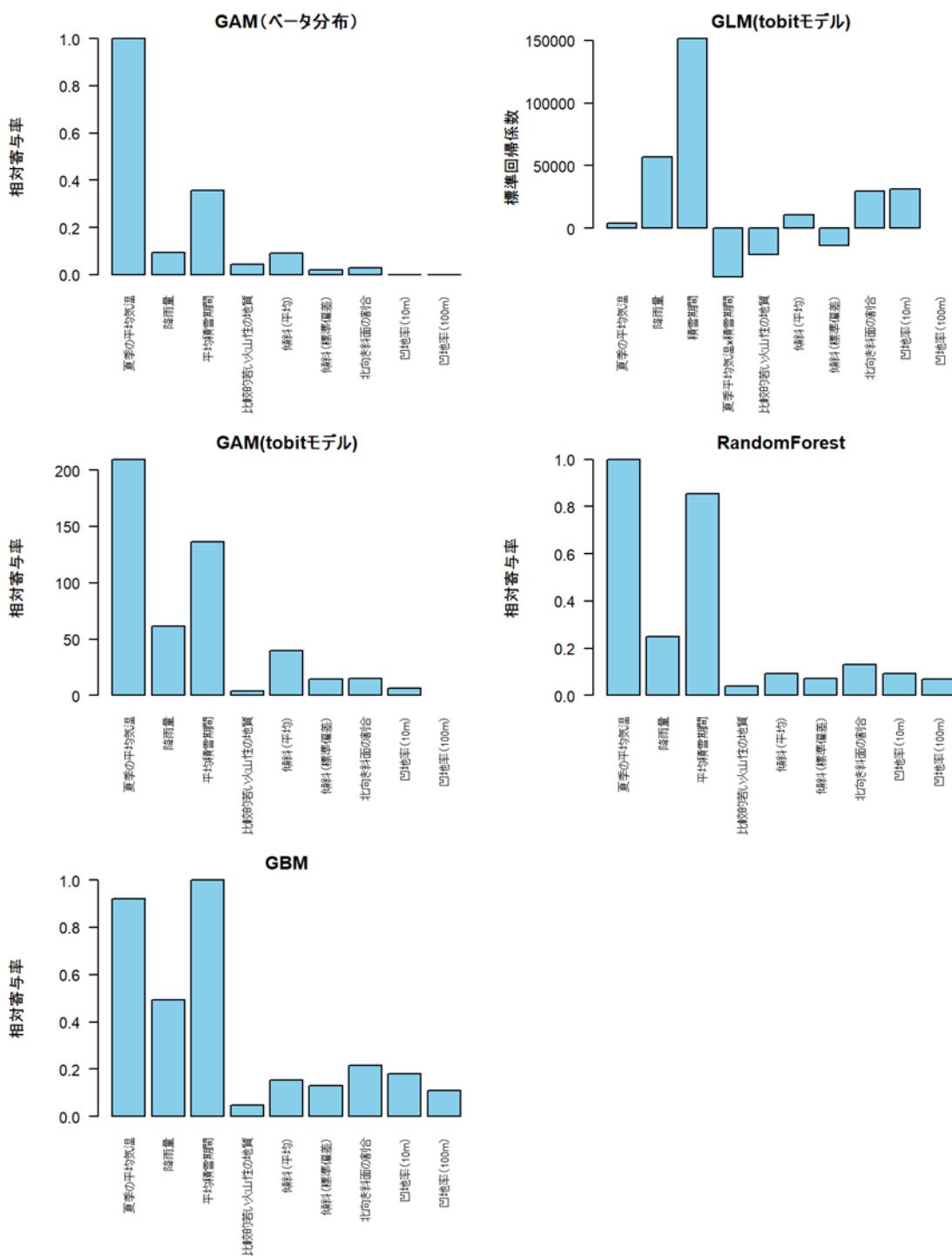


図 4.3-1(c) 各統計モデルにおいて、高山低木群落の分布に影響を与えて いる要因の寄与率

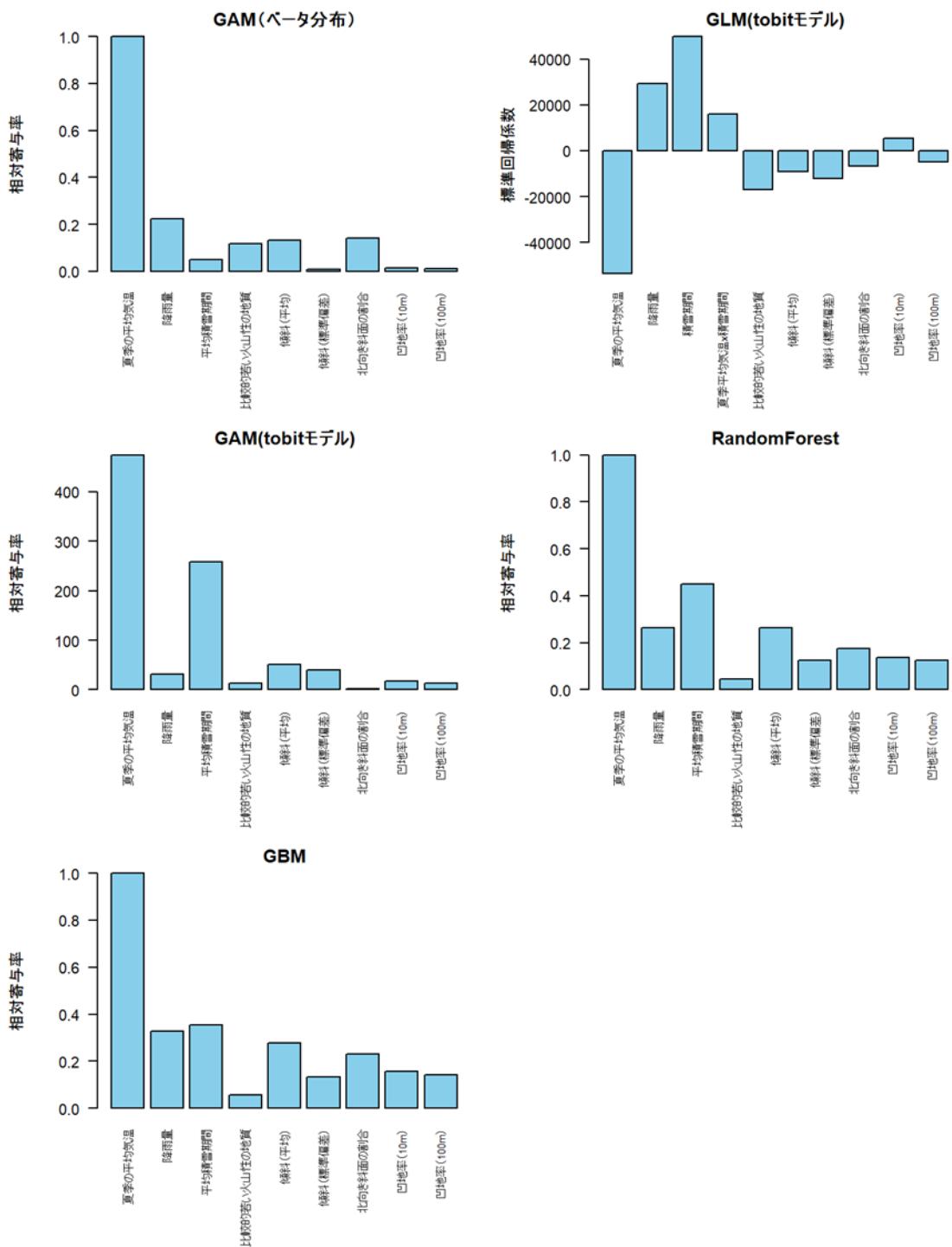


図 4.3-1(d) 各統計モデルにおいて、ササ群落の分布に影響を与えてる要因の寄与率

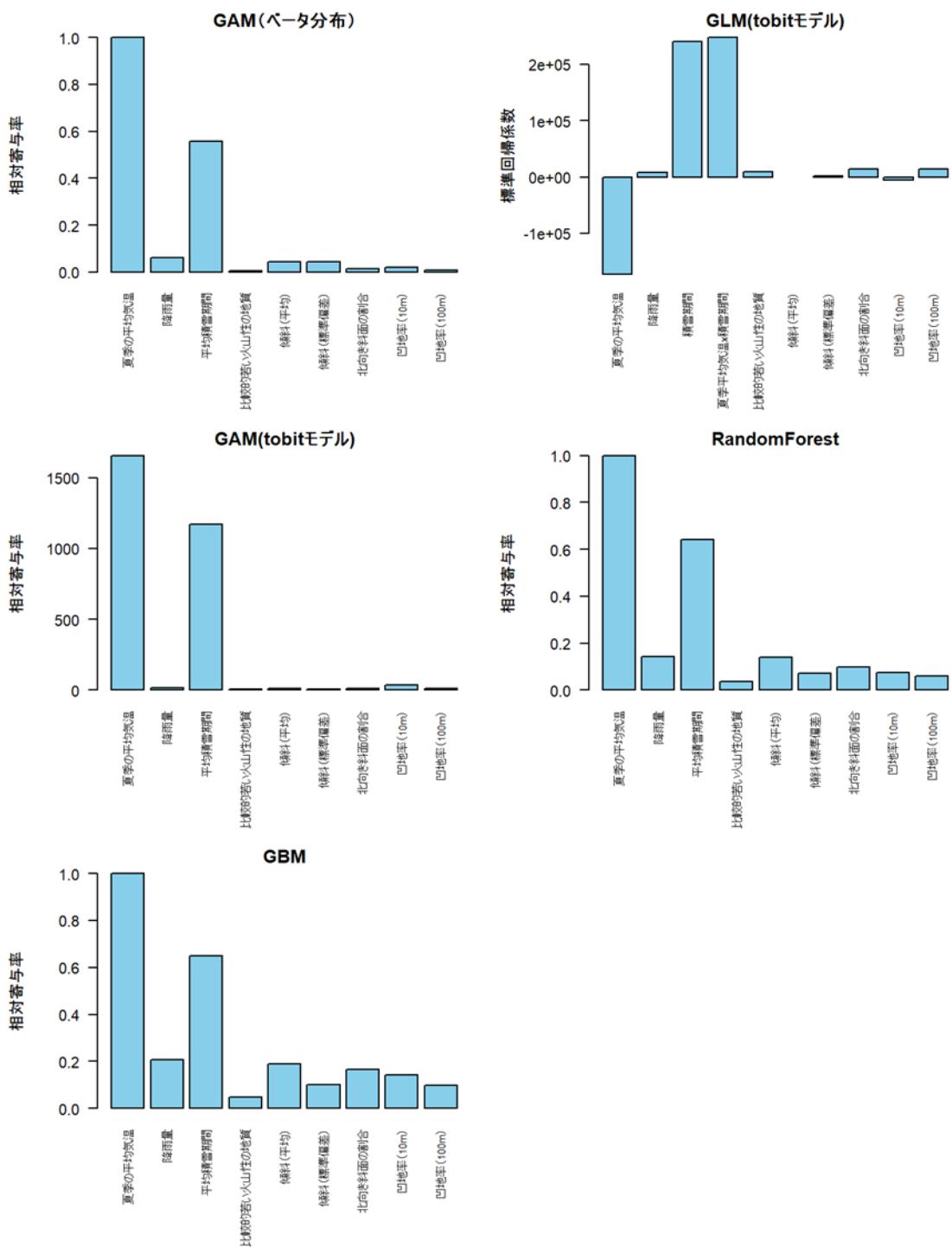


図 4.3-1(e) 各統計モデルにおいて、亜高山帯森林植生の分布に影響を与えて いる要因の寄与率

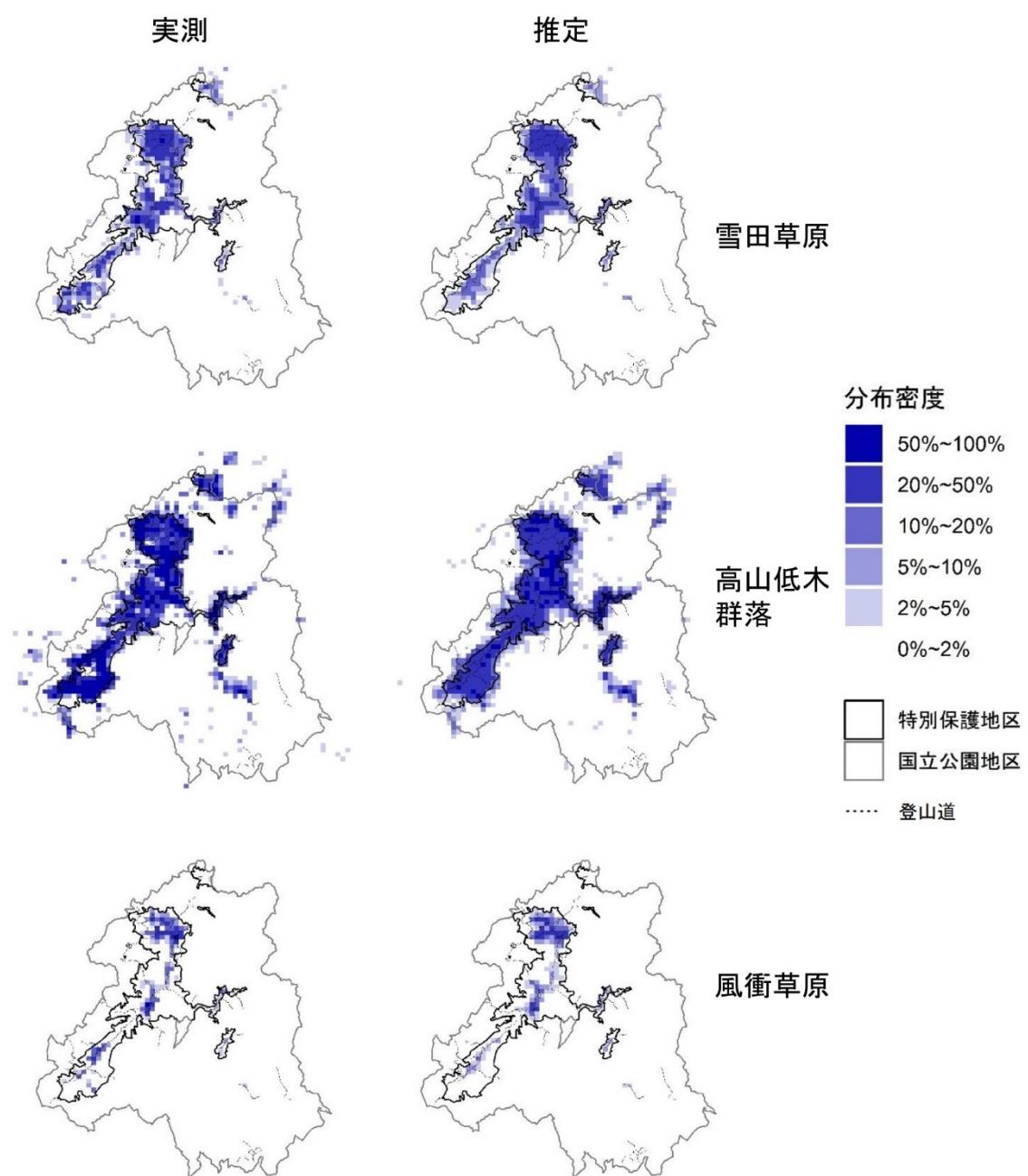


図 4.3-2 各植生タイプの現在の分布密度の実測値とモデルからの推定値

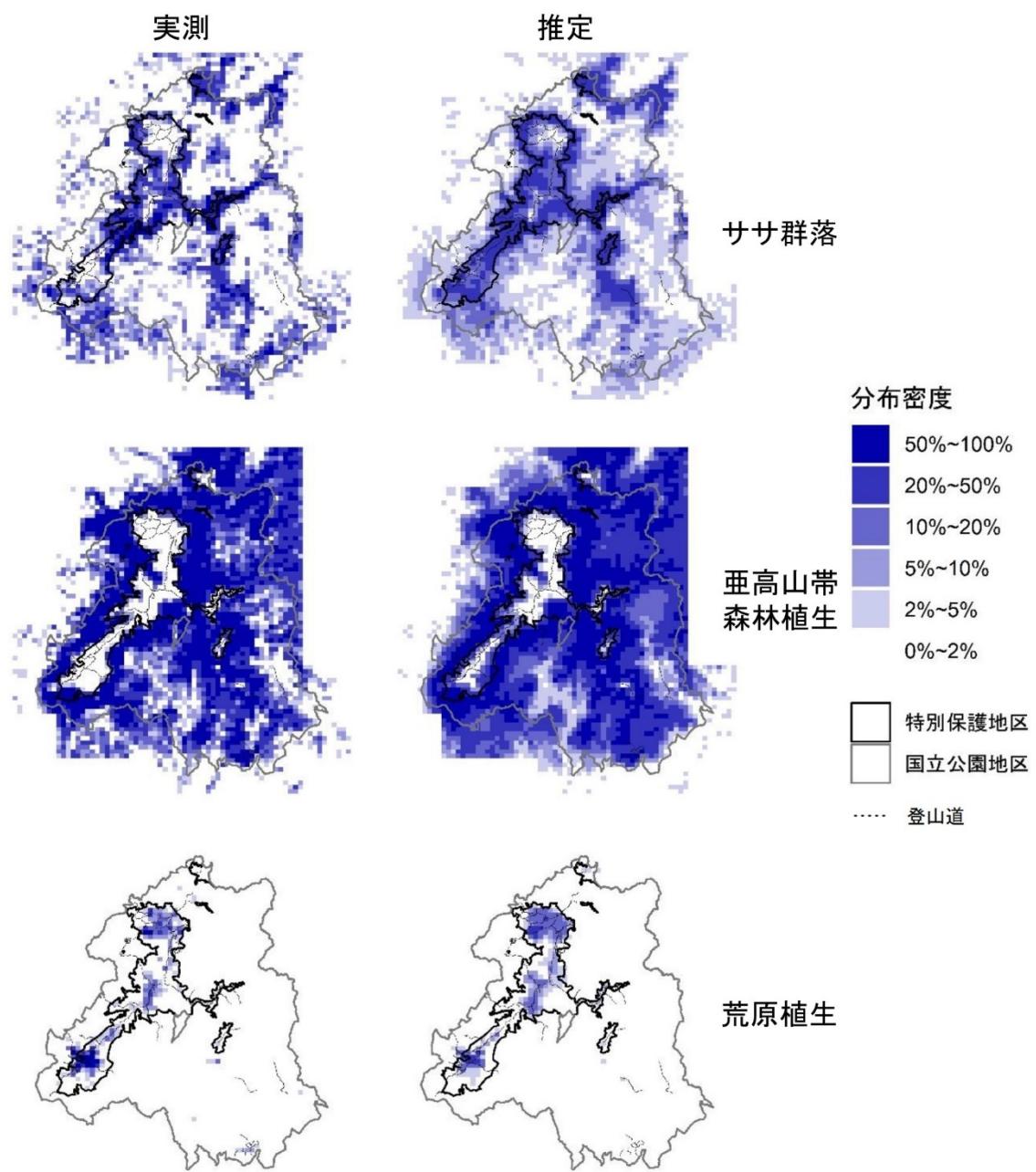
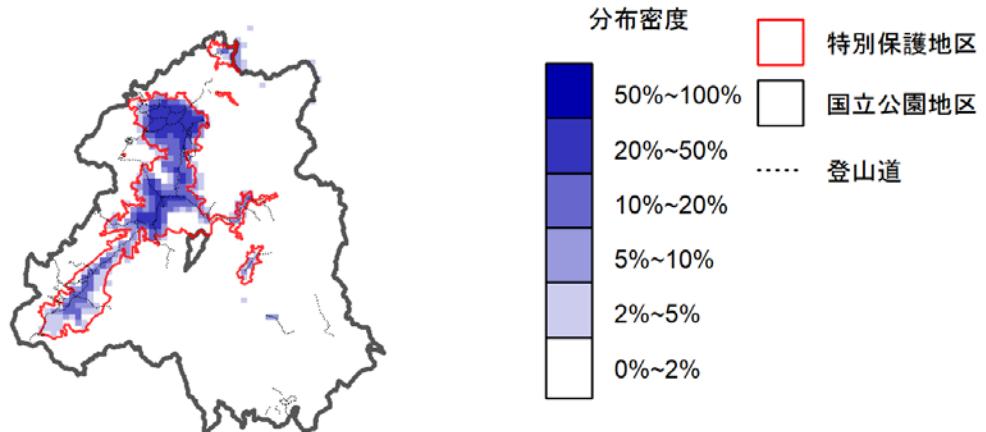


図 4.3-2 つづき

現在の推定値



2046年-2050年 RCP2.6

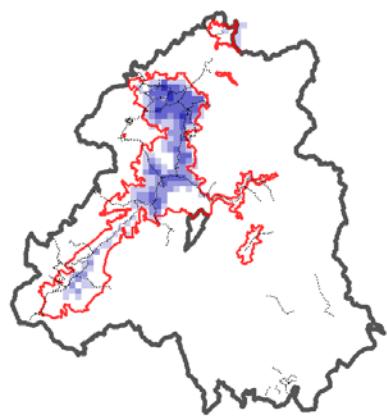


図 4.3-3(a) 雪田草原の現在の分布と将来予測（統計モデル間の平均）

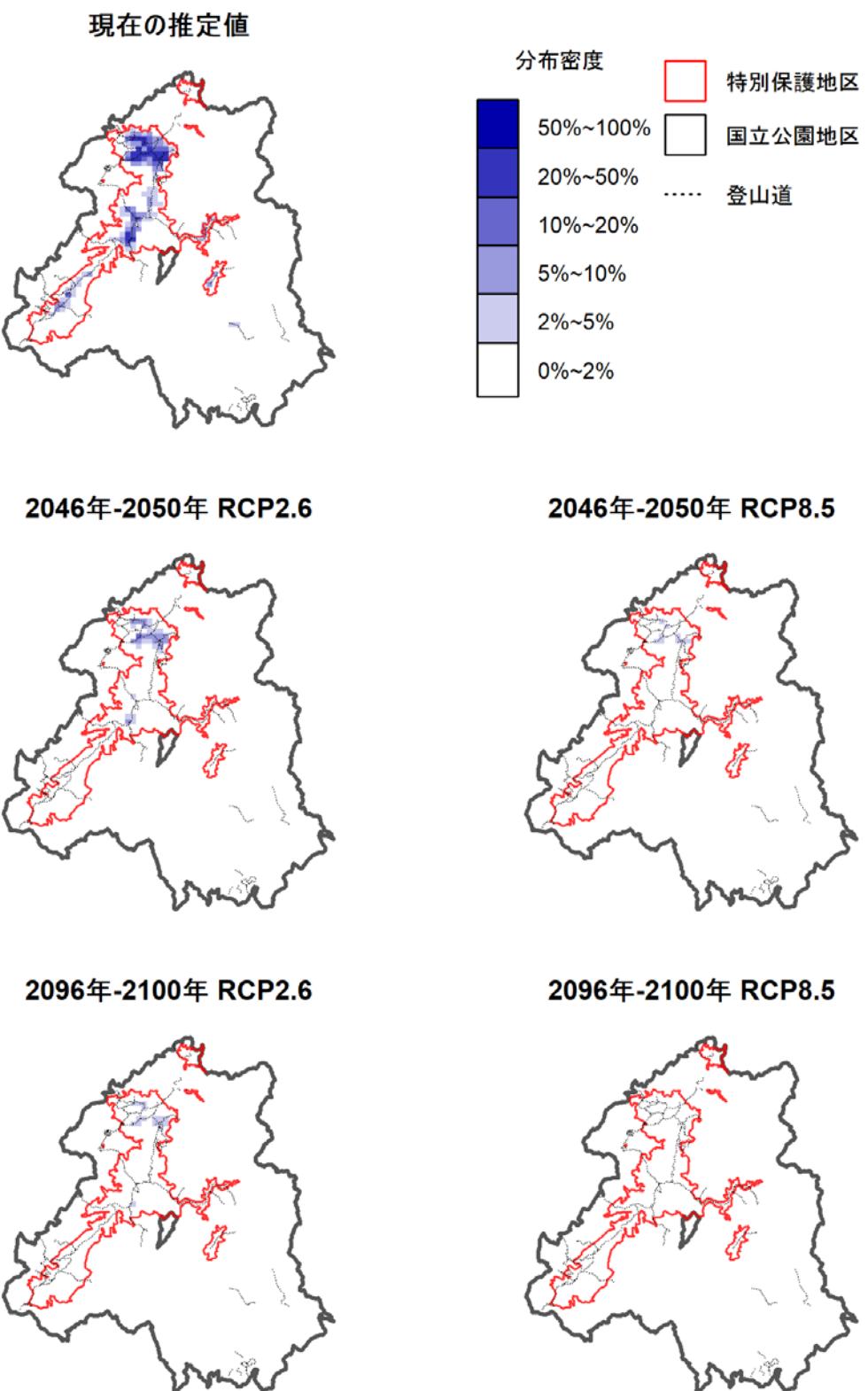


図 4.3-3 (b) 風衝草原の現在の分布と将来予測（統計モデル間の平均）

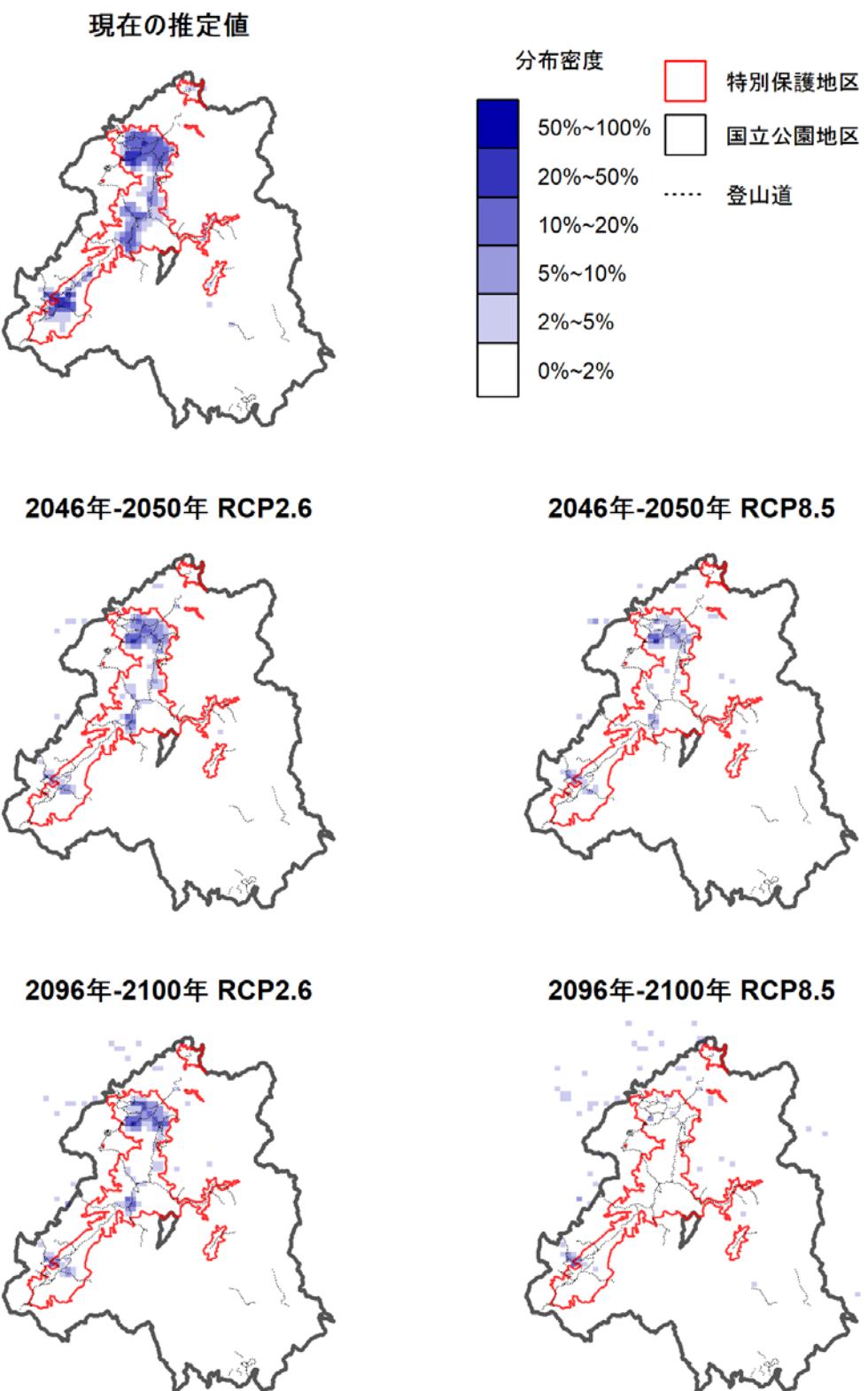


図 4.3-3(c) 荒原植生の現在の分布と将来予測（統計モデル間の平均）

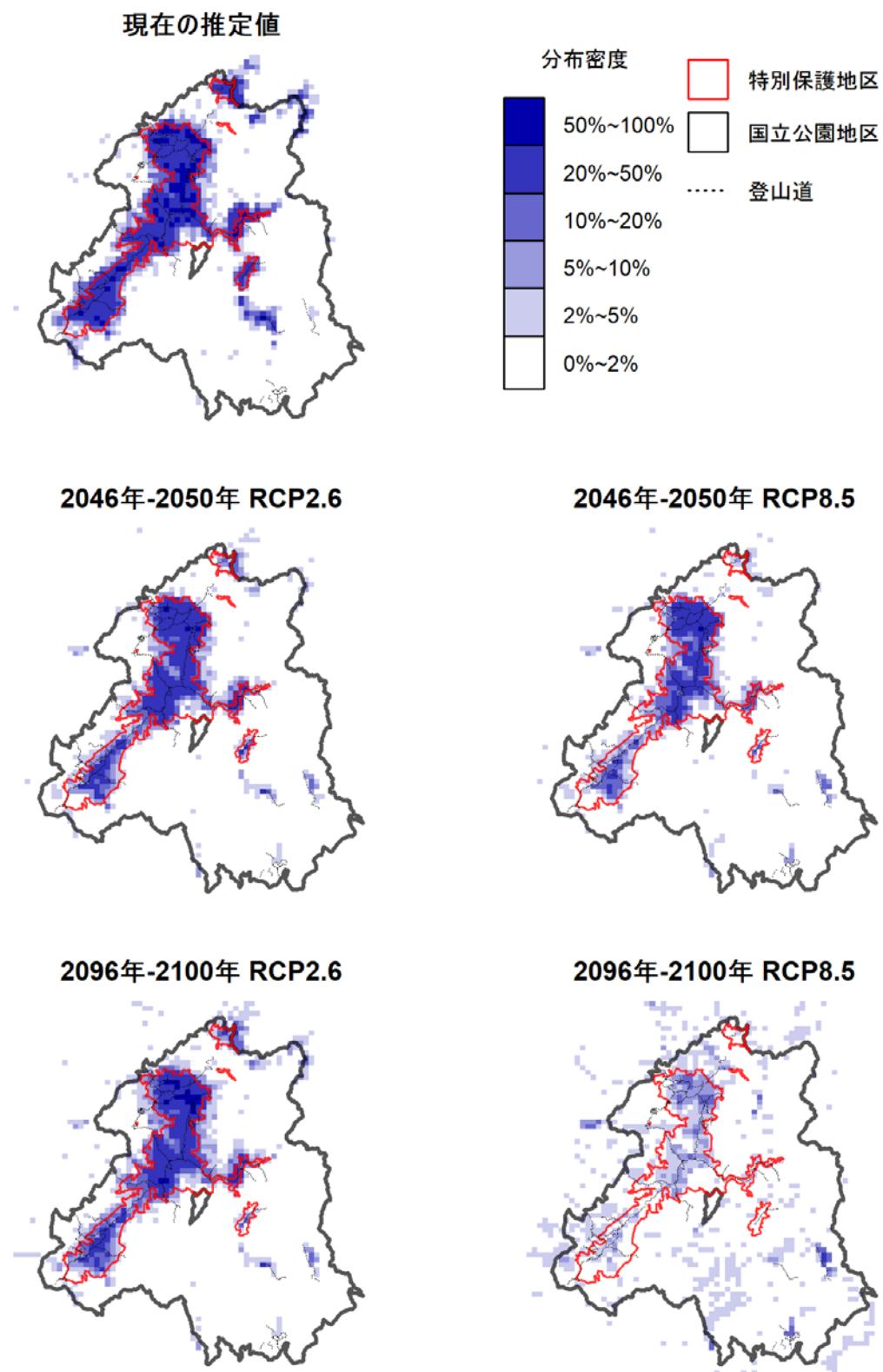


図 4.3-3 (d) 高山低木群落の現在の分布と将来予測（統計モデル間の平均）

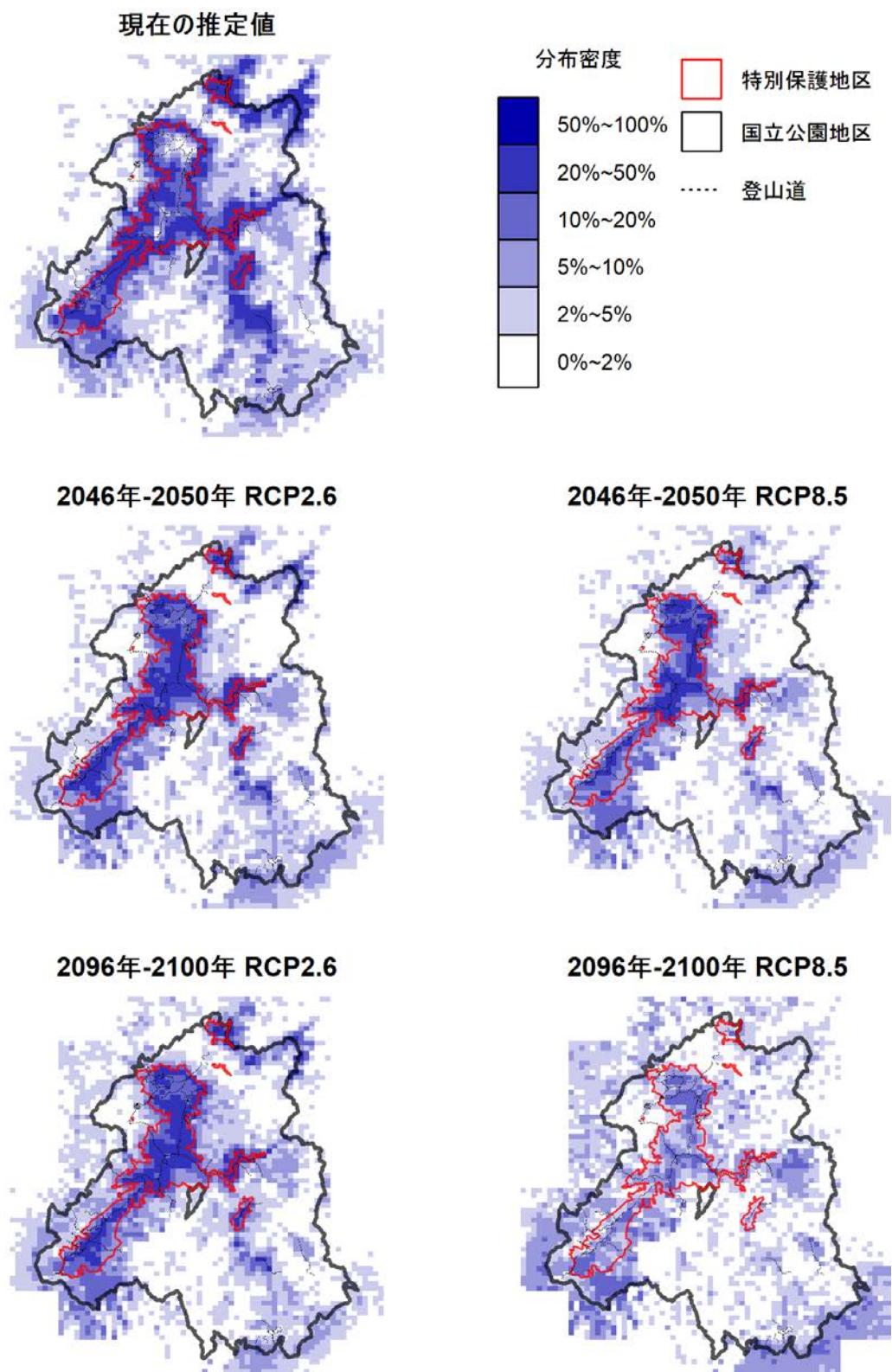


図 4.3-3 (e) ササ群落の現在の分布と将来予測（統計モデル間の平均）

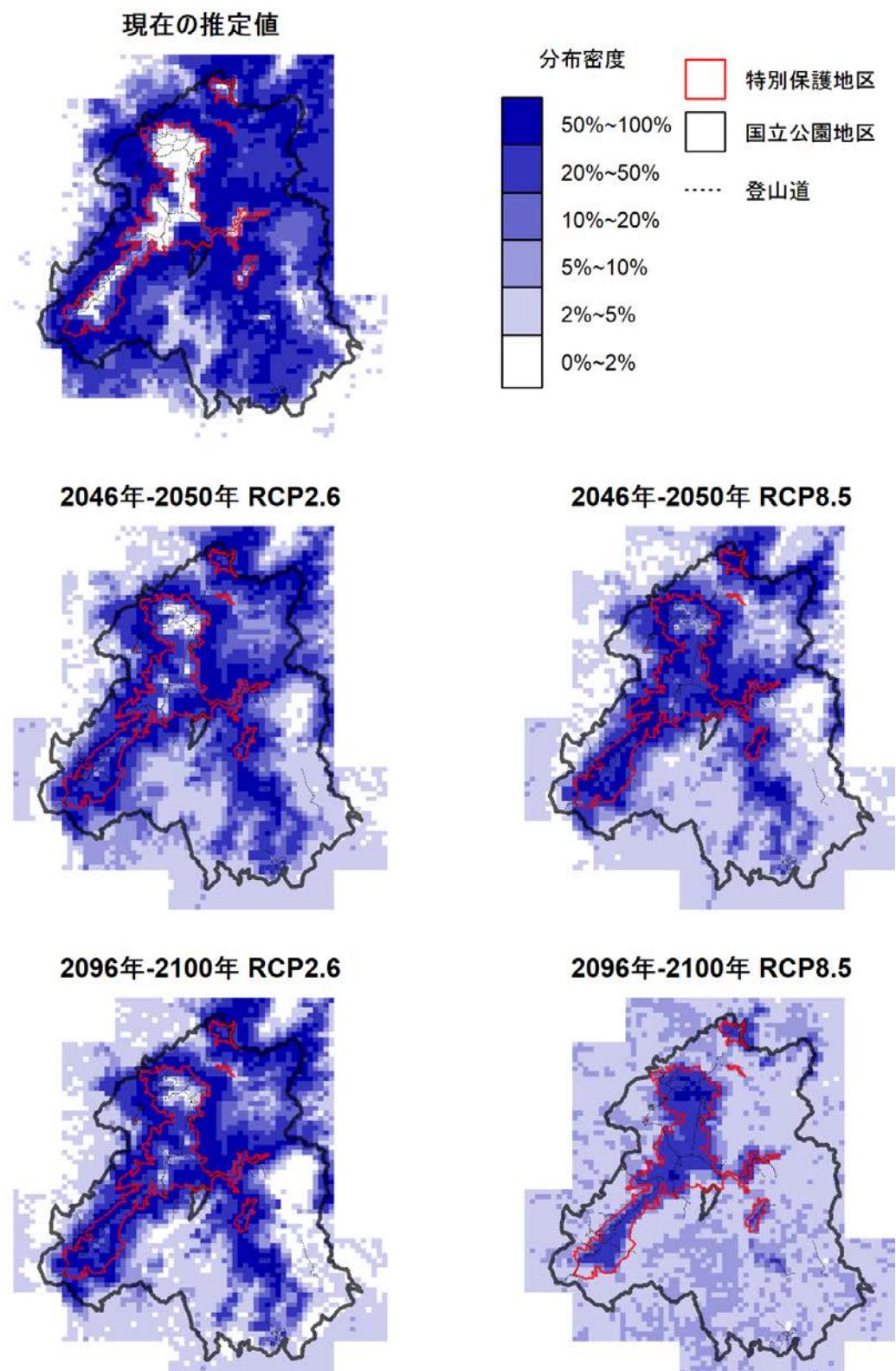


図 4.3-3 (f) 亜高山帯森林植生の現在の分布と将来予測（統計モデル間の平均）

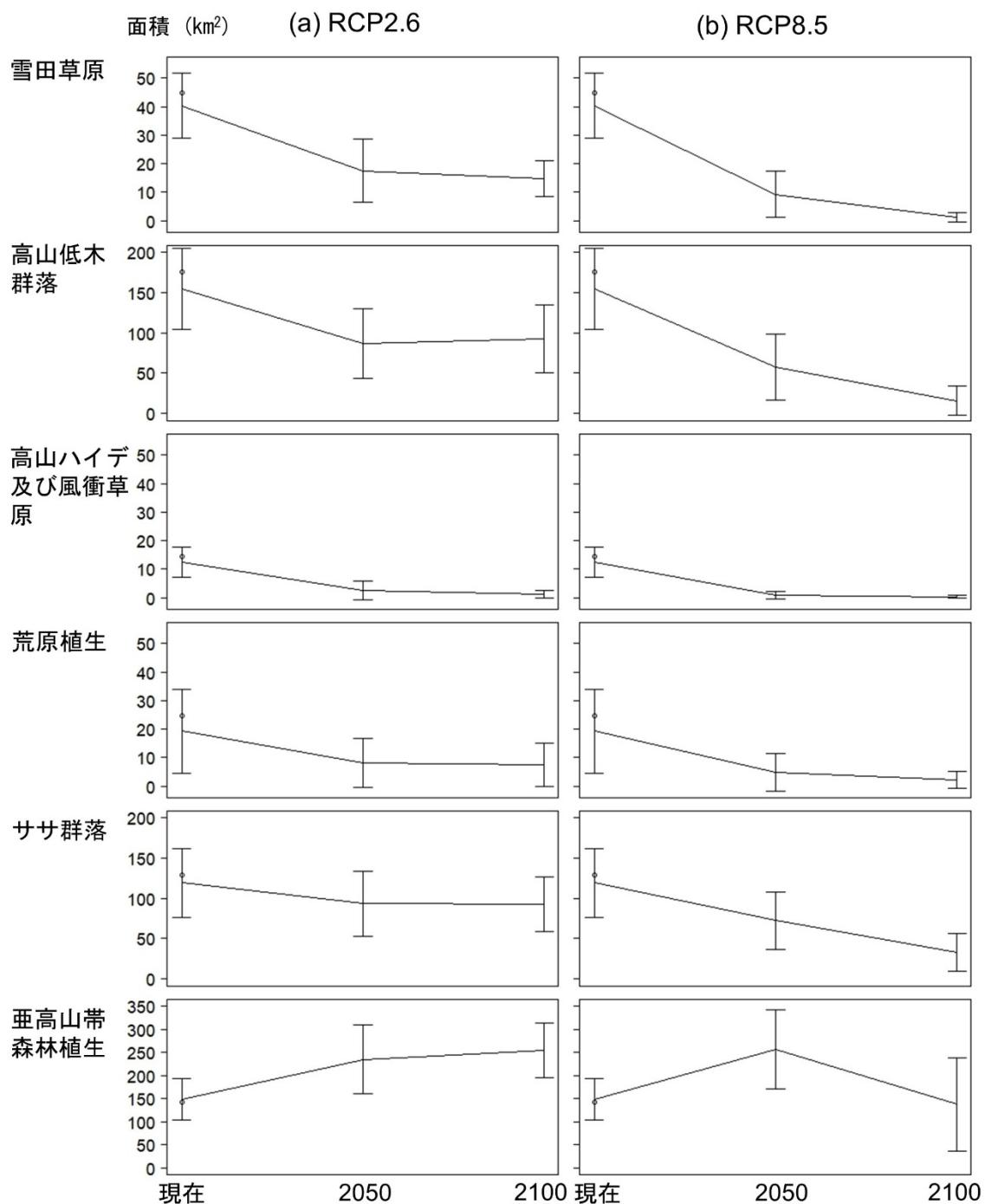


図 4.3-4 特別保護地区内における各植生タイプの推定面積
値は 3 つの気候モデルおよび分布推定モデル間の平均値。エラーバーは SD。

4.4 対策実施場所の優先順位付け

4.4.1 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、高山植生について、各植生に関する将来の分布予測結果に基づいて、気候変動適応にかかる対策を効果的・効率的に実施するために好適な場所の優先順位付けを行う。優先順位付けに際しては、保全と観光利用の両面を考慮するとともに、対策のためのアクセスが可能であるかどうかを現地確認に基づいて考慮し、対策が実施可能かつ優先的に行うべき場所を抽出する。

4.4.2 方法

大雪山国立公園では、高山植生は生物多様性の保全の対象となることに加え、観光資源ともなっている。観光利用は、国立公園の重要な機能の1つである一方で、観光客が多い場所は、踏みつけや盗掘等のリスクが高くなると考えられ、保全対策を行う場所と、観光利用を行う場所は分けることが望ましい。表4.4-1に、生物多様性の保全対策を行う場所と、観光利用のための植生維持を行う場所の優先順位付けで考慮すべき項目を整理した。

表4.4-1 適応策実施場所の優先順位付けにおける保全と観光利用の違い

	生物多様性保全	観光利用
対象植生	雪田草原、風衝草原、高山低木群落など、気候変動に伴う衰退が危惧される植生（種）	お花畠などの観光資源となりうる植生（種）
対象植生の面積	現在・将来の推定面積とともに多いところが望ましい	現在・将来の推定面積とともに多いところが望ましい
移動距離	登山口から近いほうが対策コストが少ない	登山口から近いほうが観光価値が高い
視認性	低いほうが盗掘・踏圧などを受けにくく	高いほうが観光価値が高い
管理内容	競合植生の刈り取り等特に希少種に配慮観光利用を制限する	競合植生の刈り取り等観光利用しつつも維持できる種を残す

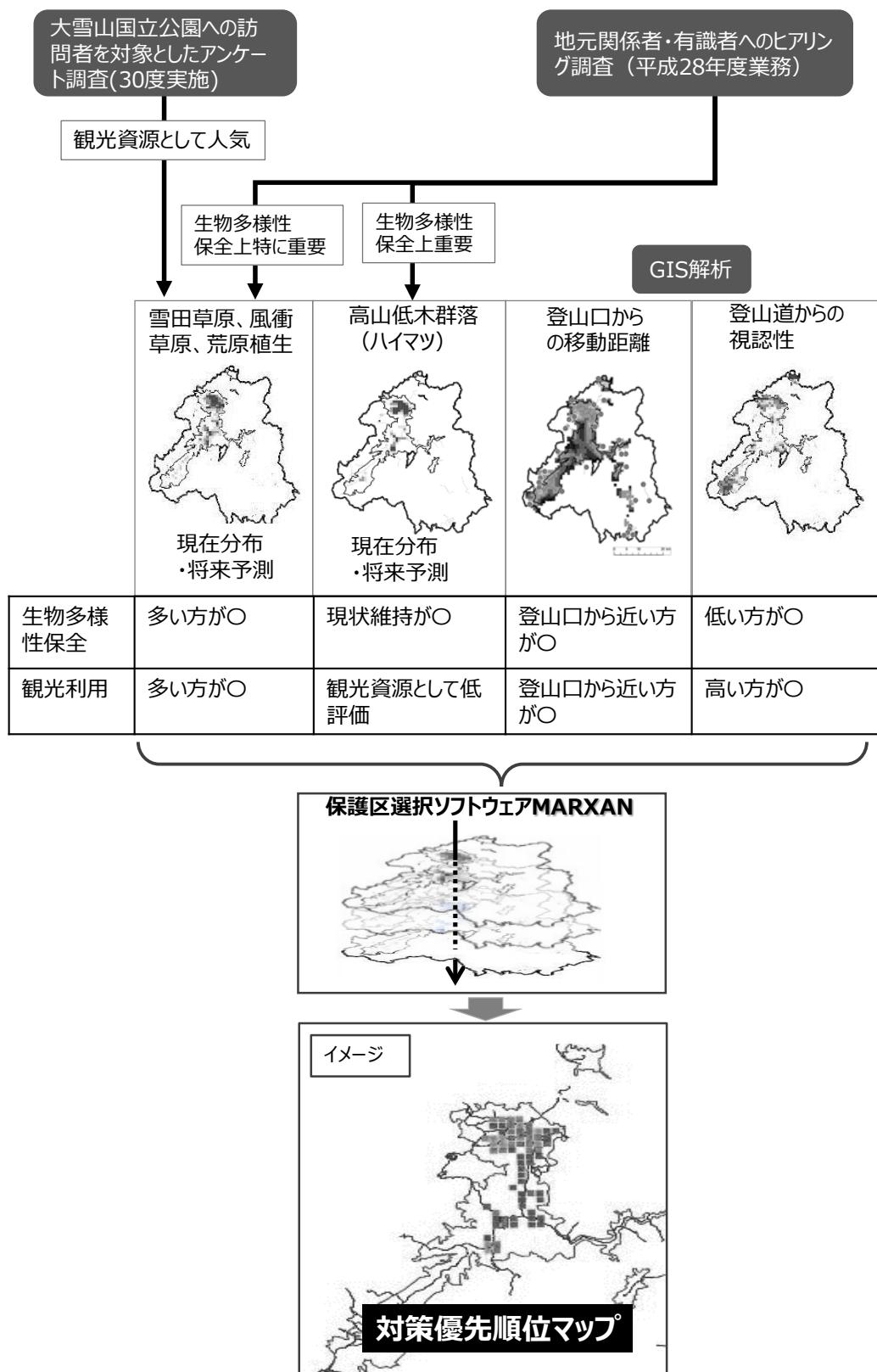


図4.4-1 適応策実施場所の優先順位付けで考慮した項目

保全を主として行う場所と観光利用を主とする場所を分ける基準として、妥当と考えら

れるのは、登山道からの見えやすさ（視認性）である。登山道から見えやすい、視認性が高いサイトは、観光利用に好適であると考えられる。これに対して、保全用のサイトは、人の影響を避けるためにも視認性が低いことが望ましい。これらの視認性の条件を満たしつつ、対象となる植生の現在および将来の面積が共に多いところが、対策を行うのに適したサイトと考えられる。

また、対策場所の優先順位付けに際しては、対策を実施する際のコストも考慮することが必要である。観光利用のためにも、保全対策として管理等を行うためも、管理対象地や観光目的地に達するまでの移動コストが重要であると考えられることから、登山口からのアクセスの良さをコストとして考慮した。このような考え方に基づいて、保護区選択ソフトウェア Marxan を用いて適応策実施に好適なサイトの組み合わせを求めた。本解析においては、3次メッシュを1つのサイト（対策の空間単位）として扱った。

（1）入力データ

対策場所の優先順位付けに際しては、図 4.4-1 のような要素を入力値として考慮した。各入力値の詳細については以下のとおりである。

1) 各メッシュの保全価値

保全対象となる高山植生には、雪田草原・風衝草原・荒原植生・高山低木群落が含まれる。このうち、雪田草原・風衝草原・荒原植生には、観光資源となりうる、お花畠を形成する種が多くまれる。4.2 節のアンケート結果で観光客からの人気が高かった種も、これらの植生タイプに含まれている。これに対して、高山低木群落を主に形成するハイマツは、アンケート結果から、観光資源とはなりにくいことが明らかとなった。

そこで、高山低木群落については、観光資源としての利用はなく、全ての生育地が保全対策実施の候補地になりうるとした。これに対して、雪田草原・風衝草原・荒原植生については、視認性が低い場所を保全価値の高い場所とし、視認性が高い場所は観光価値が高い場所として扱うこととした。

また、それぞれの保全対象となる植生タイプについて、現在の実測面積が大きく、かつ、将来も広い面積が残ると推定された場所が、実際に対象植生が存続する可能性が高く、保全対象としての価値が高いと考えた。これらの考え方に基づいて、各3次メッシュの保全価値を、各植生タイプについて、以下のような式によって算出した。

雪田草原・風衝草原・荒原植生の場合：

各メッシュの当該植生に関する保全価値＝

$$\sqrt{(\text{視認性の低さで重みづけした現在の対象植生の面積}) \times (\text{対象植生の将来面積})} \quad (\text{式 4.4-1})$$

高山低木群落の場合：

各メッシュの当該植生に関する保全価値＝

$$\sqrt{(\text{現在の高山低木群落の面積}) \times (\text{対象植生の将来面積})} \quad (\text{式 4.4-2})$$

なお、平方根を取ったのは、保全価値を面積と同じ次元とするためである。また、現在の各植生の面積は自然環境保全基礎調査の第 6-7 回植生調査の実測値、将来面積には、4.2 節で推定された、RCP2.6、2100 年の将来予測値を使用した。視認性の低さによる重みづけの方法については、3)において詳述する。

2) 各メッシュの観光価値

上記のとおり、観光資源となり得るのは雪田草原・風衝草原・荒原植生の 3 つの植生タイプである。また、観光資源となりうるのは、視認性の高いサイトである。そこで、観光資源としての価値は、これら 3 つの植生の合計面積に基づいて、以下の式により算出した。

各メッシュの観光価値＝

$$\sqrt{(\text{視認性の高さで重みづけした現在の合計植生面積}) \times (\text{将来の合計植生面積})} \quad (\text{式 4.4-3})$$

3) 視認性に基づく現在の対象植生面積の重みづけ

視認性は、特別保護区内を通過する登山道について、登山道を多数の点の集合として扱い、ある対象地点を見ることができる登山道上の点の数として算出した（図 4.4-2, 4-3）。見えるかどうかは、地形の起伏に基づいて判断し、さらに 5 km 以内にある場合に見えると判断した（図 4.4-2）。算出した結果を図 4.4-3 に示す。

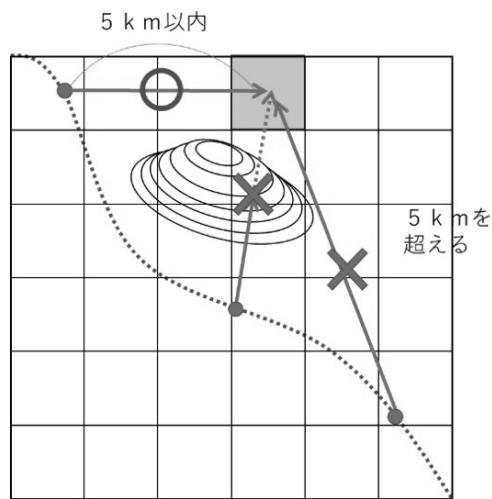


図 4.4-2 視認性の概念図

あるメッシュ（グレー）の視認性の高さは、そのメッシュを見ることができる登山道上の点の多さで評価する。5 km 以上離れている場合や、山などの地形に遮られる場合は見えないとする。

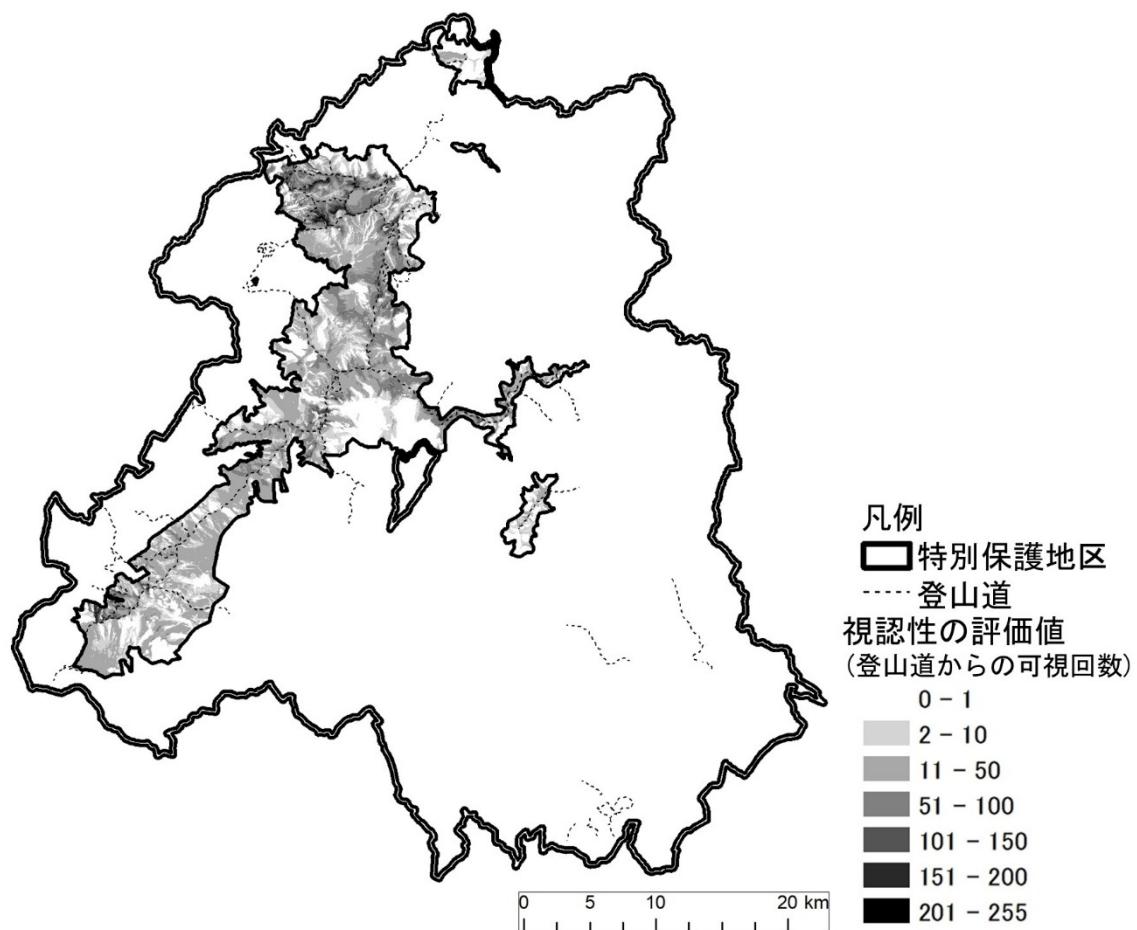


図 4.4-3 各 3 次メッシュの視認性の算出結果

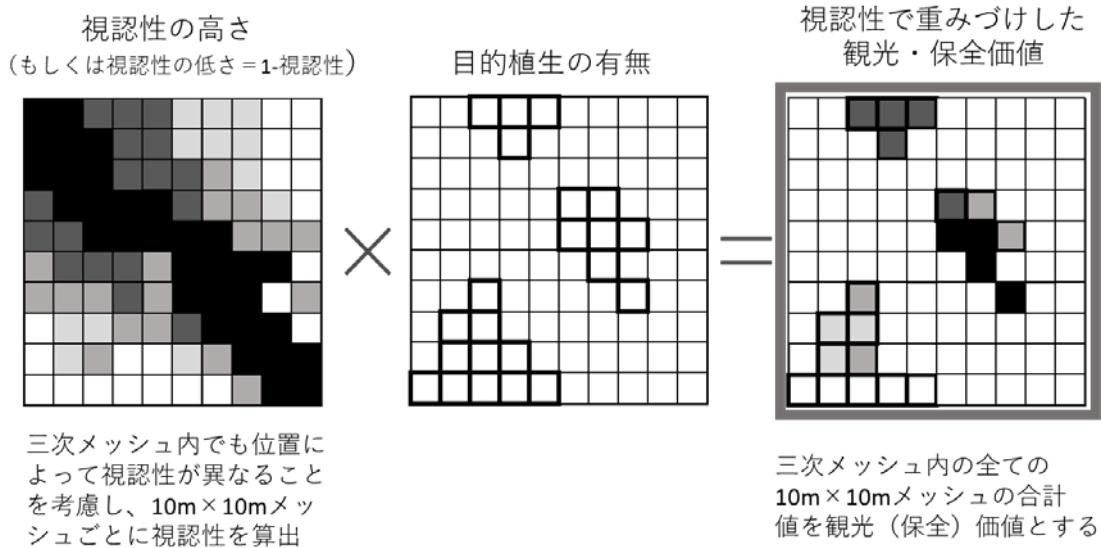


図 4.4-4 視認性と植生面積に基づく観光・保全価値の算出

登山道から見えやすいほど観光利用に好適であり、逆に見えにくいほうが保全しやすい。この考え方に基づき、ある3次メッシュの観光・保全価値は、対象となる植生の面積（雪田群落など）に視認性で重みづけをして算出した（算出の詳細は式4.4-1, 3, 4, 5参照）。

3次メッシュは $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ と大きく、登山道から部分的に見える場合も多いので、そのことを重みに反映するために、3次メッシュ内を $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ のメッシュに細分し（細分メッシュ）、細分メッシュごとに当該 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ メッシュを見ることが出来る登山道上の地点数を計数した（図4.4-4）。この値を基に、ある3次メッシュについての、視認性で重みづけしたある植生タイプの現在の面積は、当該3次メッシュに含まれる10,000個の細分メッシュ全てにおける当該植生の有無と視認性の値の積の合計値として、式4.4-4によって算出した。

ある3次メッシュ内の、視認性の高さで重みづけした現在の植生面積 =

$$\sum_i^{10000} (\text{細分メッシュ } i \text{における対象植生の有無}) \times \left\{ (\text{細分メッシュ } i \text{が見える登山道上の地点数}) / 255 \right\}^2$$

（式4.4-4）

255で割っているのは、（細分メッシュ*i*が見える登山道上の地点数）の最大値が255であったためである。また、二乗しているのは、式3で平方根を取ることを考慮している。視認性が高いほど価値が高いと考えられる観光価値（式4.4-3）については、この視認性の高さでの重みづけを用いることになる。

逆に、保全用の価値（式 4.4-2）については、視認性の低さでの重みづけが必要であり、式 4.4-5 によって算出した。

ある 3 次メッシュ内の、視認性の低さで重みづけした現在の植生面積＝

$$\sum_i^{10000} (\text{細分メッシュ } i \text{ における対象植生の有無}) \times \{1 - (\text{細分メッシュ } i \text{ が見える登山道上の地点数})/255\}^2$$

(式 4.4-5)

4) コストに関するデータ

保全・観光利用とともに、アクセスがよいサイトが好適であると考えられる。そこで、登山口から各メッシュに到達するのにかかる時間を、保護区選択においてコストとして扱った（図 4.4-5）。登山口を起点とし、登山道沿いを進むのに 1 km 当たり 54 分（昭文社「山と高原地図」から概算）、登山道から外れると 500 m あたり 60 分かかるとし、目的地（各 3 次メッシュの中央）に到達する時間を算出した。算出した結果を図 4.4-6 に示す。

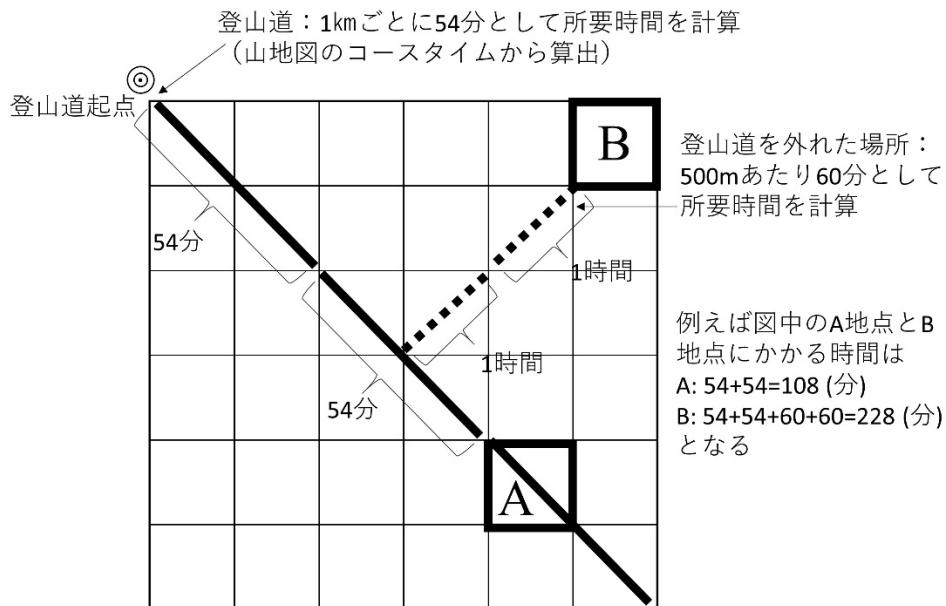


図 4.4-5 登山口からの所要時間（対策コスト）の算出法

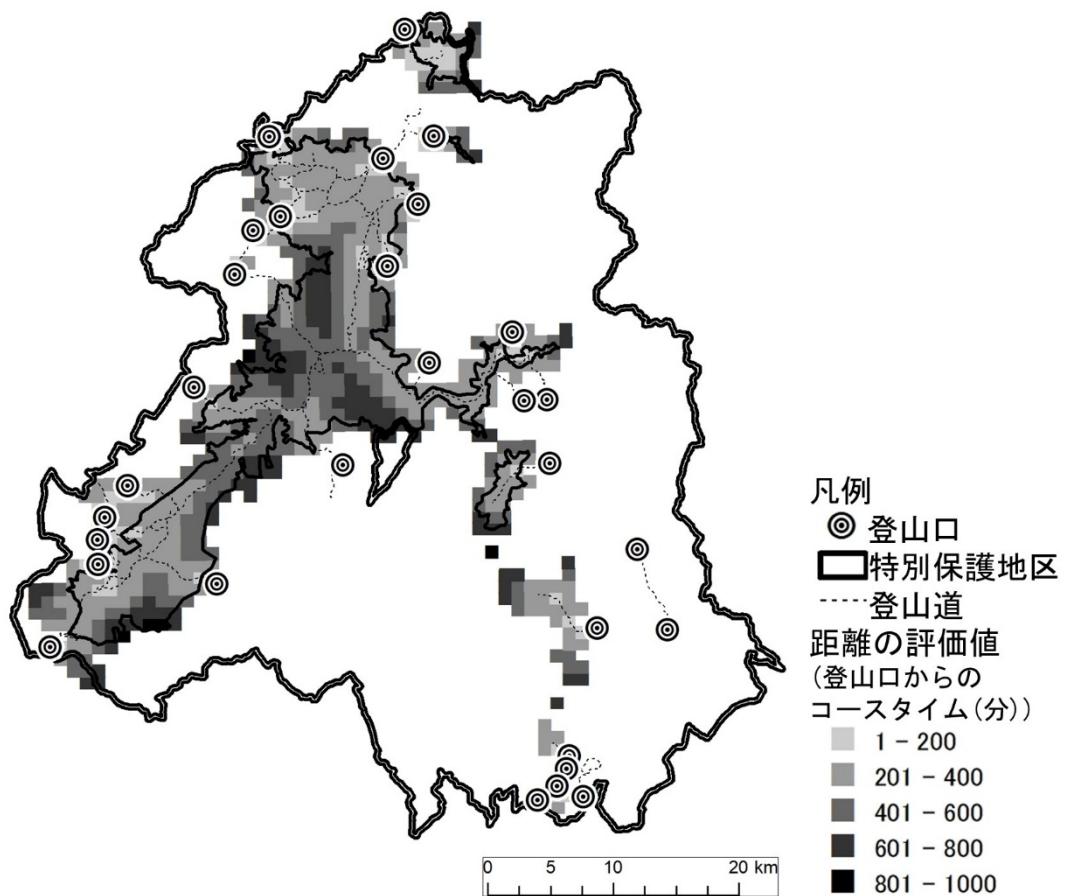


図 4.4-6 登山口からの所要時間（対策コスト）の算出結果

(2) 対策場所の優先順位付けの方法

最もよく用いられている保護区選択ソフトウェアの 1 つであり、対策実施場所の優先順位付けにも使用可能な Marxan (Ball et al., 2009) を用いて、対策場所の優先順位付けを行った。Marxan は、保全対象の空間的な分布情報や、サイトごとの対策にかかるコストなどに基づいて、それぞれの保全対象の保全目標を達成するという制約条件のもとに、合計コストが最小となるサイトの組み合わせ（対策サイトセット）を探索する。

保全目標はそれぞれの対象について設定することができ、対策サイトセットに含めたい量（合計面積や合計個体数など）を指定する。Marxan は、この目標値を超える合計量が含まれるように、サイトセットの選択を行う。保全対象には、生物種だけでなく、観光資源などの生態系サービスを含めることも可能である（石濱, 2014）。

コストには、各サイトの対策にかかる経済費用などを入力値として与える。コストの上限値が決まっている場合には、上限値を閾値としてコストが急激に増加するような指定が可能である。Marxan が最小化する広義のコストには、経済コストの他、保全目標を達成できないことに対するペナルティ項が含まれており、保全対象ごとの重要性に応じてペナルティの重みを変えることができる。また、保護区が空間的にまとまっていることが望ましい場

合には、対策サイトセットの総周縁長に対してペナルティを科すことも可能である。

Marxan は保全目標を達成しながらコストを最小化するような対策サイトセットを探索するに際して、厳密な最適解を探索するのではなく、焼きなまし法 (Simulated Annealing) により近似解を探索する。そのため、得られる解が 1 つになるとは限らず、試行を反復すると複数の解が得られることが多い。このことは、利害関係者間の合意形成を行う場合などに、複数のオプションを提示可能であるというメリットとなる。多数回の試行において、あるサイトがサイトセットの中に含められた回数は、そのサイトが保全目標を達成する上でどれくらい重要であるかを示す、非代替性の指標としてよく用いられる (松葉ら, 2015)。

(3) 保全目標の設定

各保全対象および観光資源の目標値については、現在から将来にかけての分布面積の減少量が大きいほど対策の必要性が高く、また、希少種が多いほど対策の必要性が高いという考え方に基づいて、式 4.3-6 によって算出した。

各保全対象および観光資源の目標値 =

$$\text{各群落の希少種数/全群落の希少種数} \times (\text{現在面積} - \text{将来面積}) \quad (\text{式 4.4-6})$$

なお、各群落を主要な生息地とする希少種の数は、風衝草原 15 種、雪田草原 9 種、荒原植生 7 種、高山低木群落が 2 種であった。

(4) 現地視察による確認

大雪山のなかでも特に多くの場所が対策サイトの候補となりそうな大雪山の北部において現地視察を行った。

4.4.3 結果および考察

(1) Marxan による対策サイトセットの選定結果

距離コストを入れない場合、対策サイトの候補として選ばれる回数が多い場所は、多くが大雪山の北部に集中している (図 4.4-7)。大雪山北部は、現在も噴気活動が続く旭岳を持ち火山性の植生も多く分布するほか、標高 2000 m を超えた山岳が集中することから特に低い気温が維持されるなどの環境要素もあり、大雪山系でも最も多様な植物群落を持つ。また概して緩傾斜な台地が広がるため、植生面積自体の広がりも大きい。特に大雪山北部は中心部に御鉢平とよばれるカルデラをもち、雪渓を含む荒原植生、風衝草原、高山低木群落、雪田草原が混在し生育する場所となっている (図 4.4-8(c)-4 参照)。高山植生の面積が同程度の場合、高山植生群落が单一よりも混在している方が、1 か所の対策で多くの群落タイプを同時に保全することができる。そのため、4 つの植生が混在する御鉢平は効率的な場所といえ、対策サイトの候補として選ばれる回数が多いと考えられる。大雪山北部の他、大雪山中部の

中心付近に位置するトムラウシ山の周囲で、選ばれる回数が多い場所が複数メッシュあるが、ここでも雪田草原が優占する他の場所よりも優先的に選ばれている。そのため、御鉢平同様に、トムラウシ山近辺も複数の高山植生群落がそれぞれ広い面積を持ちながら共存している場所といえる。一方で、大雪山の南部において選ばれる回数が多い場所が存在しないのは、現在も噴気活動を行っている火山があることで火山性の荒原植生が成立している一方、北部や中部と比べると急峻な地形となっており、他の高山植生の分布域も限られているためと考えられた。

距離コストを入れた場合 (図 4.4-7 (b))では、コストを入れない場合に比べ(図 4.4-7 (a))、大雪山北部で対策サイトの候補として選ばれる回数は一段と増えている。これは高標高域まで手軽に登れるロープウェイが旭岳 (図 4.4-8(b) ③のメッシュに含まれる) と黒岳 (図 4.4-8(b) ⑦のメッシュに含まれる) にそれぞれあるほか、他の登山口からの高山帯へのアクセスもよい (登山口が標高約 1200 m - 約 1500 m 程度) ためと考えられる。一方で、大雪山中部のトムラウシ山辺りまで到達するには登山口から 7 時間程度かかることから(図 4.4-6)、対策サイトには選ばれにくくなっている。また、北部・中部と比較すると南部では距離コストの有無での対策サイトの選ばれ方の変化は一番少ない。これは上述のように、南部での植生の分布は限られており、かつ登山口から図 4.4-7 (a) で選択されている高山帯へのアクセス時間は一様 (図 4.4-6) になっているためと考えられる。以上の結果から、距離コストを入れた場合には、高標高域へのアクセスの利便性が対策サイトの選択によく反映されているといえる。

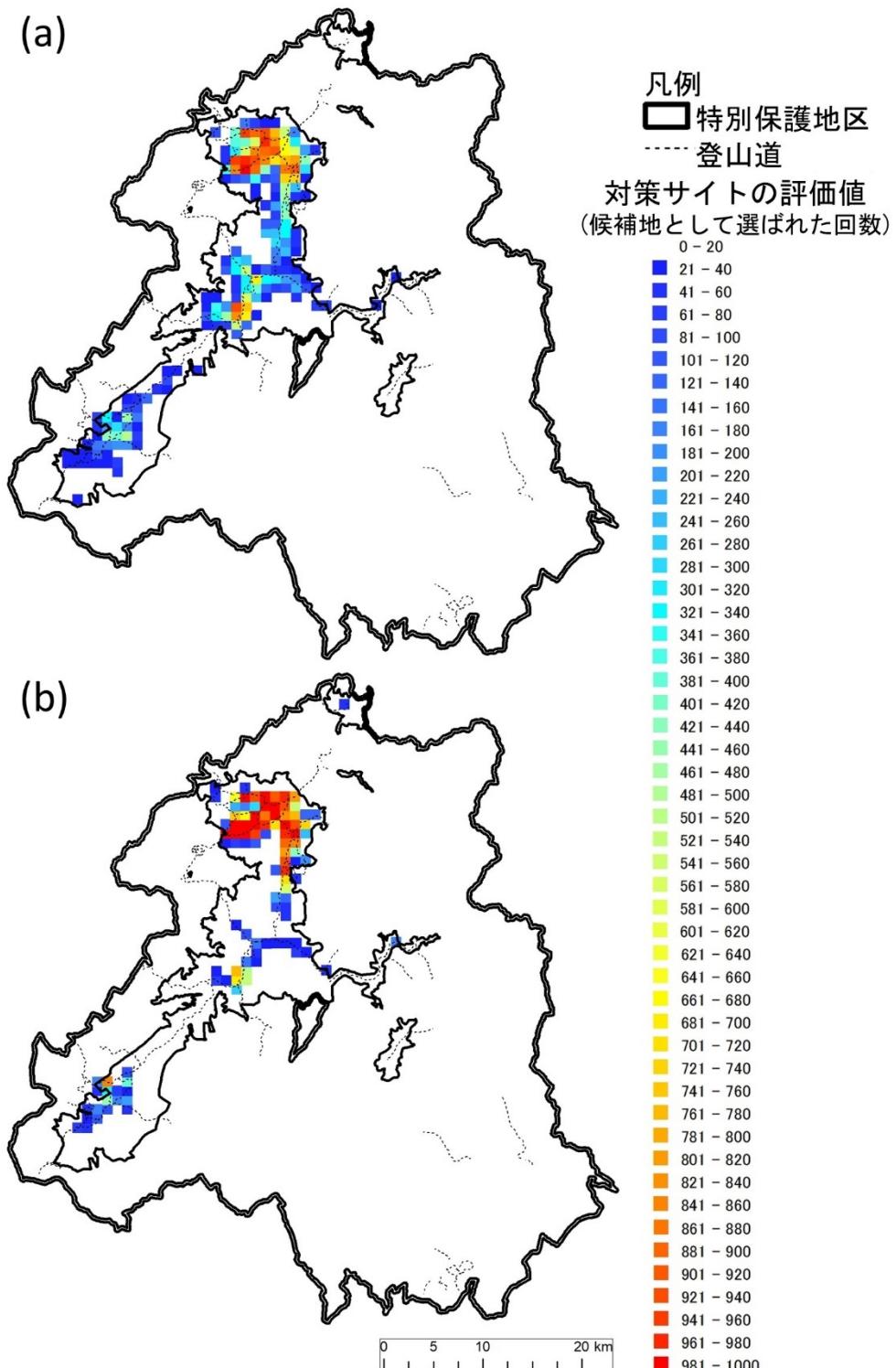


図 4.4-7 対策好適サイトの優先順位付けの結果

(a)は距離コストを考慮しない場合、(b)はコストを考慮した場合の結果を示す

(2) 対策場所優先順位付けの結果の現地確認

図 4.4-8(b)-1, 2 で示された、距離コストの有無で変化が少ない①, ②, ④, ⑤と変化の大きい③, ⑥, ⑦について、現地確認をした結果を踏まえた考察を下記に述べる。

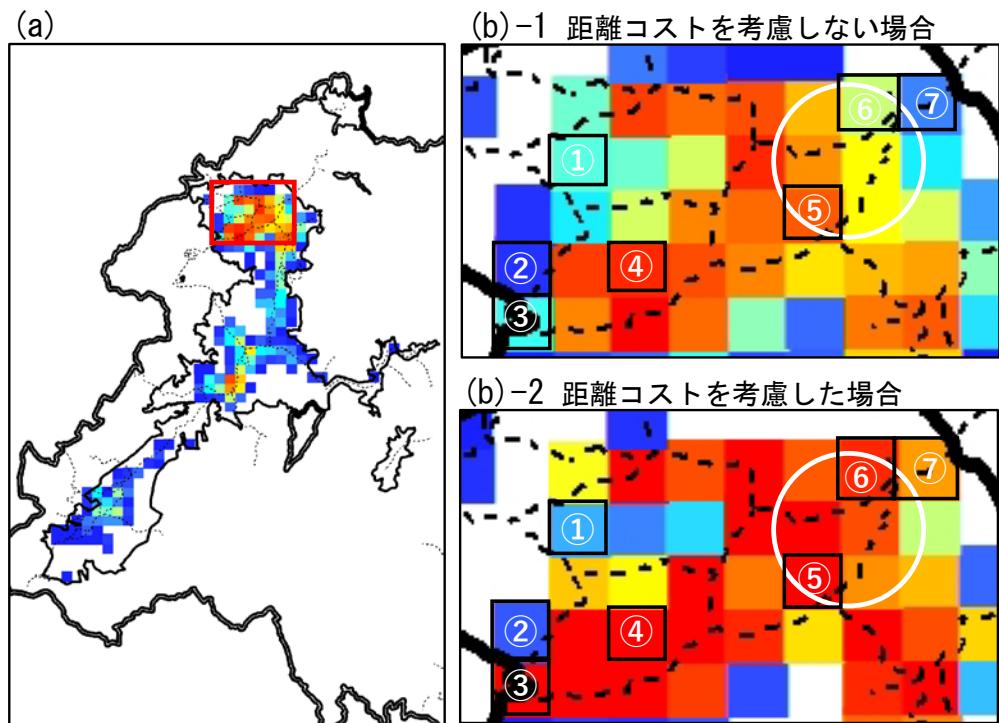
大雪山では気候変動の影響を受けて、チシマザサの顕著な分布拡大が明らかとなっており、それに対応して高山植物の局所的な絶滅が危惧されている（金子ら, 2014 ; Winkler et al., 2016）。現地確認の結果、複数の場所でチシマザサが高山植物の生育地に侵入している様子が新たに確認された（図 4.4-8(b)①, ③, ④, (c)-1, 2）。③のメッシュは、旭岳ロープウェイ姿見駅を含み、最も多くの登山者や観光客が利用する場所である。ここは標高が低い場所（亜高山帯森林植生）も多く含むため、距離コストなしと優先順位は低くなるが((b)-1③)、姿見駅を含むことから距離コストをいれた場合の順位は高く((b)-2③)、保全対策の手がかけやすく、利用者の多さからも優先的な対策が求められる場所である。(b)④, (c)-1, 2 で示された場所は大雪山でも有名なお花畠の一つである。更に、姿見駅から約 1 時間程度の距離のため、距離コストなしの場合・入れた場合とも高い評価となっている。一方、③, ④と同様に①でもチシマザサの侵入が確認されたが、このメッシュはもとからチシマザサが多く、登山口からの距離もあるため、どちらの場合も低い評価になったと考えられる。チシマザサについては、刈取りを行うことで高山植生が回復することが確認されており (Kudo et al., 2017)、優先順位の高い③, ④の場所では、刈取りによる植生維持に努めながら、刈取り方法や頻度に対する効果を評価し、さらに対策内容の改善を循環させながら管理していく、順応的管理が有効であると考えられる。

姿見駅からのアクセスが良い図 4.4-8(b)②、黒岳ロープウェイからのアクセスが良い⑥, ⑦は同様の条件と考えられる。しかし、②では距離コストの有無で変化が少ないが、⑥, ⑦は距離コストを入れた方が優先順位が高い。これは、②では面積の多くをチシマザサやハイマツ、或いは通年雪解け水が流れる場所で無植生の環境が占め、元より雪田草原などの植生は乏しいことから、ある程度の植生がないと距離コストが反映できないことを示している。

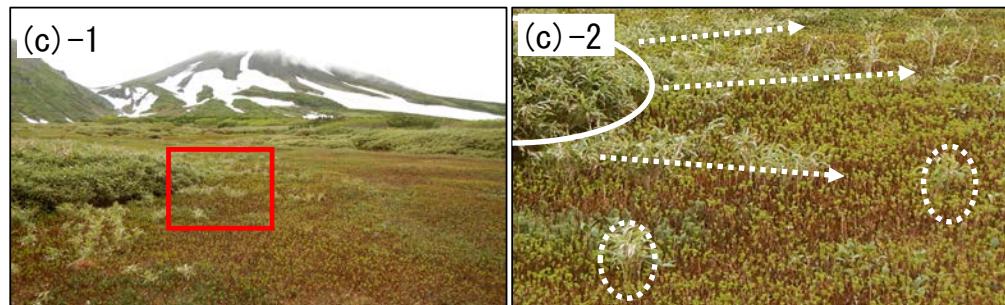
現地確認に訪れる前、前線が停滯した影響で記録的な大雨であった。そのため、図 4.4-8 (b)の丸い白枠で囲まれた場所では至る所で先の大雨に影響と思われる登山道の崩壊や土砂流出が見受けられた。この白枠で囲まれた場所は、全体的に先の旭岳・黒岳ロープウェイからのアクセスが良く、登山者が集中する。そのため、土壤が踏み固められることで、大雨の時の水の流路となりやすく、その結果として土壤浸食が生じ、登山道の崩壊が引き起こされると考えられる。白枠の中でも、特に移動コストの有無にかかわらず、対策サイトの候補として選ばれる回数が多い(b)⑤((c)-4)には不安定な砂礫地に生育する種もあり、土壤浸食の影響が特に強く作用する恐れがある。気候変動の影響は、集中豪雨の頻発化も引き起こすことが予測されるため、早期の対策が求められる。

以上のことから図 4.4-8(b)で示された③-⑤は最も優先的に保全が必要な場所と考えられ、これは Marxan で距離コストを入れた優先順位の高い場所と一致した。そのため、Marxan での対策場所順位付けの結果は妥当なものになっていると考えられた。一方、推定された地点

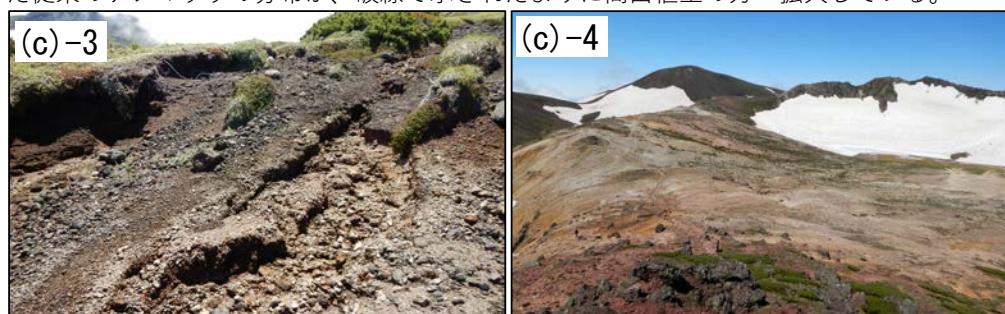
毎に必要・試行できる対策は異なり、推定された結果を基に、具体的対策内容については検討が必要である。



(a)は図4.4-7の縮図で（凡例は図4.4-7を参照）、(b)は(a)の赤枠（大雪山北部）を拡大した図。(b)-1は距離コストを考慮しない場合、(b)-2はコストを考慮した場合の拡大図。
 ①・②・④・⑤は(b)-1と(b)-2で変化が少ないと、③・⑥・⑦は変化が大きい。



(c)-1は④を中心とした風景写真。(c)-2は、(c)-1の赤枠を拡大した画像で、実線で囲われた従来のチシマザサの分布が、破線で示されたように高山植生の方へ拡大している。



(c)-3は(b)の白丸枠内各所で確認された土砂流出の様子。(c)-4は⑤近辺の御鉢平の風景写真。

図 4.4-8 大雪山の北部における対策サイトの候補地

4.5 まとめと今後の課題

(1) 高山植物の嗜好に関するアンケート調査

平成28年度業務にて、地元関係者へのヒアリングや文献調査を通じ、気候変動下における生物多様性保全の観点から重要となる植生（評価対象）を決定し、将来の分布予測や適応策を検討してきたが、今年度実施した大雪山国立公園への訪問者に対するアンケート調査により、訪問動機や嗜好する高山植物種を明らかにした。大雪山国立公園内で見たい高山植物に関する設問を分析した結果、雪田草原、風衝草原、荒原植生といった異なるタイプごとに高い評価をされた高山植物種がある一方で、拡大が懸念されるチシマザサや、ハイマツについては低い評価であることが判明した。

今後、管理を進めていく上で、地域住民をはじめとする様々なステークホルダーとの協力は必要不可欠なものである。諸外国で実施された多くの先行研究によると、市民と協働した気候変動適応策の実施には、市民の気候変動適応策に対する態度や選好を把握することは最も重要な研究の1つであるとされている。しかしながら、今年度実施したアンケート調査において、それらの態度や選好を把握するところまでは至っていないのが現状である。そのため、気候変動適応策に対する市民の選好など、社会科学的研究による知見の蓄積が求められる。

(2) 気候変動影響を考慮した適応策実施場所の優先順位付け

アンケート調査から明らかにされた、高山植物を楽しむといった生態系サービス利用側のニーズと、国立公園内の固有種や絶滅危惧種を始めとした生物多様性保全の両側面を満足させ、気候変動適応にかかる対策を効果的・効率的に実施できる場所の優先順位付けをするための手順を確立した。登山口から高山植物の生育地までのアクセス性は、対策の実施（対策コスト）においても、観光目的（トラベルコスト）においても重要であると考えられる。そのため、評価項目としてアクセス性を加えると、植生面積と視認性のみを反映した対策好適サイトの結果とは大きく異なり、登山口やロープウェイが近い旭岳や黒岳周辺の大雪山北部の優先順位が高くなつた。

本業務ではコストとして、移動時間で測られるアクセスの良さのみを考慮した。しかし、このほかにも、実際の管理作業にかかるコストも考慮が必要である。気候変動影響による高山植物の衰退には、生育環境の緩和（気温上昇・生育期間の増加）によるササ・木本などの競合種の増加、人為的な影響が加わった植生の踏み付けや土壤の踏み固めと集中豪雨による土砂流出など多岐にわたる。そのため、管理作業は、管理の目標や作業を行うサイトの状況によって異なる。たとえば、拡大が著しいチシマザサの刈り取りにおいて高山低木群落の保全を目標とするサイトであれば、機械によるササの刈り取りで済むが、雪田草原の保全のためには、対象を選別しながら手作業での刈り取りが必要となる。また、観光用のサイトであれば植生管理に加え、集中豪雨の影響もふまえた登山道の維持管理や踏みつけを抑制す

るような対策が必要とされる。当該サイトに競合植生が侵入する可能性の大小によってもコストが変化する。今回用いた既存の保護区選択ソフトウェアでは、サイトごとの管理目標の別を考慮できないものであったため、このような目的ごとに異なる多様なコストを評価に含めることができないという限界があった。目的に応じたコスト算入を可能とする新たなソフトウェアの開発が必要である。

(3) 順応的管理導入の必要性

現在入手可能な将来気候シナリオは3次メッシュ (1 km^2) が最高解像度であり、そのために詳細な植物種の分布を予測することには限界がある。特に高山植生の分布に大きく影響を及ぼす積雪量、積雪期間、融雪過程の予測には季節風や微地形の影響が反映されていないことから、将来的なマイクロレフュージアの特定は非常に困難である。このような制約の下で、本報告における対策の優先順位付けにおいては、1つのグリッド内には雪田草原や風衝草原といった性格の異なる植生が混在した状態で扱っているが、それぞれに適した対策は異なる。

よって、高い空間解像度の将来気候シナリオの入手が可能となった段階で、本報告書に示した対策優先順位付けを再度行うことで、より詳細に植生タイプ別の対策を検討することが期待できる。ただし、将来予測においては、移動分散制限や種間競争に起因する植生変化の進行の時間遅れの可能性などは引き続き課題である。ほか、適応策の検討に際しては、RCP 間の結果の大きな違いを考慮し、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が引き続き重要であると考えられる。

5. 謝辞

● 慶良間諸島国立公園

本業務の遂行にあたり、慶良間諸島国立公園の自然保護官（松本 晃 氏、小池 大二郎 氏（当時）、自然保護官補佐（前山 佳子 氏、三石 裕弥香 氏）には現地調査全般および阿嘉島での現地報告会の調整をしていただいたほか、現地に関してご教示頂き大変お世話になりました。一般社団法人座間味村観光協会・さんごゆんたく館 館長の谷口 洋基 氏には現地の状況についてご紹介いただいたほか、現地調査にもご協力いただきました。また、座間味ダイビング協会、あか・げるまダイビング協会、渡嘉敷ダイビング協会には現地調査にあたりお世話になりました。NPO 法人美ら海振興会の会長の松井 さとし 氏、副会長の水野 彰人 氏をはじめ同会の皆様には現地調査およびヒアリングにご協力いただいたほか、現地報告会の場を設けていただいたことをお礼申し上げます。さらに、共同で調査を行い中深度サンゴ群集に関するデータを提供していただいた琉球大学の波利井 佐紀 准教授およびFrederic Sinniger 博士に深く感謝申し上げます。JCOPE-T-NEDO の計算結果は、国立研究開発法人 海洋研究開発機構（JAMSTEC）のアプリケーションラボ（APL） 海洋・大気環境変動予測応用グループから提供していただきました。

● 大雪山国立公園

本業務の遂行にあたり、上川自然保護管事務所、東川自然保護管事務所の皆様には、現地に関してご教示を頂き大変お世話になりました。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提供していただきました。ここに記して謝辞を示します。

6. 引用文献

- Ball, I.R., Possingham H.P., Watts, M. (2009) Marxan and relatives: Software for spatial conservation prioritisation. Chapter 14: Pages 185-195 in Spatial conservation prioritisation: Quantitative methods and computational tools. Eds Moilanen, A., K.A. Wilson, and H.P. Possingham. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Ball, I.R., Possingham H.P., Watts, M. (2009) Marxan and relatives: Software for spatial conservation prioritisation. Chapter 14: Pages 185-195 in Spatial conservation prioritisation: Quantitative methods and computational tools. Eds Moilanen, A., K.A. Wilson, and H.P. Possingham. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Bernardo, L.P.C., Nadaoka, K., Nakamura, T., Watanabe, A. (2017) Island-enhanced cooling mechanism in typhoon events revealed by field observations and numerical simulations for a coral reef area, Sekisei Lagoon, Japan. *Ocean Dynamics*, doi:10.1007/s10236-017-1096-6.
- Blumberg, A.F., Mellor, G.L. (1987) A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Heaps, N. (Ed.), *Three-dimensional Coastal Ocean Models*, pp. 1-16 (Pub. AUG).
- Bongaerts, P., Muir, P., Englebert, N., Bridge, T.C.L., Hoegh-Guldberg, O. (2013) Cyclone damage at mesophotic depths on Myrmidon Reef (GBR). *Coral Reefs*, 32, 935-935.
- Brown, B., Dunne, R., Goodson, M., Douglas, A. (2002) Experience shapes the susceptibility of a reef coral to bleaching. *Coral Reefs*, 21, 119–126.
- Elith, J., Kearney, M., Phillips, S. (2010) The art of modelling range-shifting species. *Methods in Ecology and Evolution*, 1, 330-342.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E., Yates, C.J. (2011) A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17, 43-57.
- Figueiredo, J., Baird, A.H., Harii, S., Connolly, S.R. (2014) Increased local retention of reef coral larvae as a result of ocean warming. *Nature Climate Change*, 4, 498-502.
- Frade, P.R., Bongaerts, P., Englebert, N., Rogers, A., Gonzalez-Rivero, M., Hoegh-Guldberg, O. (2018) Deep reefs of the Great Barrier Reef offer limited thermal refuge during mass coral bleaching. *Nature Communications*, 9, 3447, doi:10.1038/s41467-018-05741-0.
- Hayashibara, T., Shimoike, K., Kimura, T., Hosaka, S., Heyward, A., Harrison, P., Kudo, K., Omori, M. (1993) Patterns of coral spawning at Akajima Island ￥, Okinawa, Japan. *Marine Ecology Progress Series*, 101, 253-262.
- Hinderstein, L.M., Marr, J.C.A., Martinez, F.A., Dowgiallo, M.J., Puglise, K.A., Pyle, R.L., Zawada, D.G., Appeldoorn, R. (2010) Theme section on “Mesophotic Coral Ecosystems: Characterization, Ecology, and Management”. *Coral Reefs*, 29, 247-251.
- Hokstein, D.M., Paris, C.B., Smith, T.B. (2016) Modeling vertical coral connectivity and mesophotic refugia. *Coral Reefs*, 35, 23-37.

- Hongo, C., Yamano, H. (2003) Species-specific responses of corals to bleaching events on anthropogenically turbid reefs on Okinawa Island, Japan, over a 15-year period (1995-2009). PLoS ONE, 8, e60952.
- Hughes, T.P., Kerry, J.T., Connolly, S.R., Baird, A.H., Eakin, C.M., Heron, S.F., Hoey, A.S., Hoogenboom, M.O., Jacobson, M., Liu, G., Pratchett, M.S., Skirving, W., Torda, G. (in press) Ecological memory modifies the cumulative impact of recurrent climate extremes. *Nature Climate Change*, DOI 10.1038/s41558-018-0351-2.
- Kleypas, J.A., McManus, J.W., Meñez, L.A.B. (1999) Environmental limits to coral reef development: Where do we draw the line? *American Zoologist*, 39, 146-159.
- Kudo, G., Kawai, Y., Amagai, Y., Winkler, D. E. (2017) Degradation and recovery of an alpine plant community: experimental removal of an encroaching dwarf bamboo. *Alpine Botany*, 127, 1, 75-83.
- Kumagai, N., Yamano, H., Sango-Map-Project (2018) High-resolution modeling of thermal thresholds and environmental influences on coral bleaching for local and regional reef management. *PeerJ*, 6, e4382, DOI 10.7717/peerj.4382.
- Kuroda, H., Stou, T., Kakehi, S., Ito, S., Taneda, T., Azumaya, T., Inagake, D., Hiroe, Y., Morinaga, K., Okazaki, M., Yokota, T., Okunishi, T., Aoki, K., Shimizu, Y., Hasegawa, D., Watanabe, T. (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.
- Miyazawa, Y., Varlamov, S.M., Miyama, T., Guo, X., Hihara, T., Kiyomatsu, K., Kachi, M., Kurihara, Y., Murakami, H. (2017) Assimilation of high-resolution sea surface temperature data into an operational nowcast/forecast system around Japan using a multi-scale three-dimensional variational scheme. *Ocean Dynamics*, 67, 713-728.
- Miyazawa, Y., Zhang, R., Guo, X., Tamura, H., Ambe, D., Lee, J.-S., Okuno, A., Yoshinari, H., Setou, T., Komatsu, K. (2009) Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. *Journal of Oceanography*, 65, 737-756.
- 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, M., Ohki, S., Suzuki, A., Sakai, K. (2011) Coral larvae under acidification: survival, metabolism, and metamorphosis. *PLoS ONE*, 6, e14521.
- Nishikawa, A., Katoh, M., Sakai, K. (2003) Larval settlement rates and gene flow of broadcast-spawning (*Acropora tenuis*) and planula-brooding (*Stylophora pistillata*) corals. *Marine Ecology Progress Series*, 256, 87-97.
- Prasetya, 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.
- Sakamoto, T.T., Hasumi, H., Ishii, M., Emori, S., Suzuki, T., Nishimura, T., Sumi, A. (2005) Responses

- of the Kuroshio and the Kuroshio Extension to global warming in a high-resolution climate model. *Geophysical Research Letters*, 32, L14617, doi:10.1029/2005GL023384.
- 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.
- Thomas, C.J., Bridge, T.C.L., Figueiredo, J., Deleersnijder, E., Hanert, E. (2015) Connectivity between submerged and near-sea-surface coral reefs: can submerged reef populations act as refuges? *Diversity and Distributions*, 21, 1254-1266.
- Varlamov, S.M., Guo, X., Miyama, T., Ichikawa, K., Waseda, T., Miyazawa, Y. (2015) M_2 baroclinic tide variability modulated by the ocean circulation south of Japan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120, 3691-3710, doi:10.1002/2015JC010739.
- Winkler, D.E., Amagai, Y., Huxman, T. E., Kaneko, M., Kudo, G. (2016) Seasonal dry-down rates and high stress tolerance promote bamboo invasion above and below treeline. *Plant Ecology*, 217, 10, 1219-1234.
- 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.
- 石濱史子 (2014) 生物多様性と生態系サービスの保全を両立する保護区選択のために. *環境情報科学*, 43, 41-46.
- 飯田博之・磯田豊・小林直人・堀尾一樹 (2018) 宗谷暖流沖合域の冷水帯を伴った日周期渦流の観測とモデル実験. *海の研究*, 27, 155-174.
- 内山雄介・小谷瑳千花・山西琢文・上平雄基・御手洗哲司 (2016) 黒潮暖流波及に伴う沖縄本島周辺海域における非対称海洋構造の形成機構. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 72, 481-486.
- 大井次三郎 (著)・北川政夫 (改訂) (1992). *新日本植物誌顕花篇. 改訂増補新版.* 至文堂, 東京.
- 沖縄県自然保護課 (2017) 有性生殖によるサンゴ種苗生産等に関する委託業務 報告書.
- 大見謝辰男 (2003) 赤土等の流出によるサンゴ礁の汚染. *沿岸海洋研究*, 40, 141-148.
- 金子正美・星野仏方・雨谷教弘 (2014) 空間情報を用いた高山帯の植生変化と環境変動のセシサス. *地球環境*, 19-1, 13-21.
- 上平雄基・内山雄介・御手洗哲司・仲田尚平 (2015) 琉球諸島周辺海域における eddy heat flux を用いたサブメソスケール乱流混合強化メカニズムの解析. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 71, 1219-1224.
- 木村匡・林原毅・下池和幸 (1992) 漂流ハガキ実験結果報告. みどりいし, 3, 18-21.
- 金城孝一 (2017) 陸尉からの環境負荷対策について. *日本サンゴ礁学会誌*, 19, 87-94.
- 下池和幸 (1999) 慶良間列島阿嘉島において新たに確認されたイシサンゴ類の産卵と産卵パ

ターン. みどりいし, 10, 29-31.

白木喜章・柴木秀之 (2010) 全球潮汐計算を利用した日本沿岸の広域潮汐計算について. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 66, 226-230.

仲座栄三・津嘉山正光・川満康智・砂川恵輝・北村康司・川上和宏 (1999) 定点観測データから捉えたサンゴ白化の一因としての海水温の変化について. 海岸工学論文集, 46, 1236-1240.

中村崇 (2012) 造礁サンゴにおける温度ストレスの生理学的影響と生態学的影響. 海の研究, 21, 131-144.

灘岡和夫・鈴木庸壱・西本拓馬・田村仁・宮澤泰正・安田仁奈 (2006) 広域沿岸生態系ネットワーク解明にむけての琉球列島周辺の海水流動と浮遊幼生輸送解析. 海岸工学論文集, 53, 1151-1155.

灘岡和夫・波利井佐紀・三井順・田村仁・花田岳・Enrico 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.

灘岡和夫・若木研水・鹿熊信一郎・二瓶泰雄・諸見里聰・大見謝辰男・岩尾研二・下池和幸・谷口洋基・中野義勝・池間健晴 (2001) 広域水温モニタリングネットワーク展開による沖縄サンゴ礁水温環境地域差の解析. 海岸工学論文集, 48, 1276-1280.

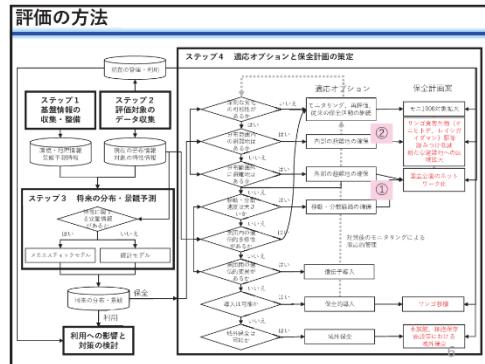
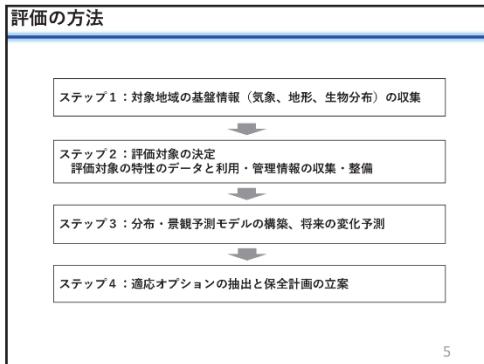
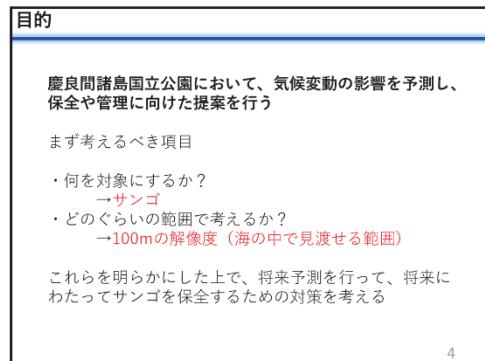
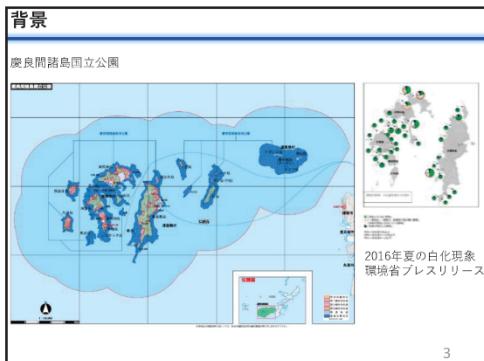
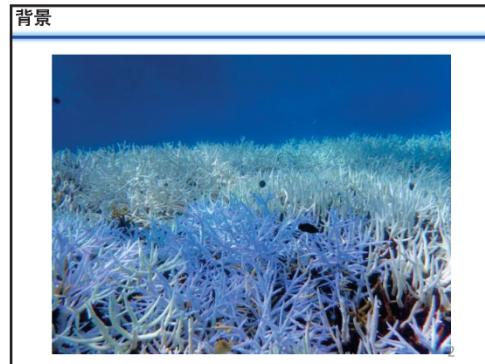
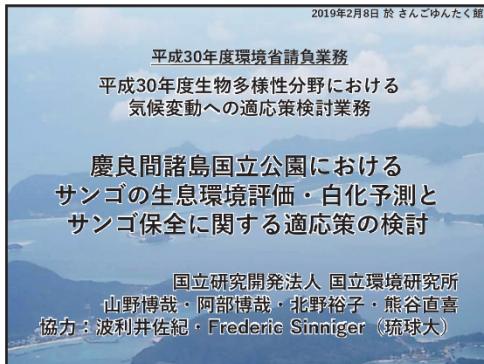
馬場康之・水谷英朗・久保輝広・内山雄介・森信人・渡部靖憲・大塚淳一・山田朋人・猿渡亜由未・二宮順一 (2014) 台風通過に伴う田辺湾湾口部における海水温変化について. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 70, 476-480.

波利井佐紀 (2008) 造礁サンゴ幼生の分散過程: 分散範囲を規定する幼生の定着可能期間とエネルギー源. *Sessile Organisms*, 25, 1-10.

日向博文・戸簾幸嗣 (2005) 東京湾におけるアサリ幼生の移流過程の数値計算. 水産総合研究センター研究報告 別冊, 3, 59-66.

松葉史紗子・赤坂宗光・宮下直 (2015) Marxan による効率的な保全計画: その原理と適用事例. 保全生態学研究, 20, 35-47.

付録1 慶良間諸島国立公園のサンゴ保全関係者による情報交換会にて用いた説明素材



業務概要

- ①外部の避難地の確保、移動・分散経路の確保：慶良間諸島国立公園と他の海域のつながり
 - サンゴ幼生分散シミュレーション
- ②内部の避難地の確保：白化や死亡しにくい場所
 - 高解像度生息環境モデリング
 - 高解像度白化・死亡推定モデリング
- ③内部の避難地の確保：新たな避難地
 - 中深度サンゴ群集の探索

将来的に保全を重点的に行うべき場所を示す

①慶良間諸島国立公園と他の海域のつながり

8

サンゴ幼生の分散シミュレーション①

サンゴの浮遊幼生に見立てた仮想粒子の挙動を追跡する

使用したデータセット

モデル：JCOPE-T-NEDO (Varlamov et al., 2015)

計算領域：日本周辺

空間解像度：1/36度

(約3 km)

潮流：有

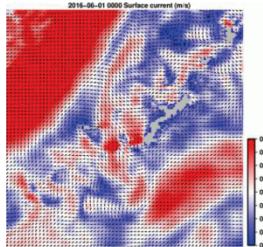
海洋研究開発機構 (JAMSTEC)

のアプリケーションラボ (APL)

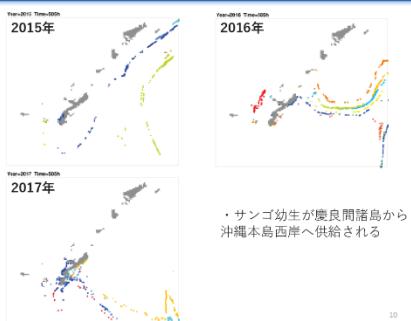
よりデータ提供

計算条件

6月の満月時の深夜に慶良間諸島内の13地点から一斉に粒子を放出



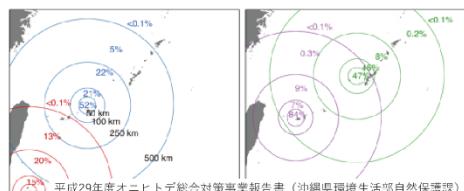
粒子の挙動（2015～2017年）2週間後の位置



10

サンゴ幼生の分散シミュレーション②

HYCOM（水平解像度約9km）による到達確率計算結果



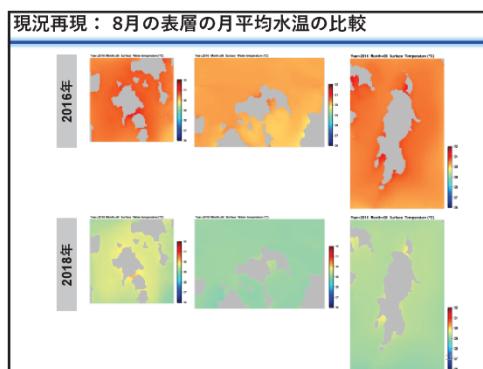
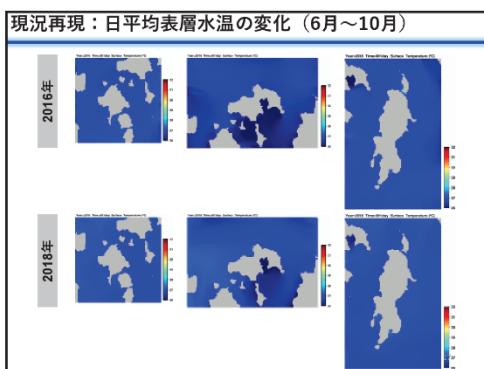
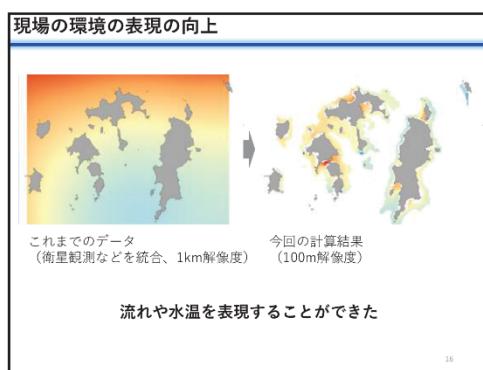
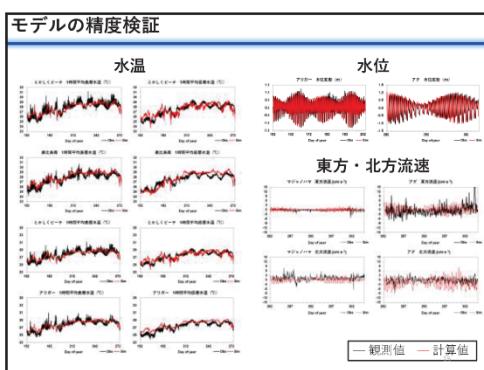
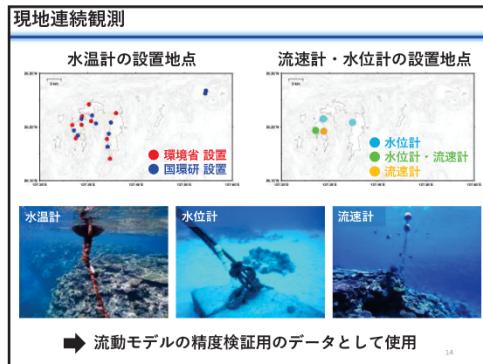
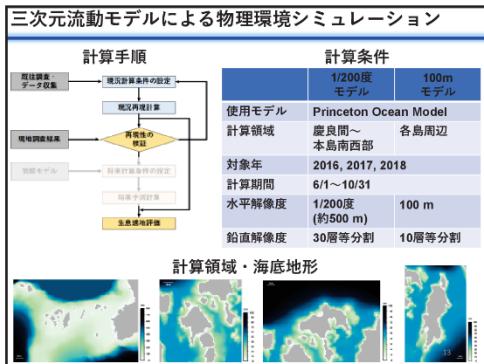
・他の海域から慶良間諸島に供給されるサンゴ幼生は少ない

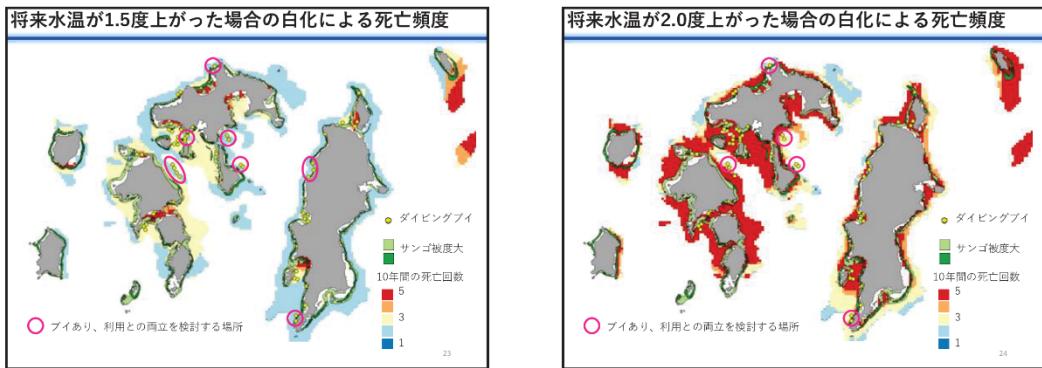
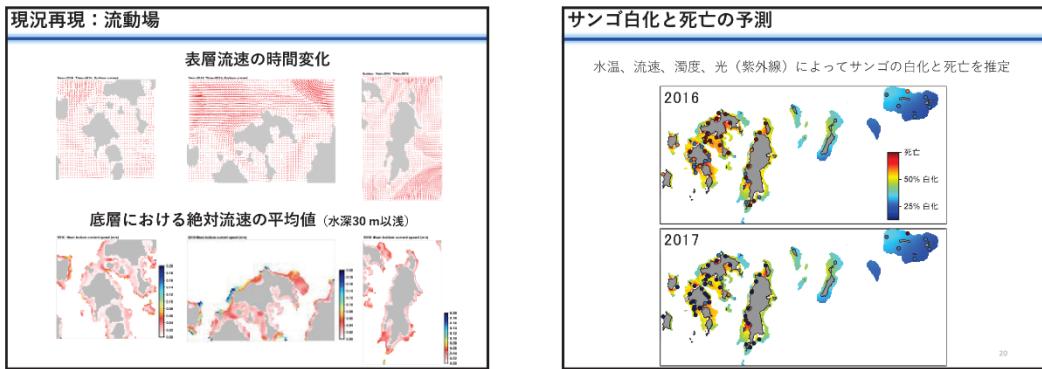
・慶良間諸島で生まれ慶良間諸島内にとどまるサンゴ幼生が多い

慶良間諸島国立公園内での保全を第一に考える必要がある

②白化や死亡しにくい場所

12





②新たな避難地

25

30m以深の中深度サンゴ群集の探索

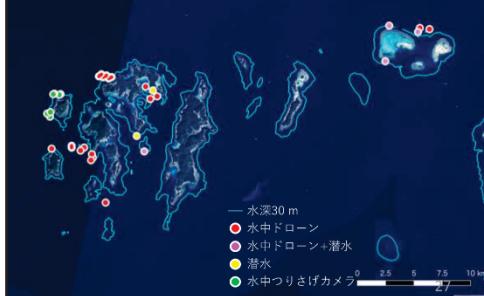
海域公園の範囲は水深30mまで：
もっと深いところにもサンゴがいるのでは？



26

中深度調査を行った地点

- 水深 30-70 m の地点で調査



中深度サンゴの出現状況



中深度サンゴ群集の様子

留加比の鼻 南側 水深30 m ~ 群集は水深40 m 付近まで広がる
トゲミドリイシ属およびヒメエダセンベイサンゴが優占する



ヒメエダセンベイサンゴ

トゲミドリイシ属

撮影: Frederic Signiger

中深度サンゴ群集の生息環境の特徴

● 表層と比べて夏季の水温上昇が穢やか

鹿児島島西部 (水深70m) における日平均水温の計算値



● 表層と比べて光が届きにくい

浅いところと異なる種が分布する可能性あり
→さらなる調査が必要

サンゴの避難地や幼生供給地になりうるのであれば、
海域公園区域の拡大が検討可能？

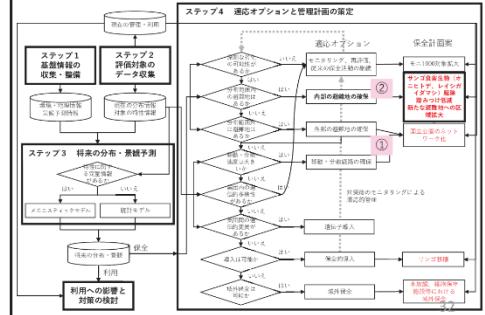
30

本業務のまとめ

- ①外部の避難地の確保、移動・分散経路の確保：慶良間諸島国立公園と他の海域のつながり
 - ・慶良間諸島国立公園内の保全を第一に考える必要あり
- ②内部の避難地の確保：白化や死亡しにくい場所
 - ・水温と流れによって白化や死亡しにくい場所を検出
- ③内部の避難地の確保：新たな避難地
 - ・慶良間諸島国立公園内に中深度サンゴ群集を発見

31

本業務のまとめ

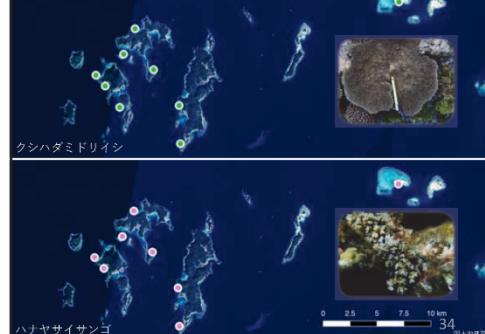


今後の課題

- 【不確実性の評価】**
 - ・水温上昇に対する応答は種によって異なる
 - ・水温上昇シナリオの検討
 - ・サンゴが水温上昇に適応する可能性
- 【予測結果の検証・精度向上】**
 - ・白化の予測の向上
 - ・慶良間諸島内のサンゴ幼生の分散
- 【中深度サンゴ群集に関する知見の拡充】**
 - ・中深度サンゴ群集のさらなる探索・調査

33

採取を行った地点



DNA解析



97

謝辞

本報告をまとめるにあたっては、多くの
方々からのご協力、ご助言を頂きました。
深く感謝申し上げます。

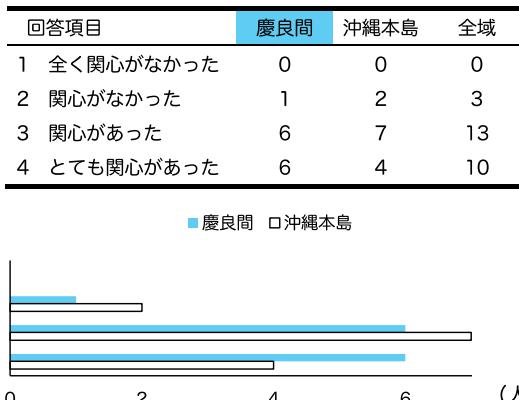
36

付録2 慶良間諸島国立公園の現地説明会の際に実施したアンケートの内容とその回答結果

慶良間諸島国立公園における気候変動の影響に関するアンケート 集計結果 国立環境研究所 山野博哉

慶良間諸島国立公園の保全・再生に係る情報連絡会（2019年2月8日）にて17名に配布し13名から得られた回答（慶良間）および、美ら海振興会の会員らへの研究成果報告（2019年2月13日）の場で13名に配布し13名から得られた回答（沖縄本島）の、合計26回答について簡易集計を行なった。

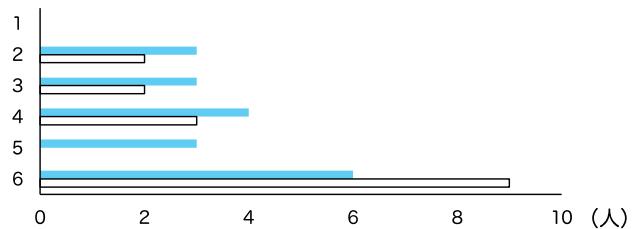
問1 あなたは慶良間諸島における気候変動の影響について、以前から関心がありましたか？当てはまる番号 1つ に○をつけて下さい。



問2 今回の報告内容の中であなたが特に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。※6名が複数回答

回答番号	慶良間	沖縄本島	全域
1 印象に残っているものはない	0	0	0
2 慶良間諸島と他海域とのつながり	3	2	5
3 水温と流れの再現	3	2	5
4 サンゴの白化と死亡の予測	4	3	7
5 重点保全地域の絞り込み	3	0	3
6 中深度のサンゴの観察	6	9	15

■ 慶良間 □ 沖縄本島

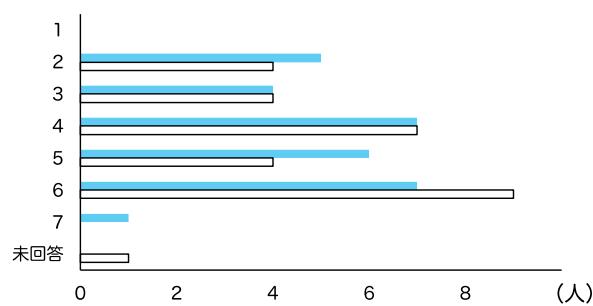


問3 今回の報告内容について、あなたがより詳しく知りたいと感じたものは何ですか？当てはまる番号 全て に○をつけて下さい。

回答番号	慶良間	沖縄本島	全域
1 詳しく知りたいものはない	0	0	0
2 慶良間諸島と他海域とのつながり	5	4	9
3 水温と流れの再現	4	4	8
4 サンゴの白化と死亡の予測	7	7	14
5 重点保全地域の絞り込み	6	4	10
6 中深度のサンゴの観察	7	9	16
7 その他	1	0	1
未回答	0	1	1

その他：・環境教育に結びつけたい

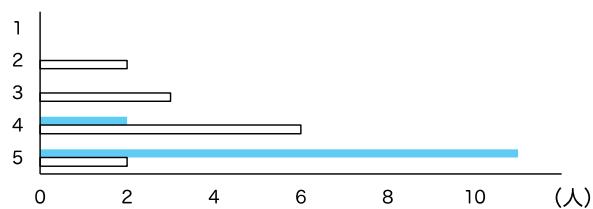
■ 慶良間 □ 沖縄本島



問4 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。

回答番号	慶良間	沖縄本島	全域
1 全く役に立たない	0	0	0
2 あまり役に立たない	0	2	2
3 どちらとも言えない	0	3	3
4 少しは役に立つ	2	6	8
5 とても役に立つ	11	2	13

■慶良間 □沖縄本島

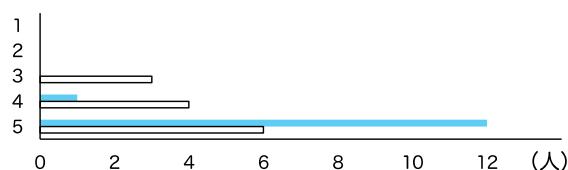


3と回答した人のコメント：個人の行動とは結びつかないかな…

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。

回答番号	慶良間	沖縄本島	全域
1 全く関係しない	0	0	0
2 ほとんど関係しない	0	0	0
3 どちらとも言えない	0	3	3
4 少し関係する	1	4	5
5 とても関係する	12	6	18

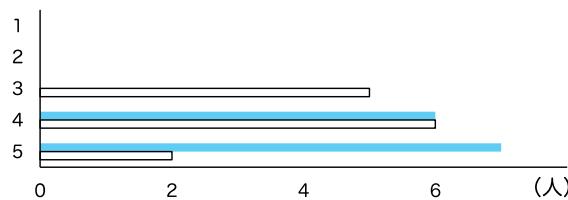
■慶良間 □沖縄本島



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。

回答番号	慶良間	沖縄本島	全域
1 全く満足していない	0	0	0
2 満足していない	0	0	0
3 どちらとも言えない	0	5	5
4 満足した	6	6	12
5 とても満足した	7	2	9

■慶良間 □沖縄本島



3を選んだ理由：

- ・今後の研究結果報告を楽しみにしています
- ・知識としてすごく興味深いことが多いが、現場の人間が何をやればサンゴ保全につながるのかを知りたかった。またレイシガイやオニヒトデなどのくじょを何度も行っているが、効果があるのか知りたい。
- ・もう少しわかりやすい説明が欲しかった。時間が短いです。

4を選んだ理由：

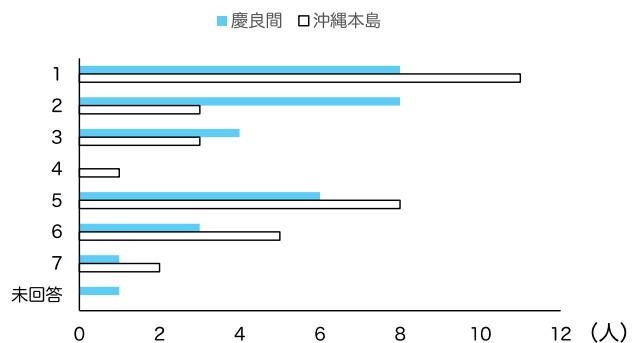
- ・温度変化によるサンゴの生死予想
- ・種苗生産する意味あるかもしれない（沖縄本島へケラマのサンゴが行ってるなら）
- ・白化、死亡予測が分かれば、普段の駆除活動を行う場所の参考の1つになる。

5を選んだ理由：

- ・海水温の1.5°Cと2.0°Cの上昇で死亡率がかなり違うことに衝撃を受けた。
- ・ケラマの具体的な話でとても身近で分かりやすかったです。

問7 慶良間諸島におけるサンゴ保全のための取り組みとして望ましいと思われるものに 全て に○をつけて下さい。

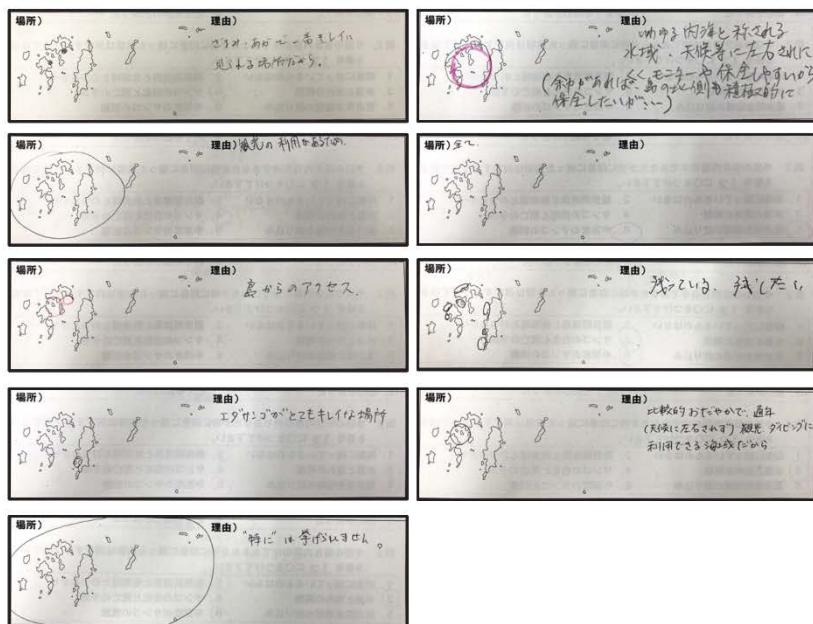
回答番号	慶良間	沖縄本島	全域
1 オニヒトデ・巻貝類駆除	8	11	19
2 観光利用制限	8	3	11
3 排水規制	4	3	7
4 遮光	0	1	1
5 使い捨てプラスチック製品の規制	6	8	14
6 有害成分を含む日焼け止めの規制	3	5	8
7 その他	1	2	3
未回答	1	0	1



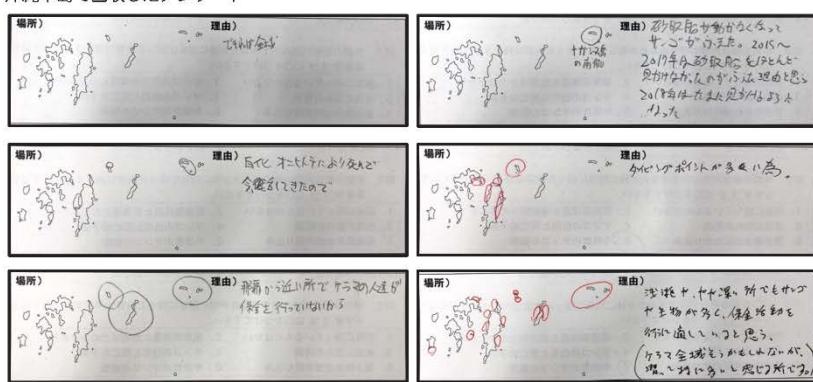
- その他：
 ・環境教育
 ・砂取船の禁止
 ・つり糸や漁網のとり除くのをやった方がいい

問8 慶良間諸島においてあなたが特に保全したい場所はどこですか？その理由もあわせてお答え下さい。(地図上に○を記入ください)

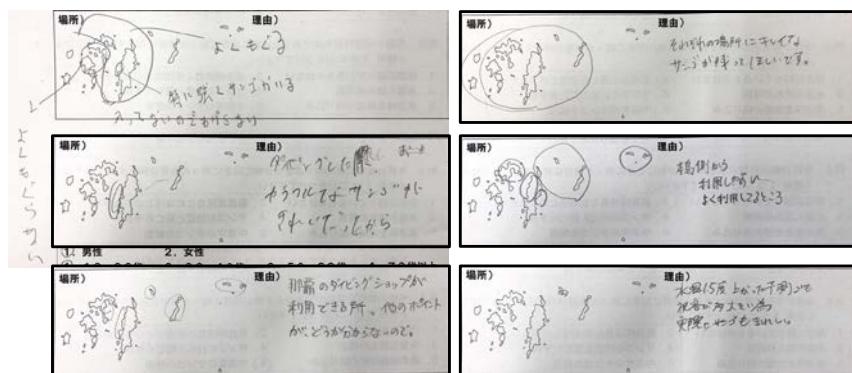
慶良間で回収したアンケート



沖縄本島で回収したアンケート



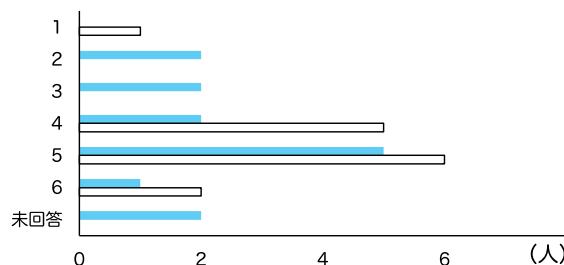
沖縄本島で回収したアンケート（つづき）



問9 慶良間諸島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 に○をつけて下さい。※2名が複数回答

回答番号	慶良間	沖縄本島	全域
1 NPO	0	1	1
2 民間企業（観光業者）	2	0	2
3 市町村	2	0	2
4 沖縄県	2	5	7
5 環境省	5	6	11
6 その他	1	2	3
未回答	2	0	2

■慶良間 □沖縄本島



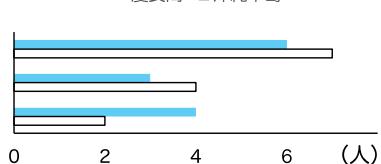
- その他：
- ・地元住民
 - ・全ての業者で協力して欲しい
 - ・1カ所ではなく、いくつかで

問10 あなたの性別・年齢について、当てはまる番号にそれぞれ○をつけて下さい。

性別

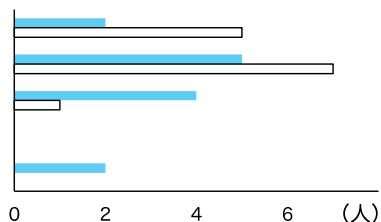
回答	慶良間	沖縄本島	全域
男性	6	7	13
女性	3	4	7
未回答	4	2	6

■慶良間 □沖縄本島



年齢

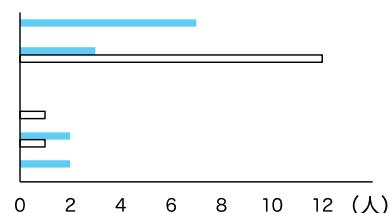
回答	慶良間	沖縄本島	全域
10-20代	2	5	7
30-40代	5	7	12
50-60代	4	1	5
70代以上	0	0	0
未回答	2	0	2



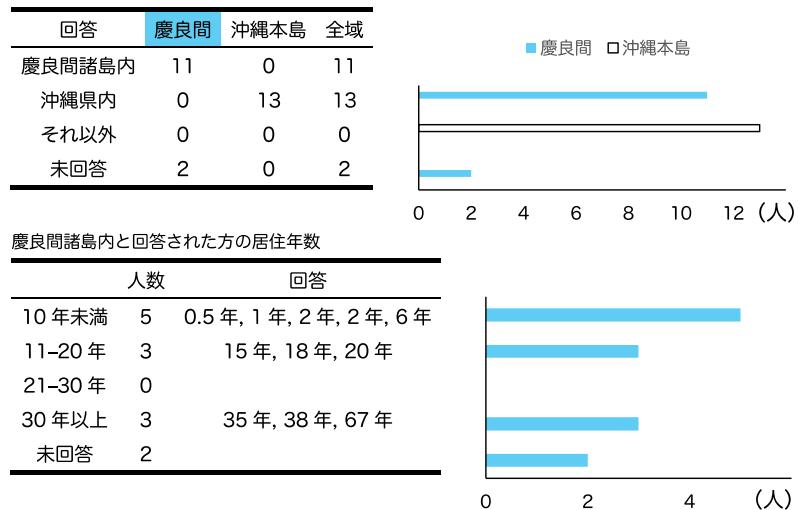
問11 あなたのご職業について、当てはまる番号 全て に○をつけて下さい。

回答	慶良間	沖縄本島	全域
公務員	7	0	7
ガイド・観光業	3	12	15
研究者	0	0	0
NPO・NGO	0	1	1
その他	2	1	3
未回答	2	0	2

■慶良間 □沖縄本島



問12 あなたの現在のお住まいはどちらですか?
また、慶良間諸島内の場合は、居住年数もお答え下さい。



これで本アンケートは終了です。ご協力いただきありがとうございました。
ご意見・ご質問等ございましたら以下に自由にお書きください。※原文ママ

- ・とても勉強になりました。ありがとうございました。
- ・慶良間諸島と沖縄本島のサンゴのDNAの解析が待ちどおしい。
- ・「ブイあり、利用との両立を検討する場所」がよくわからなかった。
- ・今後温暖化になっても少しでもサンゴがキレイな状態が保たれるように協力したいです。
- ・保全は月一でやってますが、そのデータは役に立っているのか 連続で同じポイントに入ってデータを取った方が良いのでは?→2日連続で同じポイントに入り、オニや貝などの出現率を調べる 月一ではデータがとれないようにもみえる

付録3 大雪山国立公園の自然環境の保全に関するアンケート調査の内容と集計結果

大雪山国立公園の自然環境の保全に関するアンケート調査

この調査は、**大雪山国立公園**に来られた皆様の自然環境の保全に関する皆様の考え方や認識を把握することを目的に実施しております。回答用紙は6ページございます、皆様のご意見をできる限り有効に分析するため、どうか最後まで質問にお答え下さいよう、ご協力をお願い致します。この調査の結果は統計的に処理されるため、個人の回答が公表されるようなことはございません。どうぞよろしくお願ひ致します。

問3 大雪山国立公園への訪問動機について、当てはまる番号それぞれ1に○をつけて下さい。

	全くそう		どちらとも 言えない		とても そう思う	
	思わない	ない	言えない	ない	そう思う	ない
自然の美しさを眺める	1	2	3	4	5	6
自然の中で高山植物などの野生の植物を見る	1	2	3	4	5	6
自然の中で野生動物を見る	1	2	3	4	5	6
自然の中で体験や活動を行う	1	2	3	4	5	6
自分の体力や技術を試す	1	2	3	4	5	6
自然の中で自分だけの時間を楽しむ	1	2	3	4	5	6
友達や家族と一緒に過ごす	1	2	3	4	5	6
日ごろの疲れを癒す	1	2	3	4	5	6

問4 あなたは、過去に大雪山国立公園に訪れたことがありますか？ 当てはまる番号1つに○をつけて下さい。また、これまでに訪れたことがある方は、最初に訪れたのがおよそ何年前か教えて下さい。

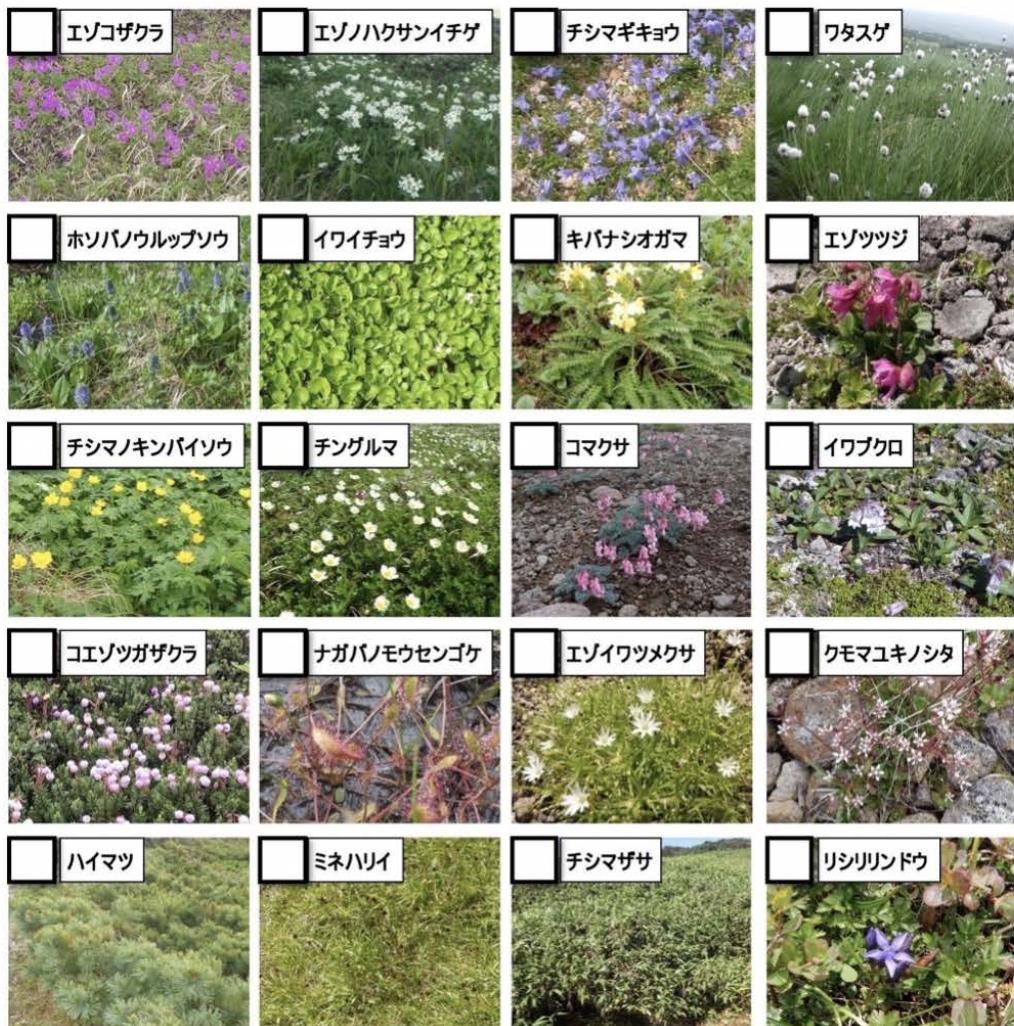
- これまでに訪れたことがある（およそ_____年前にはじめて大雪山を訪れた）
- 今回の訪問がはじめて

付録3 実際に使用した調査票の例（本業務に関連部分のみ抜粋）

ここでは皆様に大雪山の花や植物についてはお伺いします。大雪山国立公園では夏季を中心に色彩豊かな様々な花々や植物の観察を楽しむことが可能です。

問7以下の花の中で、あなたが「見たい」と思う花や植物すべてに(名前の横の□に○)をつけて下さい。

また、この中に見たいものがない場合は、「上記に見たい花や植物はない」に○をつけて下さい。



上記に
見たい花や植物
はない

付録 3つづき

最後に皆さんについてお伺いします。

問16 あなたの性別、年齢について、当てはまる番号それぞれ1つに○をつけて下さい。

1. 男性 2. 女性 3. その他

問17 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) 2. 北海道以外(都・府・県)

問19 答えをなれば、あなたの最終学歴について、当てはまる番号1つに○をつけて下さい。)

1. 中学卒業 2. 高校卒業 3. 専門学校卒業 4. 短大卒業 5. 大学卒業
6. 大学院(修士)卒業 7. 大学院(博士)卒業 8. その他(具体的に)

問21 差し支えなければ、あなたのご家庭の年収（年金も含みます）について、当てはまる番号1つに○をつけて下さい。（この項目は社会経済的な統計分析を行うためのものです）

1. 200万円以下 2. 201-400万円 3. 401-600万円
4. 601-800万円 5. 801-1,000万円 6. 1,001-1,200万円
7. 1,201-1,400万円 8. 1,401-1,600万円 9. 1,601-1,800万円
10. 1,801万円以上(具体的に 万円程度)

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。

付録4. 国立公園等の保護区における気候変動への適応策検討に係わる手引き



Contents

写真でみる生物多様性への気候変動の影響	
概要—Executive Summary—	1
1. 気候変動の影響に適応する	3
1-1 なぜ気候変動への適応か	5
気候変動の現状	5
気候変動への2つの対策	7
世界の適応への取組	7
日本の適応への取組	7
1-2 自然生態系分野における適応策の考え方	8
自然生態系への気候変動の影響	10
自然生態系への影響の特徴	12
気候変動への適応の基本的考え方	12
適応策の検討で考慮すべきこと	12
1-3 本手続きのねらい	12
2. 国立公園等の保護区における適応策検討のステップ	15
2-1 適応策検討のステップ	15
2-2 ステップ1：基礎情報の収集・整備	17
2-3 ステップ2：評価対象のデータ収集	20
2-4 ステップ3：将来の分布・景観予測	22
2-5 ステップ4：適応オプションの検討	24
2-6 ステップ5：関係者の認識や意見の把握と計画の検討	25
2-7 ステップ6：保全や利用に関する計画の策定	26
2-8 ステップ7：順応的管理	26
3. モデル保護区における事例	27
3-1 大雪山国立公園	29
3-2 慶良間諸島国立公園	40
4. 参考文献	49

海水温の上昇によって
サンゴが白化する現象が確認されています。
この白化現象が長く続くと、サンゴは死んでしまいます。



サンゴに共生する細虫藻が暖温などのストレスによって死かするとサンゴ骨骼の白い色が目立つ白化が起ります。

サンゴ礁は熱帯や亜熱帯の海岸を構成し、人々はそれを漁場やリクリエーションの場として利用しています。

概要 – Executive Summary –



(撮影：国立公園局研究室)

近年、世界各地で集中豪雨、干ばつや熱波などの極端な気象現象による災害が発生して、甚大な被害を引き起こしています。日本各地においても、気温上昇や大雨の多発などによって、農作物の品質低下、動植物の分布変化、熱中症リスクの増加といった影響が懸念されています。自然生態系に関しては日本国内の様々な地域で影響が拡大するところであり、気候変動の影響への適応策を策定することが必要となります。今後は日本国内の様々な地域で影響が拡大するところであり、気候変動の影響への適応策を策定することが必要となります。2018年12月に「気候変動適応法」が施行され、気候変動の影響による被害を防止・軽減することが求められています。

本手引きは、国立公園等の保護区の管理に従事する方々に、自然生態系分野における気候変動の影響への適応策を初めていただき、気候変動による将来の変化を考慮して、調査や分析に関する研究者や各地域の研究機関、コンサルタント会社等と連携し、保護区の保全や利用を考える際に参考としていただくことを目的に作成されました。

国立公園等の保護区において、気候変動の影響への適応策を策定する手順を7つのステップとしてフロー図で示し、各ステップで具体的に必要となるデータや考慮すべきことを示しました。具体的には、対象となる保護区の基盤情報を収集し、既に気候変動の影響による変化が顕在化している、または懸念されている評価指標を現地のヒアリングなどを通じて決定し、その評価対象について将来の気候シナリオによる予測を行い、予測結果に基づいて適応オプションを検討し、関係者との意見交換を行って保全や利用に関する計画を策定するという手順で進めます。

大雪山国立公園において雪山植生を対象に、豊原制作者局立公園においてサンゴを対象にして以上の手順を実際にを行い、手順の有効性を確認しました。今後、この手引きの他の保護区への活用が期待されます。

1

1. 気候変動の影響に適応する

- 1-1 なぜ気候変動への適応か
- 1-2 自然生態系分野における適応策の考え方
- 1-3 本手引きのねらい

1-1 なぜ気候変動への適応か

気候変動の現状

近年、世界各地で集中豪雨、干ばつや熱波などの極端な気象現象による災害が発生し、重大な被害を引きこしめています。日本各地においても、気温上昇や大雨の多発などによって、農作物の品質低下、動物の分布域変化、熱中症リスクの増加といった影響が現れています。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、(i) 1950年以降に観測された気象現象や変化の多くは数千年から数千年によつて、農作物の品質低下、動物の分布域変化、熱中症リスクの増加といった影響が現れています。

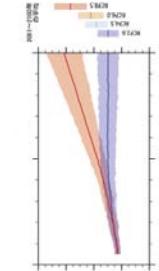


図 1-1 1986～2005 年平均に対する世界平均海面の変化（出典：IPCC AR5）

IPCC 第 5 次評価報告書によれば、2081 年から 2100 年の世界全体の平均気温は、1986 年から 2005 年の平均より、最小で 0.3°C、最大で 4.8°C 上昇すると予測されています（図 1-1）。予測には、0.3-4.8°C と開きがあるのは、温暖化対策の実施の仕方による「シナリオ」が異なるためです（図 1-2 参照）。現在のように温室効果ガスを排出し続けた場合の RCP8.5 シナリオでは、2.6-4.8°C の気温上昇が予測されています。一方、21

コラム 1 気候変動を評価する国連組織ーIPCCー

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、世界気象機関（WMO）および国連環境機関（UNEP）によって設立された国際的組織です。各国の政府から推薦された科学者のほか、地球温暖化に関する学的・技術的・社会経済的な評価を行い、選られた専門家を、政策決定者を評議会に招く形で組織されています。

コラム 2 RCP シナリオとは

将来起こる状況を想定して見通しを「シナリオ」と言います。要素について、は、様々な確定期要素が存在し、将来的な気温の上昇量、技術革新、生活様式、経済発展、温暖化緩和政策などに大きく依存します。このうち、RCP8.5 は 2100 年における温室効果ガスの排出量が最大となるシナリオ、それらの間に、2100 年以前に政府が実施する RCP4.5 と、RCP4.5 と同レベルで安定化する RCP6 のが位置付けられます。

2015 年に開催された国連気候変動枠組機関第 21 回締結会議（COP21）では、「パリ協定」が批准されました。パリ協定では、世界全体の平均気温上昇を 2°C 以下に抑えるか低温化を引き起こす結果（パリ協定）では、世界全体の平均気温上昇を 1.5°C 以下に抑える必要があります。このため、温室効果ガスの削減を前提として、将来の温室効果ガス安定化レベルと、そこによるまでの経済の発展を実現するためのシナリオが作られています。IPCC は専門家の要請を受けて、そこには至る温室効果ガスの排出路による統合報告書（1.5°C 対応報告書）を取りまとめました。

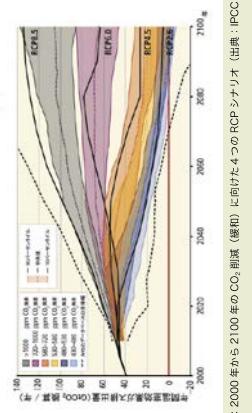


図 1-3 2000 年から 2100 年の CO₂ 削減（緩和）に向けた 4 つの RCP シナリオ（出典：IPCC AR5）

気候変動の影響に適応する

なぜ気候変動への適応か

気候変動の現状

近年、世界の気温は、1986 年から 2005 年の間に約 0.3-1.7°C 上昇しました。この気温上昇が、世界の平均気温の変化（出典：IPCC AR5）

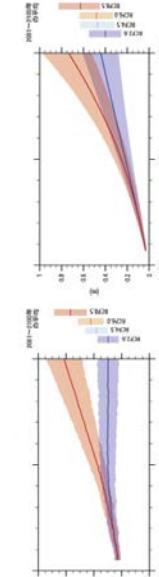
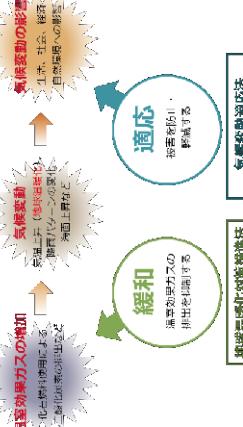


図 1-2 1986～2005 年平均に対する世界平均気温の変化（出典：IPCC AR5）

世紀末に温室効果ガスの排出をほぼゼロにした場合の RCP2.6 シナリオでは、0.3-1.7°C の気温上昇が想定されています。また、海面水位の上昇も予測されており、21 世紀末には、世界の平均海面水位は、RCP8.5 シナリオの場合、45-82cm 上昇すると予測されており、RCP2.6 シナリオの場合、26-55cm 上昇すると予測されています（図 1-2）。

気候変動への2つの対策

21世紀に向けるに際して、気候変動の影響のリスクが高くなること予測されています。そこで、気候変動に対する対応は、経済面だけでなく、社会面の両方を進めることが求められています。また、気候変動の影響は自らも連鎖的に様々なあるため、あらかるる場所で有効な適応策というものがあります。そのため、それらの国や地域に適した法規制の制定や社会システムの整備等の適応策を講じていく必要があります。



111

中国小面組

日本の適応への取組

2015年11月に初めて国内の巡回講習会が開催されましたが、50名を越す日本・海外で構成団体が参加するなど、大きな反響となりました。巡回講習会では、各々の影響力・ネットワーキング力に特化した評議会を実施するところも、今後、多くの評議会・ワークショップに反映されるものと期待されています。

國會、電信、郵政

気候変動の影響に適応する

自然生態系で予測される影響

気候変動の影響が現れる条件や範囲は、対象によって異なりますが、陸地生態系（高山帯・亜高山帯、自然林・人工林、里地・里山生態系、人工林）、淡水生態系（湖沼、河川、温帯）、沿岸生態系（亜熱帯、温帯・亜寒帯、海洋生態系において、地図的に様々な影響が現れる）と予測されています。

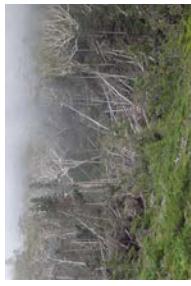


写真1-4 差異気候によって倒れた亜高山森林

気候変動による生態系変化の例として、高山帯では、温帯気候による融雪量の増加により、森林の倒伏が観察されています。

自然生態系への影響の特徴

気候変動によって、生物の生存の基盤となる気温や降水量等の環境条件が変化すれば、生態系もそれに応じて全体として変化します。その影響の程度や現れる時期は、地域、生態系、種、遺伝的形質によって異なります。

このような複数的な条件を考え、予測される気候変動への影響についても、知見が不足しており不確実性があります。そのため、自然生態系サービスへの影響についても、知見が不足しており不確実性があります。そのため、自然生態系分野において、気候変動の影響を評価したり適応策を検討したりする際には、これらの不確実性を考慮する必要があります。

気候変動への適応の基本的考え方

自然生態系分野における適応策の基本的考え方は以下の3つです。

- ① 気候変動に対して、生態系は全体として変化するため、これを人為的干渉によって広範に抑制することは不可能である。
- ② 気候変動以外の要因によるストレスの低減や生態系ネットワークの構築によって、気候変動に対する応応性の高い健全な生態系の保全・回復を図る。
- ③ モニタリングを行って、気候変動による生態系と種の変化を把握する。

適応策の検討で考慮すべきこと

自然生態系分野における適応策を検討する際には、以下の5つについて考慮しながら進める必要があります。

気候変動への組み込み

気候変動は広く自然生態系に影響を与えるため、国立公園管理や希少野生動植物種の保護等の自然環境保全に関する計画、レッドリスト記載種や侵略的外来種の評価等の自然環境の開拓施設において気候変動の影響を考慮することが必要です。計画や施策の見直しの際に、目標や対策は将来のままではあるかなどを見直す他、適切な指標を把握するためのモニタリングについてもあわせて検討する必要があります。

構成的アプローチ

気候変動によって生物多様性が受けける影響とそれに伴う生態系サービスへの影響の不確実性に対応するためには、科学的知見を充実させて不確実性をできる限り減らしていくことが重要です。実際の取組では、事前に十分な調査を行って結果を予測するとともに、事業着手後もモニタリングを行い、その結果を科学的に評価し、事業の直面に反映する順次的アプローチで取り組むことが重要です。

関係者間の合意形成・役割分担・連携・協力

適応策を検討する際には、どのような生態系や生態系サービスに着目して対策を取るか、積極的に干渉すべきかなどの方針の選択がまずは重要になります。そのため、適応策の計画や実施においては、関係する国の行政機関、地方公共団体、地域住民、NGOやNPO、自然環境に関する専門的な知識を有する者等の多様な主体が情報共有し、十分な合意形成を図り、役割分担しつつ連携して、総合的に対応することが必要です。

情報共有

気候変動による自然生態系の変化は、生態系サービスにも影響を及ぼすため、広く国民にも影響が及びます。また、適応策の計画や実施は関係者間の合意形成や連携・協力が不可欠です。このため、自然生態系への影響の現状、不確実性を考慮した将来予測、取組の方向性や進歩、適応策の効果と限界などについての情報共有や普及啓発が重要です。

人材育成

適応策を適切かつ効果的に進めためには、それに携わる人材が重要な役割を持つことから、長期的視点で保護区の管理や調査研究に携わる人材の育成を図ることが必要です。

1-3 本引きのねらい

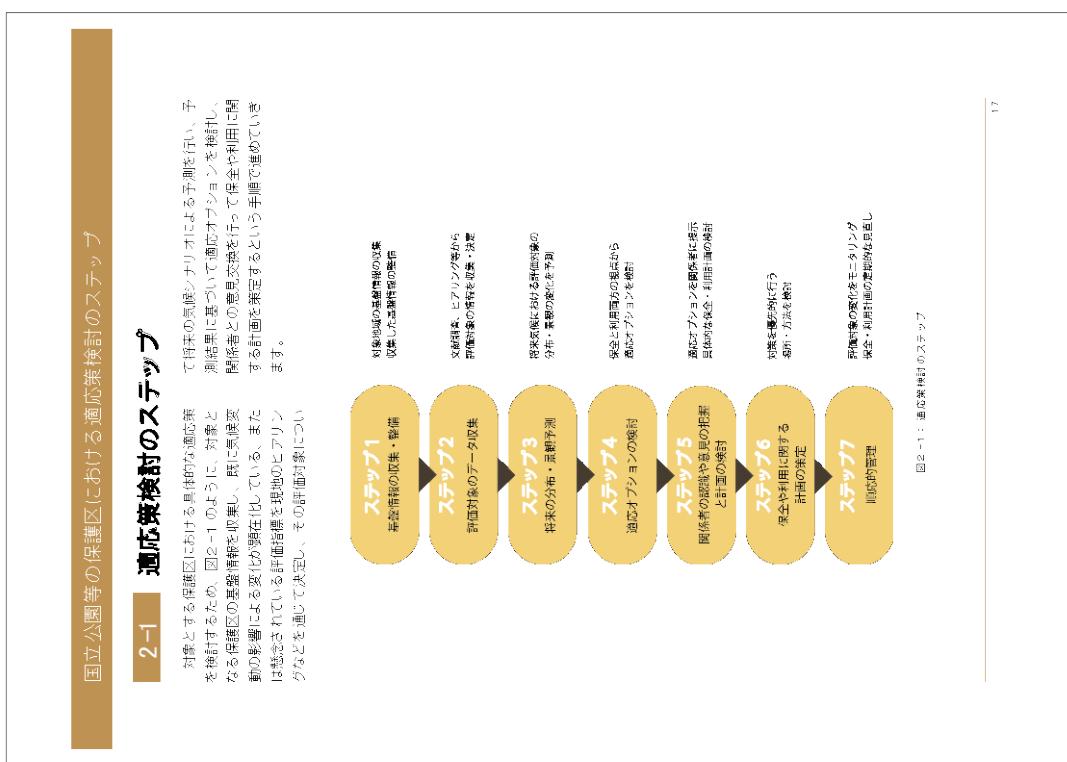
本引きは、国立公園等の保護区の管理に関わる方々に、自然生態系分野における気候変動の影響への適応の考え方を知っています。気候変動による将来の変化を考慮して、調査や分析に関する研究者や各地域の研究機関、コンサルタント会社等と連携し、保護区の保全や利用を考える際の参考としていたくことを目的に作成されました。国立公園等の保護区において、気候変動の影響への適応策を策定する手順を7つのステップで示し、各ステップで具体的に必要なデータや考慮すべきことを示しています。

2. 国立公園等の保護区における 適応策検討のステップ

- 2-1 適応策検討のステップ
- 2-2 ステップ1：基礎情報の収集・整備
- 2-3 ステップ2：評価対象のデータ収集
- 2-4 ステップ3：将来の分布・景観予測
- 2-5 ステップ4：適応オプションの検討
- 2-6 ステップ5：関係者の認識や意見の把握と計画の検討
- 2-7 ステップ6：保全や利用に関する計画の策定
- 2-8 ステップ7：順応的管理

測定管検討のステップ

対象とする保険面における具体的な適用範囲を明確にするため、図2-1のよう、被保険者と被扶養者との意見交換を行って保全や利用に関する話を策定するという手順で進めていきます。



国立公園等の保護区における適応策の検討

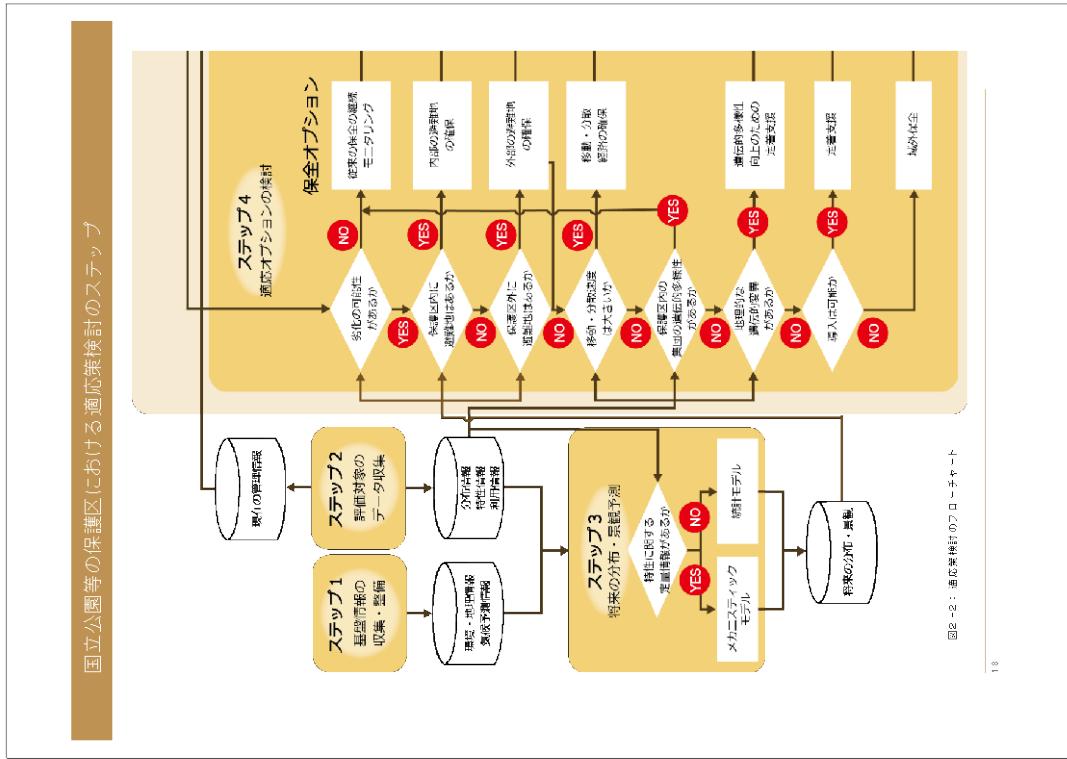
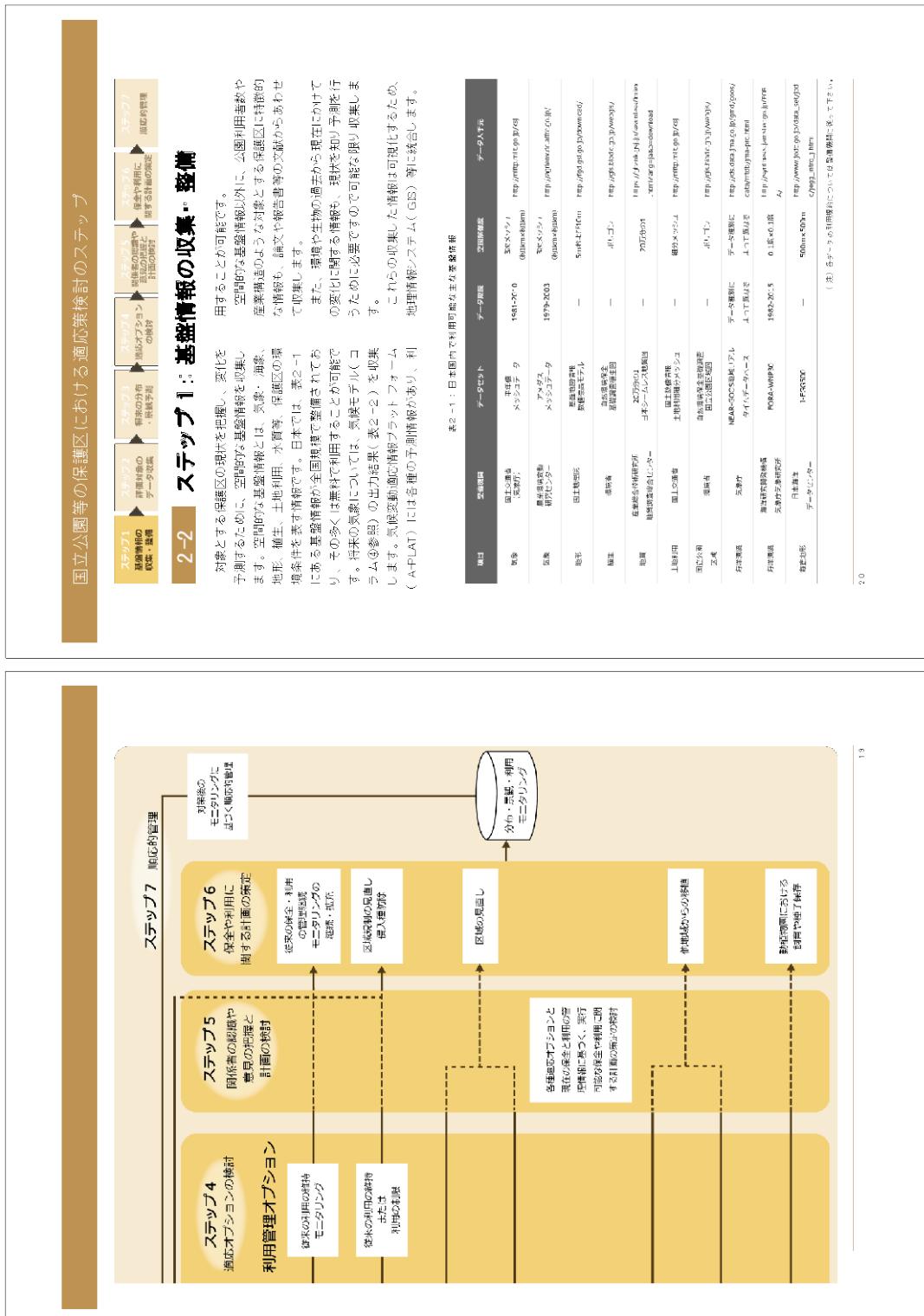


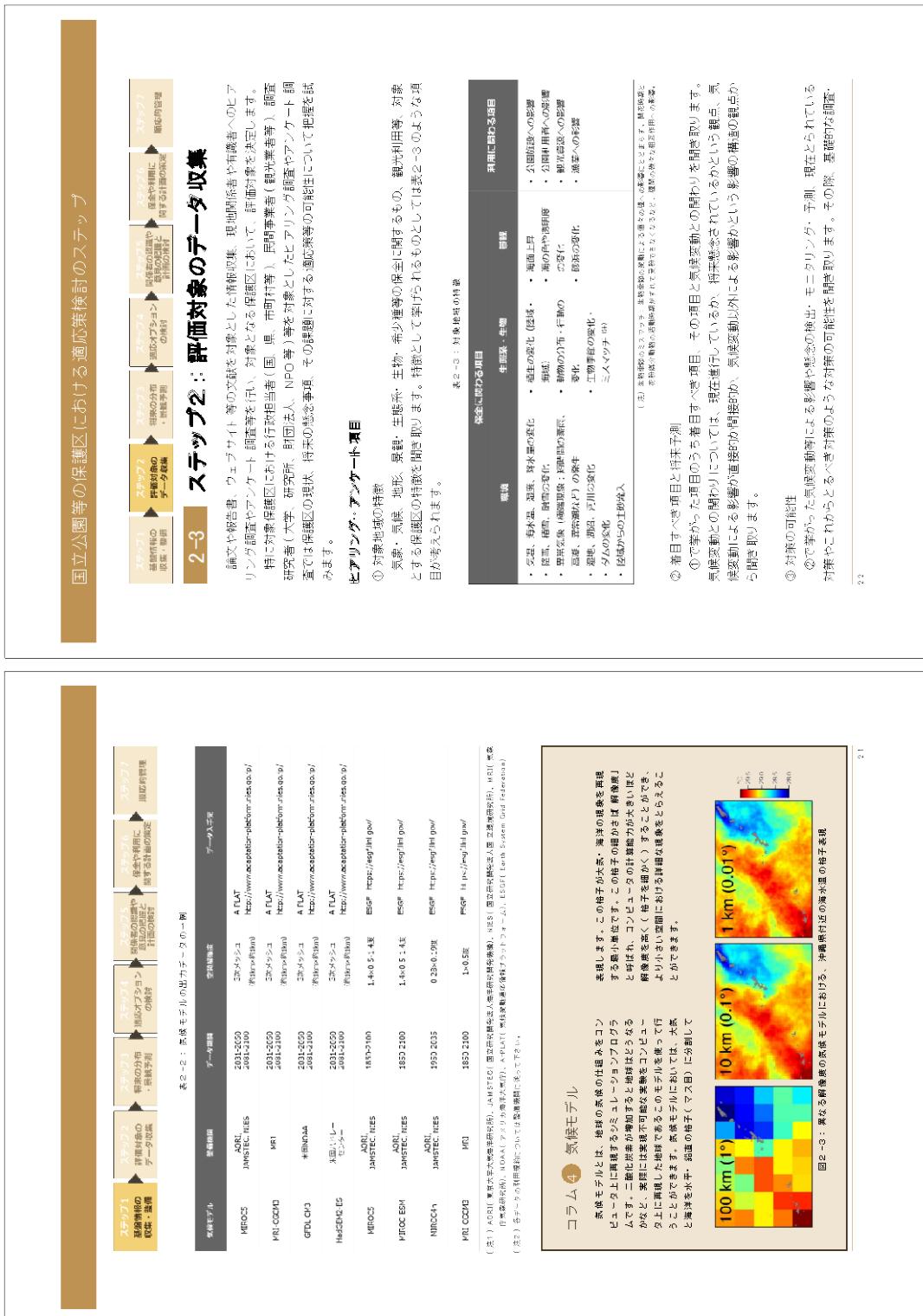
図2-2： 通産業検討のアローチャート



国立公園等の保護区における適應策検討のステップ

2-2 ステップ1：基盤情報の収集・整備

表2-1：日本国内で利用可能な主要な空港情報



中古漢語語音學研究

スティップ4: 適応オプションの検討

```

graph TD
    S1[ステップ1: 生物の分布推定モデルの検証] --> S2[ステップ2: 生物の分離、隔離子育]
    S2 --> S3[ステップ3: データ貯蔵]
    S3 --> S4a[ステップ4: 適応オプション]
    S3 --> S4b[ステップ4: 適応オプションの検討]
    S4a --> S1a[スクリプト1: 生物個体の検査]
    S4a --> S1b[スクリプト2: 生物の分離、隔離子育]
    S4a --> S1c[スクリプト3: データ貯蔵]
    S4a --> S1d[スクリプト4: 生物利用に係る規制の緩和]
    S4b --> S2a[スクリプト1: 生物の分離、隔離子育]
    S4b --> S2b[スクリプト2: 生物の分離、隔離子育]
    S4b --> S3a[スクリプト3: データ貯蔵]
    S4b --> S4a[スクリプト4: 生物利用に係る規制の緩和]

```

関係者の認識や意見の把握と計画の検討

横計を行います。そこでアリバ音頭を用いて、影撮影の場合、分量が消費する場合のようになります。

2-7 ステップ6：保全や利用に関する計画の策定

スチックで被検した結果に基づいて、対応を優先的に実行する場所では、コスト等の制約を考慮して、目標を達成するよう意図的に行動を行います。また、現在行われている管理が気候変動影響への適応に対しても、有効な場合は適切に実現します。

國學研究

写真2-1：アンケート 調査の様子(攝影 国立環境研究所)

図書の検討と評議の標準化による評議者の標準化

2-7 ステップ6：保全や利用に関する計画の策定

スチックで被検した結果に基づいて、対応を優先的に実行する場所では、コスト等の制約を考慮して、目標を達成するよう意図的に行動を行います。また、現在行われている管理が気候変動影響への適応に対しても、有効な場合は適切に実現します。

卷之三

「順応的管理」を講じる措置が必要です。

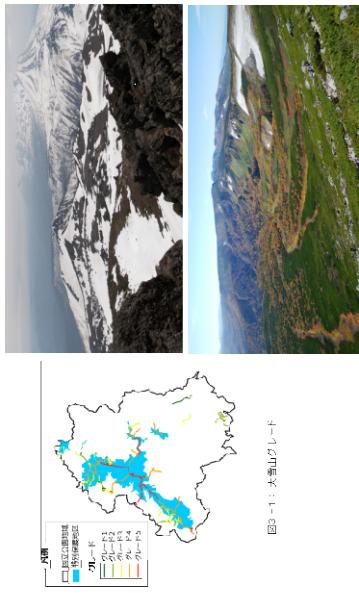
3. モデル保護区における事例

- 3-1 大雪山国立公園
3-2 慶良間諸島国立公園



大雪山国立公園
3-1

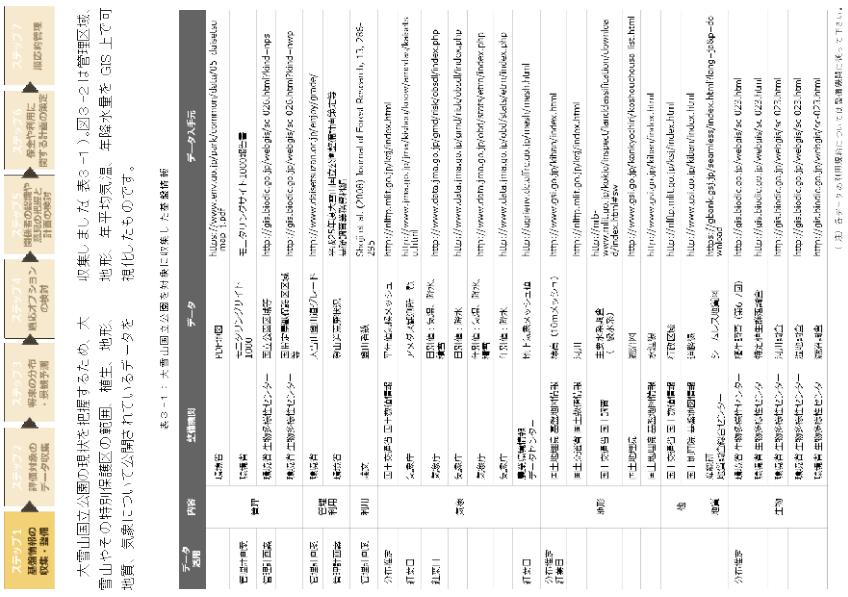
大雪山国立公園は北海道の中央部に位置し、昭和9年（1934年）12月4日に国立公園として設立されました。日本の国立公園の中で最も広く、南北4km、東西22km（総面積2,647.64km²）の広がりをもっています。この国立公園の北端は北海道最高峰の白岳（2,291m）。主峰として、標高2,000m前後の5つの山峰から形成されています。緑豊かな高いところから本州の3,000m程度に匹敵する（健闘地）や真夏でも雪の季節風景が見られる（雪田）など、四季を通じて豊かな自然が楽しめます。

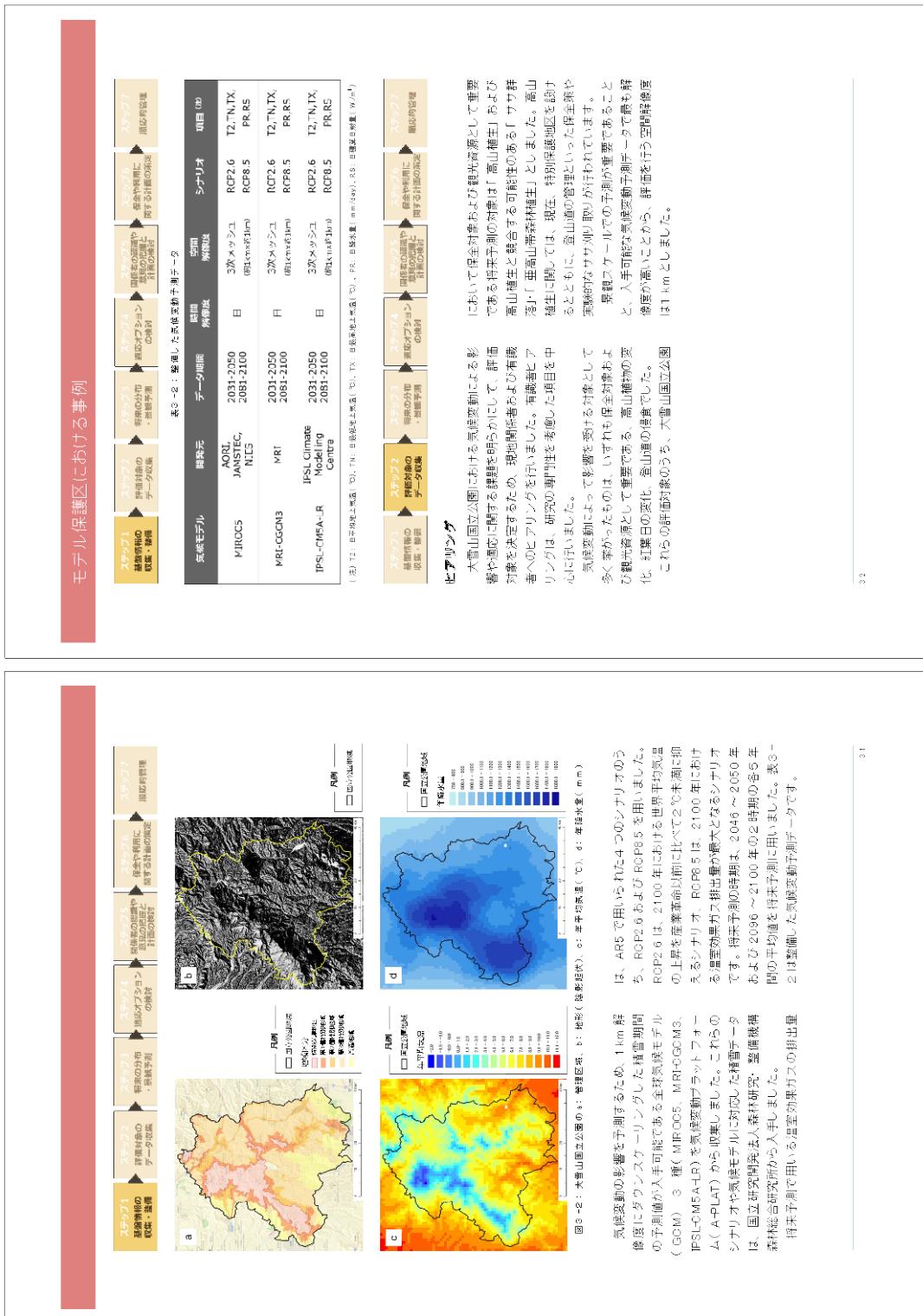


卷之三十一

国工公園内には総延長約3000mにわたる登山道が存在し、公園海に「大雪山グレード（以下「グレード」）」が認定されています（図5）。登山道はラベルにて記した登山道の全歩道を修復することによって、これまでにない豊富な登山道が提供されることが期待されています。

スティック1	スティック2	スティック3	スティック4	スティック5	スティック6	スティック7
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------





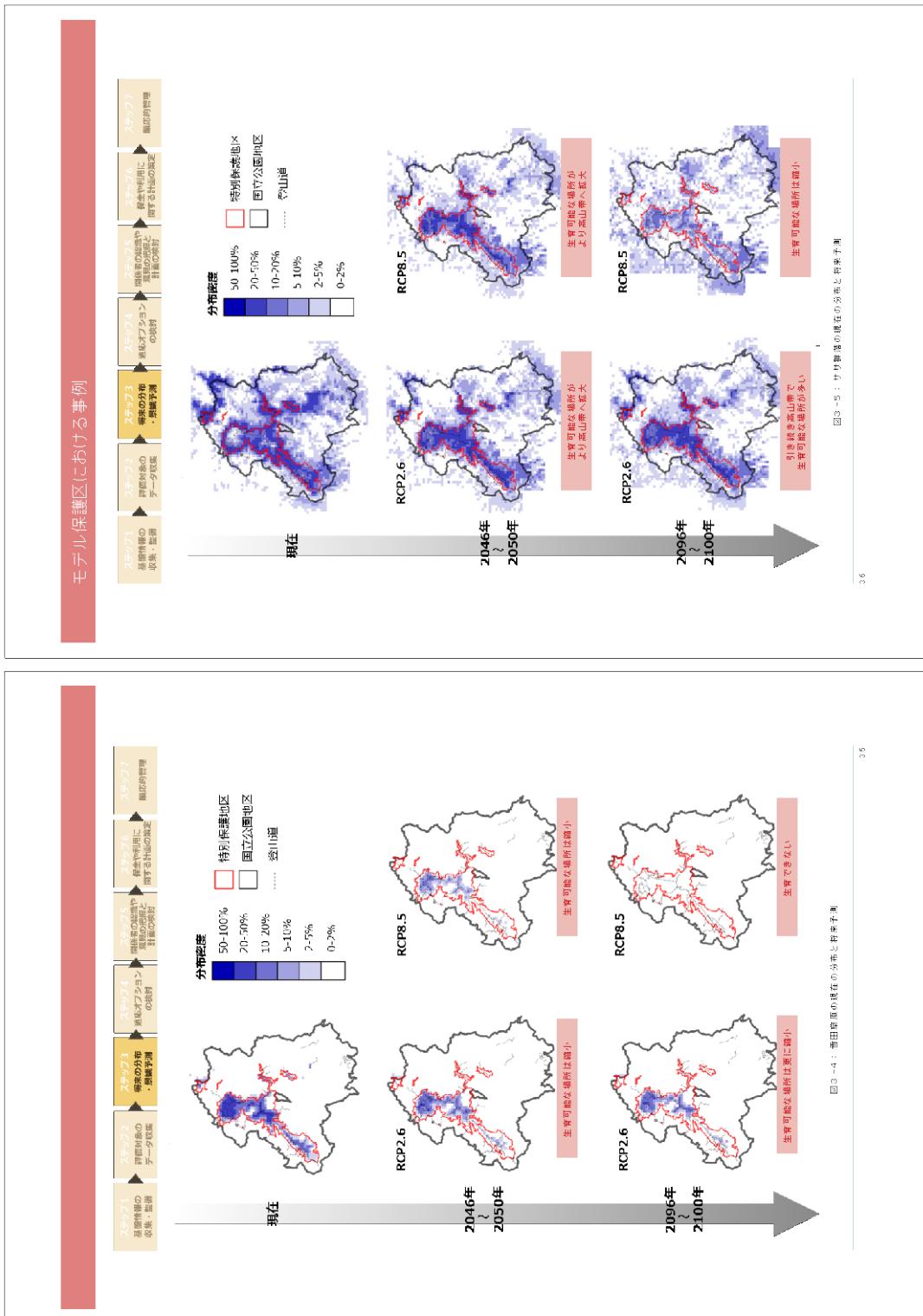


図3-5：リリードリルの現在の分布と将来予測

36

図3-4：豊田市での現在の分布と将来予測

35

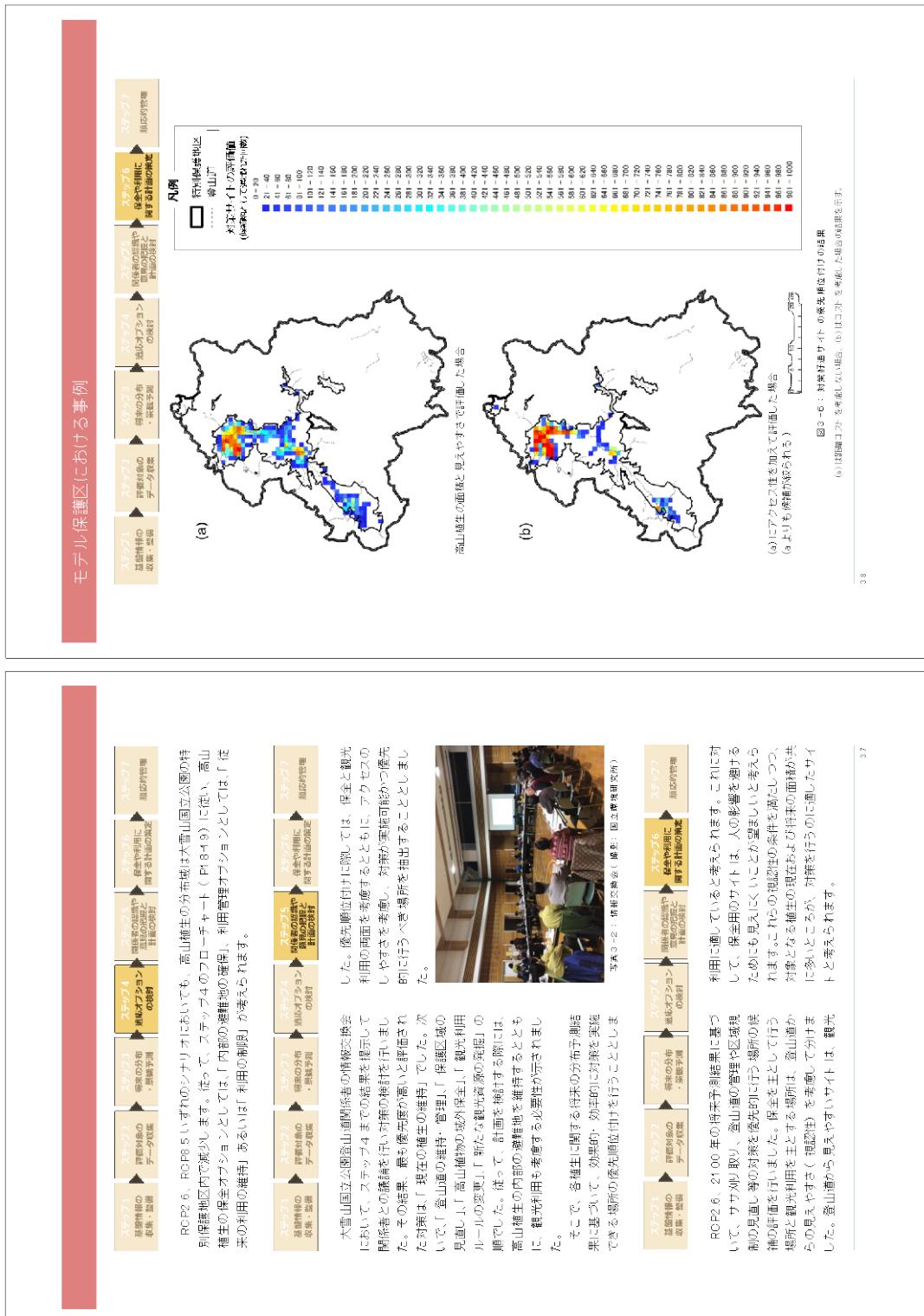


図3-6：対象好適サイトの優先単位付けの結果

(a)

モデル保護区における事例

3-2 美良間諸島国立公園

スラップ1
基盤生態の
基礎、基礎
データ収集
スラップ2
資源的他の
資源の分布
データ収集
スラップ3
資源の分布
資源子測
スラップ4
資源の分布
資源子測
スラップ5
資源の分布
資源子測
スラップ6
資源の分布
資源子測
スラップ7
資金や費用に
関係する計画の
検討

また、対象場所の優先順位付けに際しては、え方にに基づいて、対象の実施に好適なサイトを検討する際のコツをも考慮することが必要です。登山口から登山の良さをコストとして考慮し、登山口から遠いところはコストが高いとみなしました。このような考

え方にに基づいて、対象の実施に好適なサイトの組み合わせを示すのが、たとえば、これらの実施場所を元に、実施場所の選定を考慮しながら、具体的な計画場所を検討してきました。登山の良さをコストとして考慮し、登山口から遠いところはコストが高いとみなしました。このような考

スラップ1
資源的他の
資源の基礎
データ収集
スラップ2
資源的他の
資源の分布
資源子測
スラップ3
資源的他の
資源の分布
資源子測
スラップ4
資源的他の
資源の分布
資源子測
スラップ5
資源的他の
資源の分布
資源子測
スラップ6
資源的他の
資源の分布
資源子測
スラップ7
資金や費用に
関係する計画の
検討

スラップ6では、R0P0.6に基づいた対策実施場所の候補を示しましたが、現実にはいずれの気候・ナリオが実現するのかはわかりません。また、分布子測、測定、でも、測定の進行度が進み次第に削除されてよ

くことが望まれます。

魔芋間諸島は、沖縄県那覇市の西方約40kmの地盤に位置し、大小10の島々と数多くの岩礁から構成される島しまよ群で、2014年3月5日、サンゴの日に31番目の国立公園として指定されました。透明度の高い珊瑚礁、各種なサンゴが高密度に生息するサンゴ礁、サトウクリの繁殖、多島無尾組、白い砂浜、漁業とそこにある豊かな生物の種生産、そして大規模なサンゴ礁が伸びたり、サンゴ礁は大規模した多様な景観を有し、陸域が352.0ha、海域は90.473haと公園区域の大半海域となるいる国立公園です。魔芋間諸島の周辺海域は、高い透明度やそこには、今後水温が上昇を続けると白化が発生し、サンゴが死んでしまうおそれがあります。

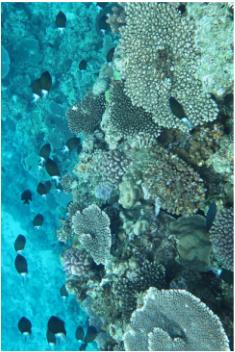
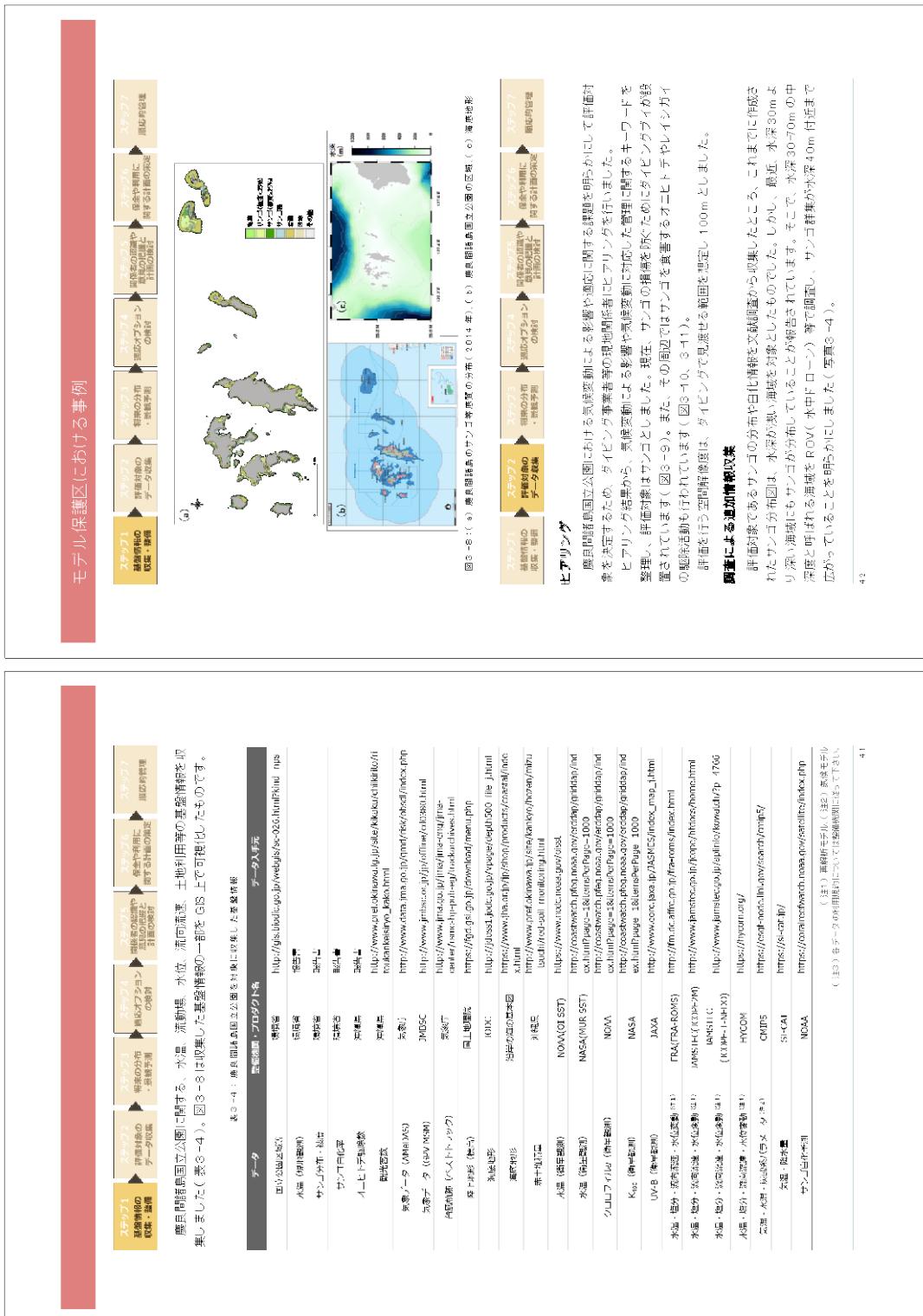


写真3-3：美良間諸島国立公園（写真：国立公園管理所）

図3-7：美良間諸島国立公園が計画図

40



モデル保護区における事例



図3-7-0：奥尻島沖中央部における
オニヒトデ棲息地実施地点（2010～2016年）



図3-7-1：奥尻島沖中央部における
レインフォレスト実施地点（2010～2016年）

使用したデータ

現在入手可能な水温等の環境データは1kmの解像度なので、それを100mに外線量および密度を用いて、実際に想定されたデータの日付および日付による死亡率を算出する。物理環境モデル（三次元流動モデル）を構築し、計測器を設置して観測した水温や流れで換算し、海の中で見渡せる範囲である100mの解像度で水の流れや水温の計算を行いました（図3-7-3、3-7-4）。

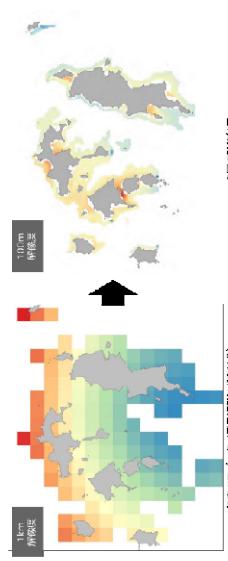


図3-7-2：奥尻島沖中央部における
レインフォレスト実施地点

4.4

モルガニティにおける事例

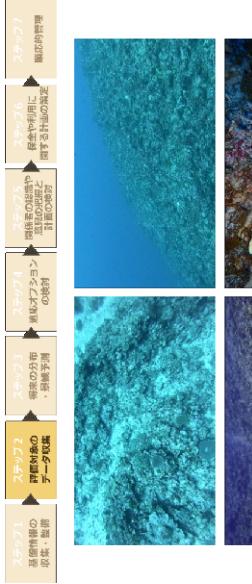


図3-8-0：奥尻島沖中央部における
モルガニティ実施地点（2010～2016年）

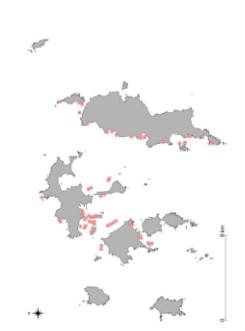


図3-8-1：奥尻島沖中央部における
モルガニティ実施地点

4.3



写真3-5： 慢性間諭症における情緒交換会

६८

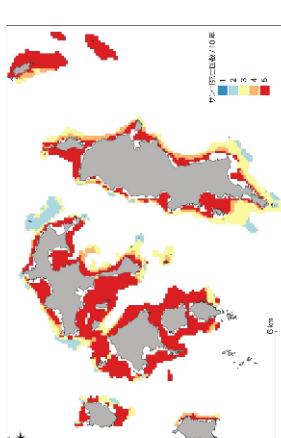
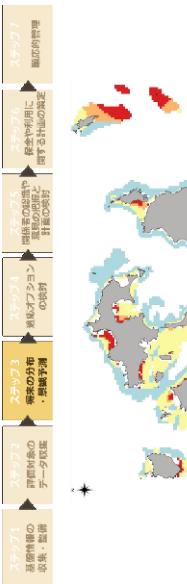
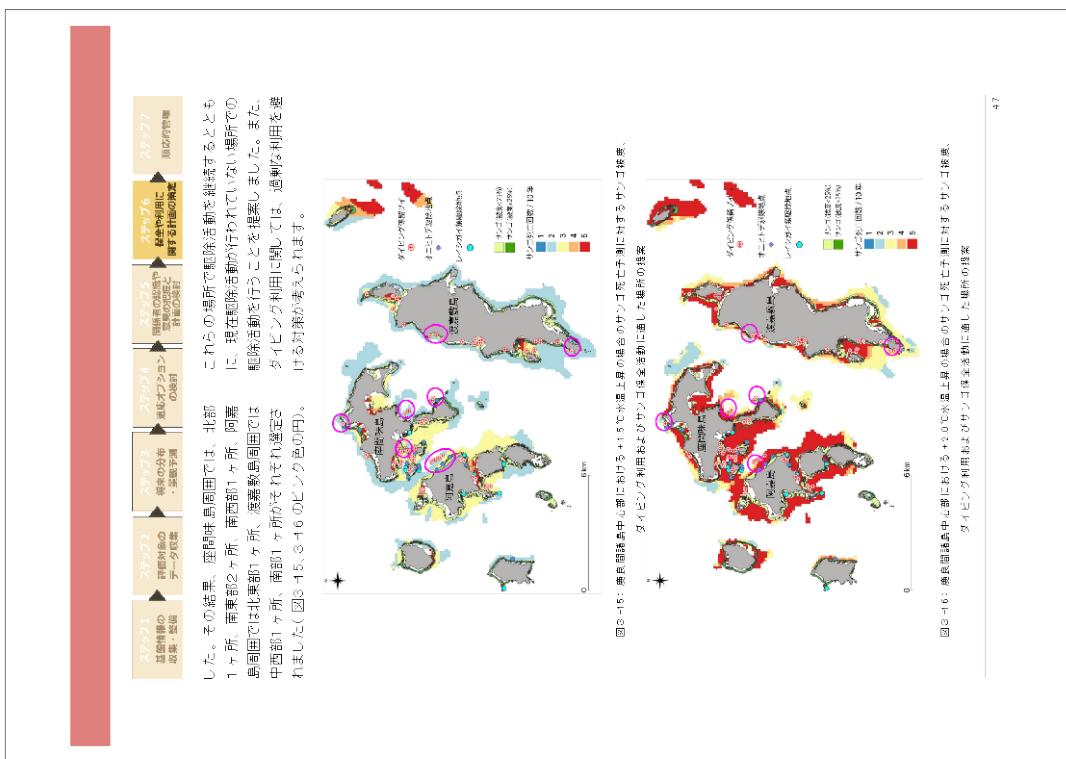


图 3-1-1 殷商甲骨文中心部之书¹⁰⁷与水¹⁰⁸上艮¹⁰⁹才¹¹⁰廿¹¹¹口¹¹²区¹¹³大¹¹⁴于¹¹⁵水¹¹⁶之¹¹⁷图



で、ステップ4のフローチャート（PH8-9）に依り、サンゴの保全プロジェクトとしては、「内部の選能地の確保」が実現されました。花巻市立公園内に設置する

५७



4. 参考文献

- Butt, N., Possingham, H.P., De Los Rios, C., Maggini, R., Fuller, R.A., Maxwell, S.L., Watson, J.E.M. (2016) Challenges in assessing the vulnerability of species to climate change to inform conservation actions. *Biological Conservation*, 199, 10–15.
- Cross, M.S., Zavala, E.S., Bachelet, D., Brooks, M.L., Enquist, C.A.F., Fleishman, E., Graumlich, L.J., Groves, C.R., Hannan, L., Hansen, L., Hayward, G., Koopman, M., Lawler, J.J., Malcolm, J., Nordgren, J., Petersen, B., Rowland, E.L., Scott, D., Shafer, S.L., Shaw, M.R., Tabor, G.M. (2012) The Adaptation for Conservation Targets (ACT) framework: A tool for incorporating climate change into natural resource management. *Environmental Management*, 50, 341–351.
- Foden, W.B., Butchart, S.H.M., Stuart, S.N., Vié, J.-C., Akçakaya, H.R., Argüello, A., Devantier, L.M., Gutsche, A., Turak, E., Cao, L., Donner, S.D., Katarina, V., Bernard, R., Holland, R.A., Hughes, A.E., O'Hanlon, S.E., Garrett, S.I., Sekercioğlu, C.H., Mace, G.M. (2013) Identifying the world's most climate change vulnerable species: A systematic trait-based assessment of birds, amphibians and corals. *PLoS ONE*, 8, e65427.
- Hameed, S.O., Holzer, K.A., Doerr, A.N., Baty, J.H., Schwartz, M.W. (2013) The value of a multi-faceted climate change vulnerability assessment to managing protected lands: Lessons from a case study in Point Reyes National Seashore. *Journal of Environmental Management*, 121, 37–47.
- Pacifici, M., Foden, W.B., Visconti, P., Watson, J.E.M., Butchart, S.H.M., Kavacs, K.M., Scheffers, B.R., Hole, D.G., Martin, T.G., Akçakaya, H.R., Corlett, R.T., Huntley, B., Bickford, D., Carr, J.A., Hoffman, A.A., Midgley, G.F., Pearce-Kelly, P., Pearson, R.G., Williams, S.E., Willis, S.G., Young, B., Rondinini, C. (2015) Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change*, 5, 215–225.
- Rannow, S., Macgregor, N.A., Albrecht, J., Crick, H.Q.P., Förster, M., Heiland, S., Janauer, G., Morecroft, M.D., Neubert, M., Sarou, A., Sienkiewicz, J. (2014) Managing protected areas under climate change: challenges and priorities. *Environmental Management*, 54, 732–743.
- Shaw, W.D., Loomis, J.B. (2008) Framework for analyzing the economic effects of climate change on outdoor recreation. *Climate Research*, 36, 259–269.
- Shoo, L.P., Hoffman, A.A., Garnett, S., Pressey, R.L., Williams, Y.M., Taylor, M., Falconi, L., Yates, C.J., Scott, J.K., Alagador, D., Williams, S.E. (2013) Making decisions to conserve species under climate change. *Climatic Change*, 119, 239–246.
- Willis, S.G., Foden, W., Baker, D.J., Bell, E., Burgess, N.D., Carr, J.A., Doswald, N., Garcia, R.A., Hailey, A., Hof, C., Newbold, T., Rahbek, C., Smith, R.J., Visconti, P., Young, B.E., Butchart, S.H.M.



(2015) Integrating climate change vulnerability assessments from species distribution models and trait-based approaches, *Biological Conservation*, 190, 167-178.

川合由加, 工藤岳 (2014) 大雪山国立公園における高山植物生息地の現状と生物多様性への影響, 地球環境 19(1), 23-32.

環境省 (2015) 気候変動の影響への適応計画
<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/tekiou/siryo1.pdf>

環境省 (2015) STOP THE 溫暖化 2015 – 緊和と適応へのアプローチ –
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/stop2015/stop2015_full.pdf

環境省 (2015) 生物多様性分野における気候変動への適応についての基本的考え方
<https://www.env.go.jp/press/files/jp/2767.pdf>

環境省 (2016) 生物多様性分野における気候変動への適応
http://www.env.go.jp/nature/biodic/kikou_tekiori_pamph/tekiou_jp.pdf

環境省 (2017) STOP THE 溫暖化 2017
<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/knowledge/Stop2017.pdf>

環境省 (2018) 気候変動適応計画
<http://www.env.go.jp/earth/tekiou/tekioukeikaku.pdf>

気候変動に囲む政府間パネル (2014) IPCC 第 5 次評価報告書 総合報告書
原文 <http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
和訳 <http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/#SYR>

国立環境研究所 (2014) 環境省 MOJ 「適応」で拓く新時代「気候変動による影響に備える」

<https://www.nies.go.jp/kankyo/kyoulogi/6/61.pdf>

<参考ウェブサイト>
気候変動適応情報プラットフォーム (A-PLAT) ウェブサイト
<http://www.adaptation-platforms.go.jp/index.html>

発行日：2019年3月

発行：環境省自然環境局
〒100-8975 東京都千代田区霞が関1丁目2番2号

E-mail: NSAR@env.go.jp

編集・協力：国立研究開発法人 国立環境研究所