

2. 1-2 海水温の上昇等によるホタテガイ及びワカメ等の内湾養殖業への影響調査に関する調査

2.1. 概要

北海道・東北地域では、ホタテガイ・ワカメ等の内湾養殖が盛んである。本調査では、青森県陸奥湾のホタテガイへの高温による影響、岩手県沿岸のワカメへの栄養塩及び、高温による影響を対象に調査を行った。ホタテガイについては、青森産技水産総合研究所が所有するへい死率予測モデルを使用した。その結果、21世紀末のRCP8.5のシナリオでは、養殖可能な海域が制限される可能性が示唆された。適応策としては、より低い水温が確保されると思われる、沖合域の水深が深い地点への、養殖施設の移動等の検討を行った。

また、ワカメについては、東北水研が所有する栄養塩予測モデルを用いて、栄養塩濃度の予測を行ったが、不確実性が大きく栄養塩の影響を検討するまでには至らなかった。一方、高温による影響について検討を行った結果、ワカメを沖に出す時期が1カ月以上遅くなることにより養殖期間が短くなり、その結果、収量が減少する可能性が示唆された。適応策としては、陸上で作成する大型種苗の利用等、短くなる養殖期間に対して、いかにして収量を維持していくか等について検討を行った。

2.1.1. 背景・目的

ホタテガイ及びワカメは、陸奥湾やリアス式海岸等、内湾の多い北海道・東北地域において、重要な養殖対象種となっている。ホタテガイに関しては、平成22年に陸奥湾において高水温によるホタテガイの大量へい死（青森県,2011,2012）が発生しており、気候変動に伴う水温上昇によって同様の被害が発生することが予想される。

また、ワカメに関しては、近年の高水温化により海洋構造が変化し、栄養塩濃度の低下による芽落ちの被害が発生している。また、現在のところ高水温による大きな被害は出ていないものの、天然ワカメの分布南限にあたる大分県沿岸においては、冬季の高水温傾向が続いたことによるワカメの不漁が問題となっている（伊藤，2001）。以上のような状況から、今後気候変動に伴う海水温の上昇により、北海道・東北地域においても高水温による被害が発生することが予想される。そこで、①高水温がホタテガイに与える影響調査、②高水温及び栄養塩濃度の変化がワカメに与える影響調査、を目的として調査・検討を行った。また、③北海道・東北地域の関係機関が継続して連携できる枠組として内湾養殖WG（ワーキンググループ）を設置し、上記①や②の調査・検討結果を共有し、適応策に関する議論を行った。

2.1.2. 実施体制

本調査の実施者

- ・ 東北区水産研究所 資源環境部 海洋動態グループ（ワカメ）
- ・ 地方独立行政法人 青森県産業技術センター水産総合研究所（ホタテガイ）
- ・ 日本エヌ・ユー・エス株式会社

アドバイザー

- ・ 東京大学 大気海洋研究所 海洋生物資源部門 環境動態分野 教授 伊藤 進一
- ・ 東北区水産研究所 資源環境部 海洋動態グループ 寛 茂穂 氏

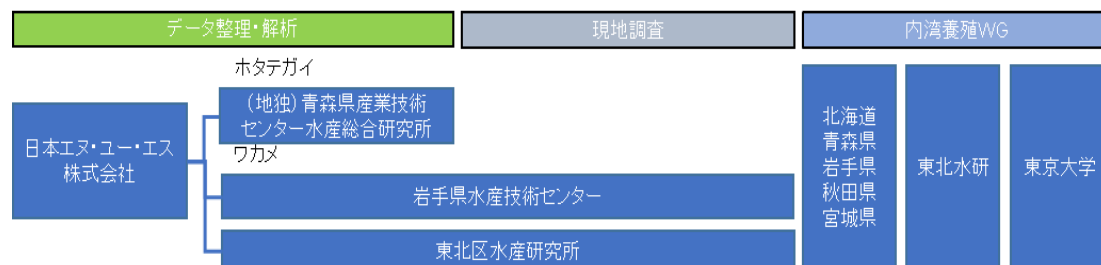


図 2-1 実施体制図

2.1.3. 実施スケジュール（実績）

3 ヶ年の実施スケジュールを図 2-2 に示す。本調査では、①高水温及び栄養塩濃度の変化がホタテガイ・ワカメに与える影響に関する調査、②現地調査、③内湾養殖 WG の設置、④適応策の検討、以上 4 点に関する取組を実施した。

平成 29 年度は、文献収集やヒアリングを行い、影響調査の手法に関する整理を行った。平成 30 年度は、提供された海洋予測データを基に、ホタテガイ・ワカメそれぞれの影響予測を行った。ホタテガイについては、青森県の陸奥湾を対象として、地方独立行政法人青森県産業技術センター水産総合研究所(以後、青森技研水産総合研究所)が所有するホタテガイへい死率予測モデルを使用して、将来のへい死率予測を行った。また、ワカメについては岩手県沿岸を対象として、東北区水産研究所が所有する栄養塩予測モデル(Kakehi et al.,2018) を使用して、将来の栄養塩濃度の予測を行った。その他に簡易予測として、日本エヌ・ユー・エス株式会社より、北海道・東北全域におけるホタテガイ及びワカメに影響を与える高水温の出現頻度 MAP を作成した。平成 31 年度は、平成 30 年度の影響予測を引き続き実施し、予測した影響を基に適応策の検討を行った。

現地調査については平成 29 年度に調査計画を作成し、平成 30 年度及び 31 年度の 2 年間にわたり調査を実施し、調査結果を栄養塩予測モデルに反映し、栄養塩がワカメ養殖に与える影響等について検討を行った。また、内湾養殖WGについては、平成 29 年度に 2 回、平成 30 年度及び平成 31 年度には年 1 回開催し、影響予測の手法や適応策に関して議論を行い、様々な地域の状況を共有しながら、最終的な整理を行った。

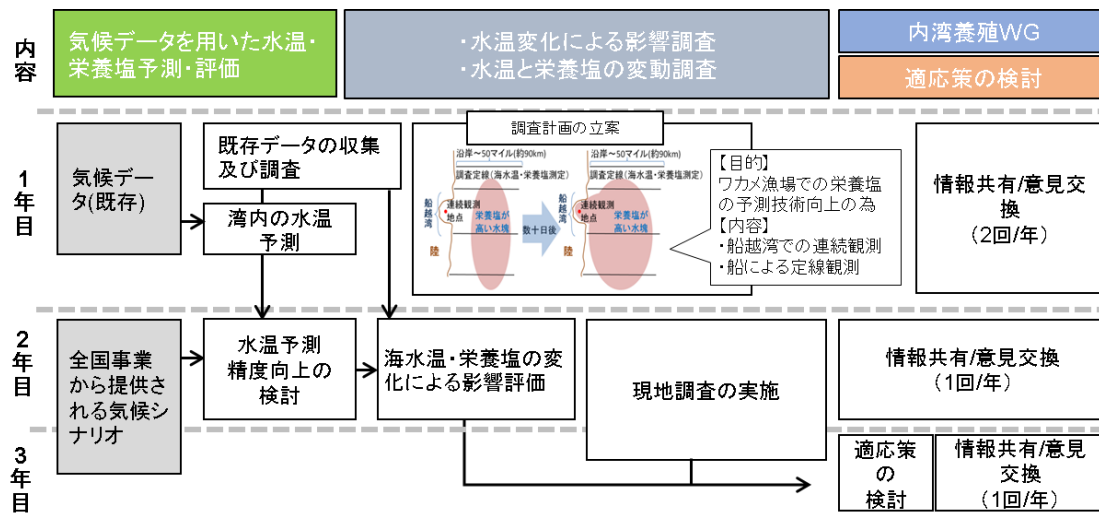


図 2-2 3年調査実施スケジュール

2.1.4. 気候シナリオ基本情報

本調査で使用した気候シナリオの基本情報は、表 2-1 のとおりである。

表 2-1 使用した気候シナリオについて

項目	ホタテガイへい死率予測 ・高温出現頻度MAP	栄養塩濃度の予測	ワカメへの 高温影響予測
気候シナリオ名	海洋近未来予測力学的 ダウンスケーリングデータ by SI-CAT		NIES 統計 DS データ
気候モデル	MRI-CGCM3		MRI-CGCM3 MIROC5
気候パラメータ	日平均水温	日平均海面総熱 フラックス	日平均気温
排出シナリオ	RCP2.6 RCP8.5		
予測期間	21 世紀中頃 21 世紀末		
バイアス補正の有無	有り (地域)		有 (全国)

2.1.5. 気候変動影響予測結果の概要

文献調査の結果、以下のことが分かった

- ・ ホタテガイに影響を与える水温（北海道・東北広域で評価を行うために使用）。
- ・ ワカメに影響を与える栄養塩濃度。
- ・ ワカメに影響を与える水温。
- ・ 地上の気温から内湾の表面水温を予測する方法。

ヒアリングでは本調査の解析手法についてご助言を頂き、影響評価の方法や気候モデルの加工の仕方に反映させながら調査を行った。また、下記の内容についてのご助言を頂いている。

- ・ 海水温のバイアス補正方法や、必要となる観測値データについて。
- ・ 栄養塩予測モデルに使用した、熱フラックス値の不確実性について。

影響予測を行った結果、以下のことが分かった

- ・ 21 世紀末の RCP8.5 のシナリオでは、現在ホタテガイの養殖がおこなわれている水深ではへい死率が高まり、限られた海域でしか養殖できなくなる可能性が示唆された。
- ・ 21 世紀末の RCP8.5 のシナリオにおいては、20℃以下となる時期が現在よりも約 1 カ月後ろにずれることが分かった。そのため、将来のワカメ養殖工程において芽出しの時期が遅くなる結果、養殖期間が短くなり収量が減少する可能性が示唆された。
- ・ 高水温出現頻度 MAP を作成した結果、北海道・東北全域において、ホタテガイのへい死やワカメの成長不良が発生する可能性が示唆される水温域が、今まで出現していなかった地点にまで拡大する可能性が示唆された。

2.1.5.1. ホタテガイへい死率予測

青森水総研が所有するホタテガイへい死予測モデルを使用して、陸奥湾の各水深における将来のホタテガイ稚貝及び新貝について、各々のへい死率予測を行った。各期間・シナリオ毎の結果を図 2-3、図 2-4、図 2-5 に示す。現在ホタテガイの養殖がおこなわれている水深帯に最も近い水深 18.5m における結果を見ると、21 世紀末の RCP8.5 のシナリオにおけるへい死率は、稚貝においては全域で 80%～100%、新貝においては高水温が流入してくる西側で 80%～100%、それ以外の地点においても 50%～80%と、非常に高いへい死率が発生し、養殖可能な海域は沖合域等の一部に制限される可能性が示唆された。

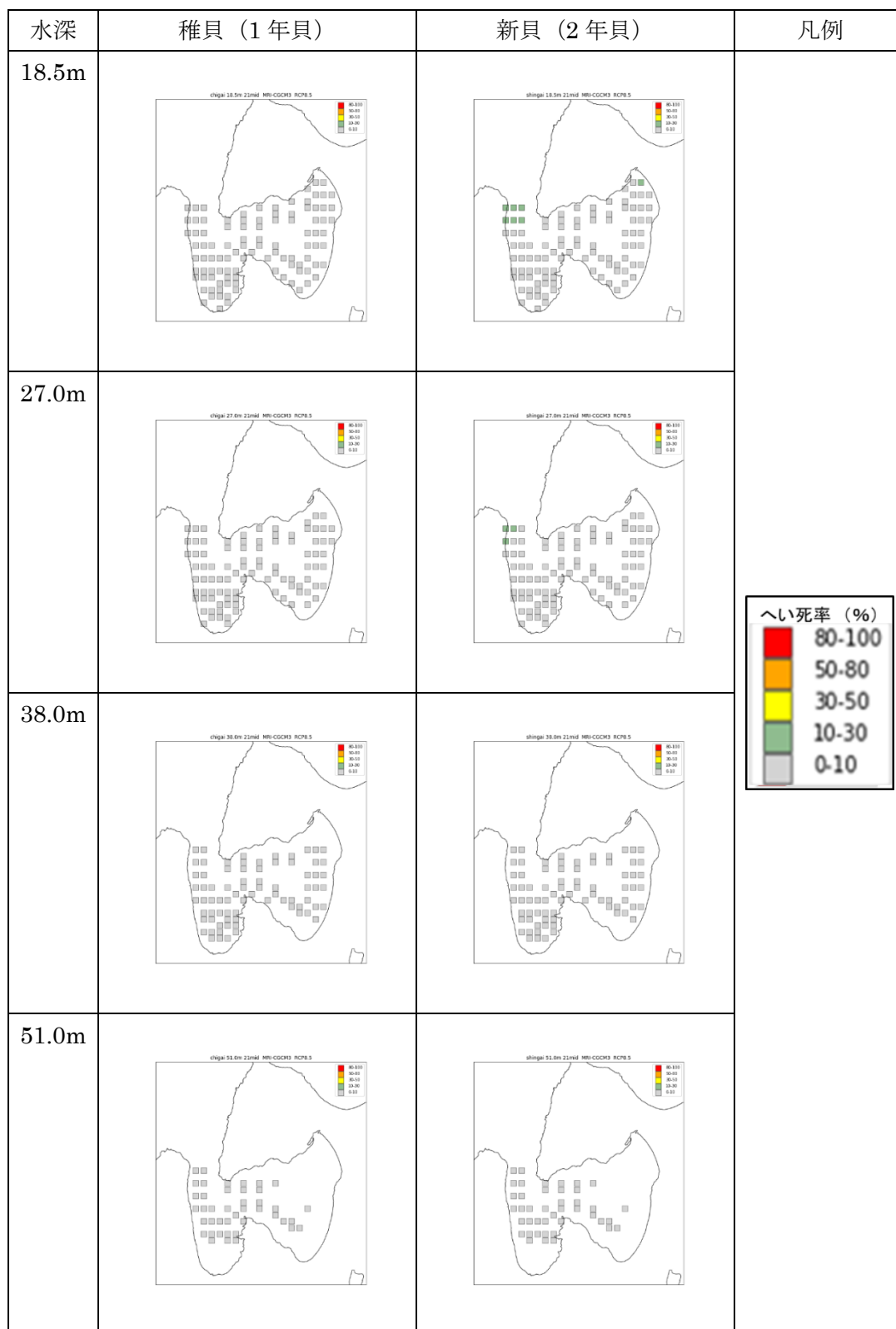


図 2-3 陸奥湾のホタテガイへい死率予測結果
(21 世紀中頃 MRI-CGCM3 RCP8.5)

出典：青森産技水産総合研究所提供の計算結果を基に日本エヌ・ユー・エス㈱が加工

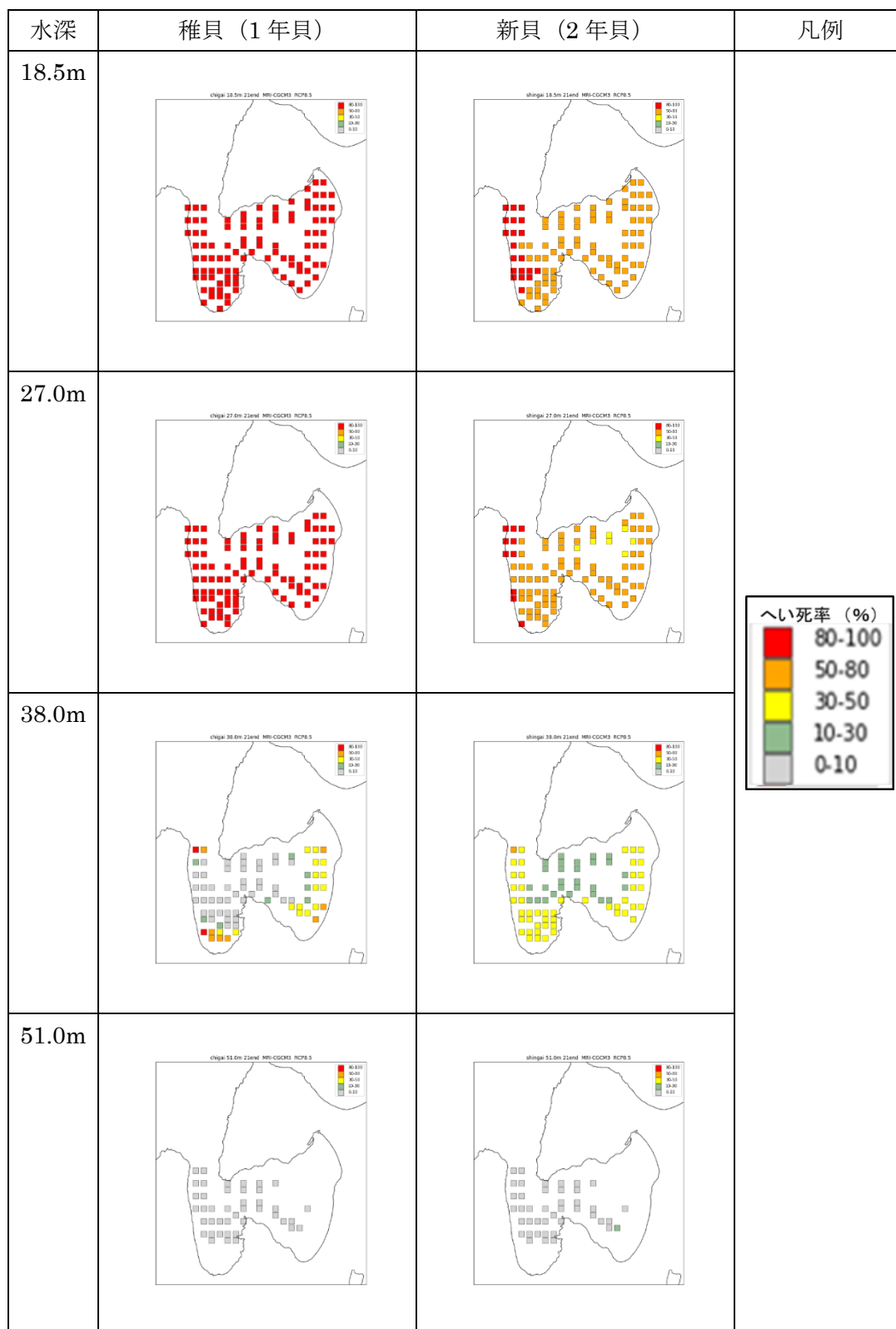


図 2-4 陸奥湾のホタテガイへい死率予測結果
(21 世紀末 MRI-CGCM3 RCP8.5)

出典：青森産技水産総合研究所提供の計算結果を基に日本エヌ・ユー・エス㈱が加工

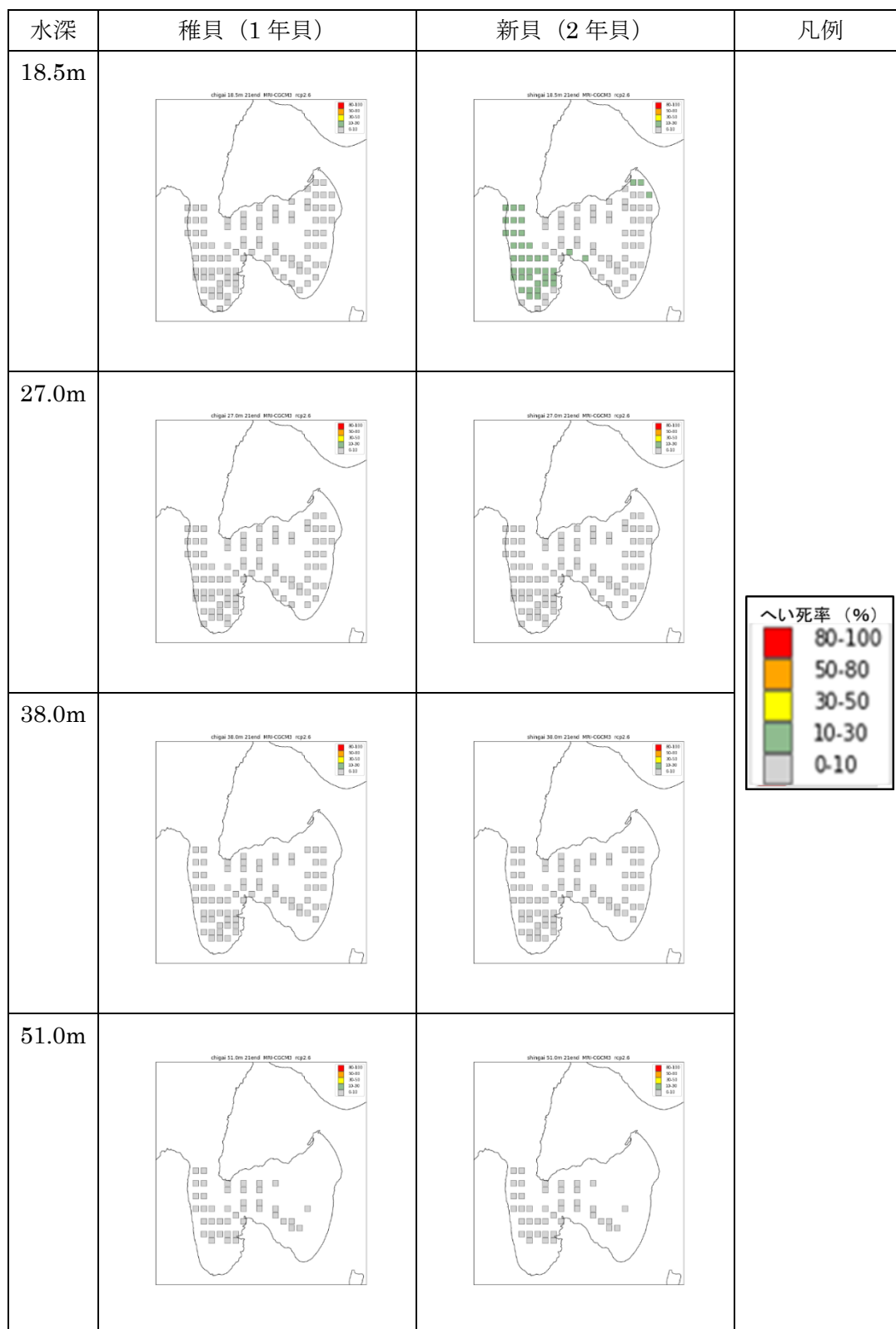


図 2-5 陸奥湾のホタテガイへい死率予測結果
(21 世紀末 MRI-CGCM3 RCP2.6)

出典：青森産技水産総合研究所提供の計算結果を基に日本エヌ・ユー・エス㈱が加工

2.1.5.2. ワカメへの高温影響予測

ワカメは、 20°C 以下となると配偶体の成熟を開始し、養殖工程では 20°C 以下を目安としてワカメの芽出しを行っている（岩手県,2007）。そこで、秋季の高温により、船越湾の水温が 20°C 以下となる時期が、いつ頃になるのかについて予測を行った。気温の予測データを使用して、船越湾において水温が 20°C 以下となる時期を求めた。結果を図 2-6、図 2-7、図 2-8、図 2-9 に示す。

予測の結果、現在では10月3日頃に 20°C 以下となるのに対して、MRICC5 及び MRI-CGCM3 の気候モデルでは21世紀中頃で10日程度、21世紀末 RCP8.5 のシナリオでは1カ月以上後ろにずれ、芽出しの時期が遅くなることが予測された。芽出しの時期が遅くなることで、図 2-10 に示す養殖管理の期間は短くなるため、ワカメの収量が減少する可能性があることが分かった。

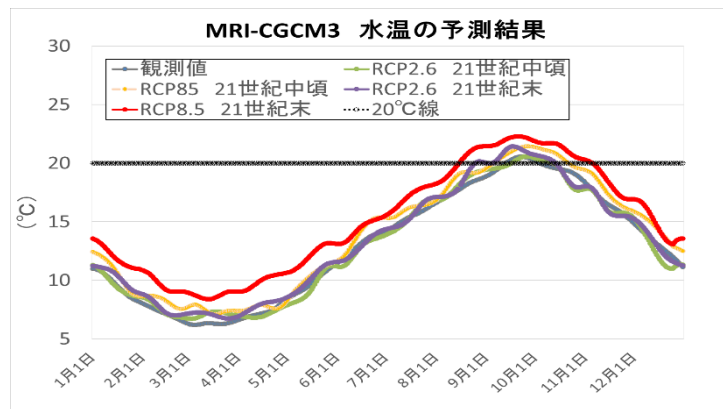


図 2-6 水温予測結果 (MRI-CGCM3)

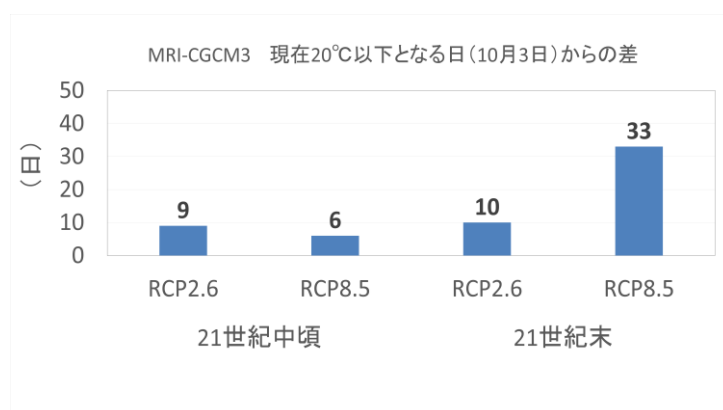


図 2-7 現在 20°C 以下となる日からの差 (MRI-CGCM3)

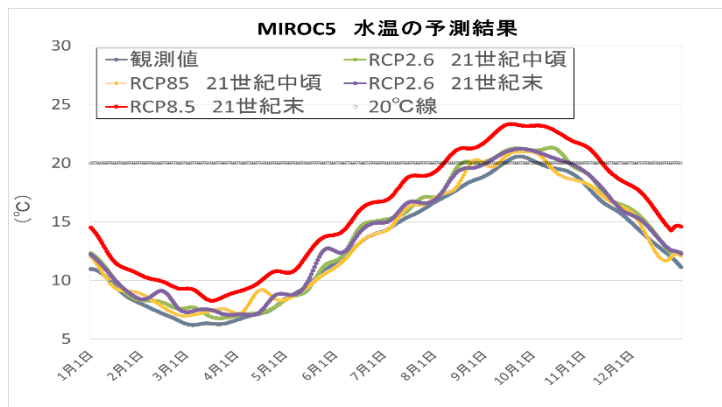


図 2-8 水温予測結果 (MIROC5)

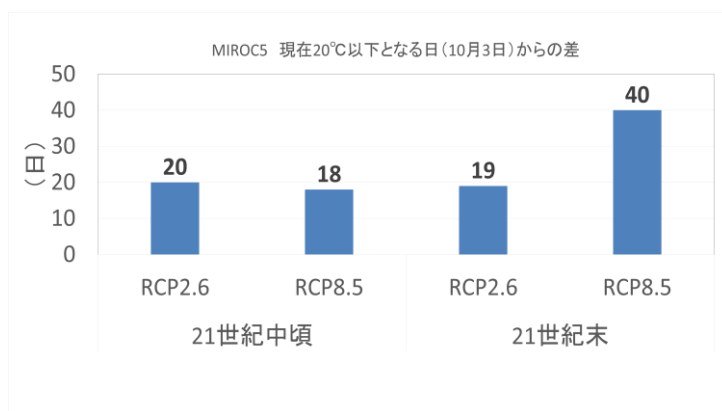


図 2-9 現在 20°C以下となる日からの差 (MIROC5)

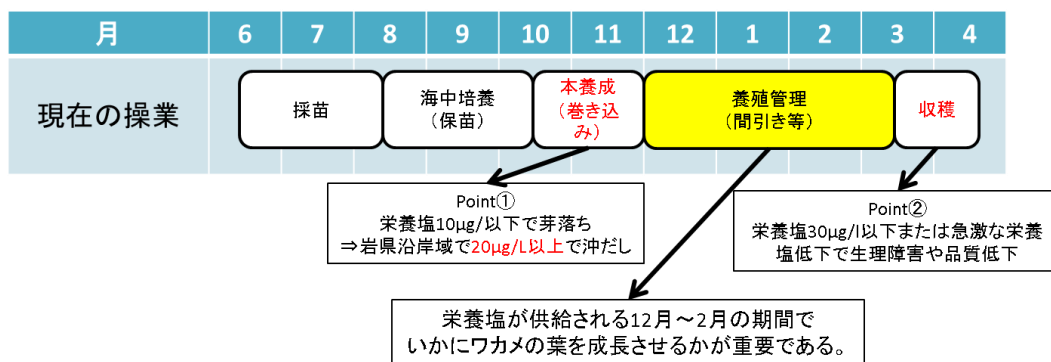


図 2-10 岩手県におけるワカメ養殖の年間操業サイクル

2.1.5.3. 高水温出現頻度 MAP

文献調査の結果から得られた、ホタテガイ養殖に影響を与える水温の情報を基に、高水温の出現頻度 MAP を作成し、北海道・東北地域における簡易予測を実施した。

【ホタテガイ】

21 世紀末の RCP8.5 の結果では、ホタテガイの養殖が行われている噴火湾や三陸沿岸においても、25℃以上の高水温が発生し、へい死の危険性が高まることが分かった（表 2-2）。なお、現在の気温及び 21 世紀中頃に予想される気温では、当該海域において 25℃以上の高水温は確認されていない。

【ワカメ】

21 世紀中頃及び 21 世紀末における RCP8.5 の結果では、ワカメの養殖が行われている三陸沿岸において、現在の気候では確認されていない 15℃以上の高水温が予想され、高水温による葉の成長不良が発生する可能性が高まることが分かった（表 2-3）。

表 2-2 ホタテガイのへい死の危険性が発生する水温（25℃以上）の出現頻度 MAP
(MRI-CGCM3)

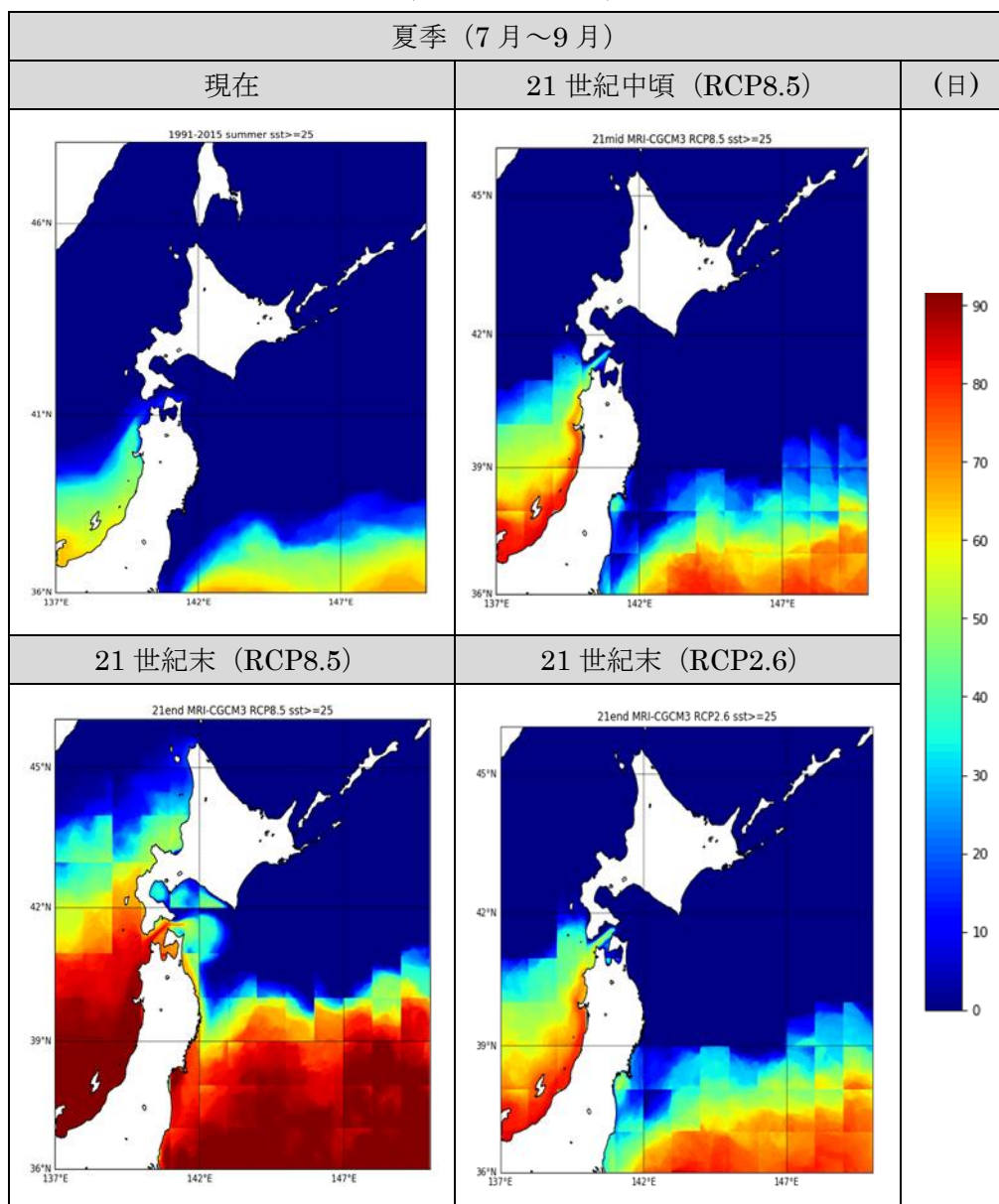
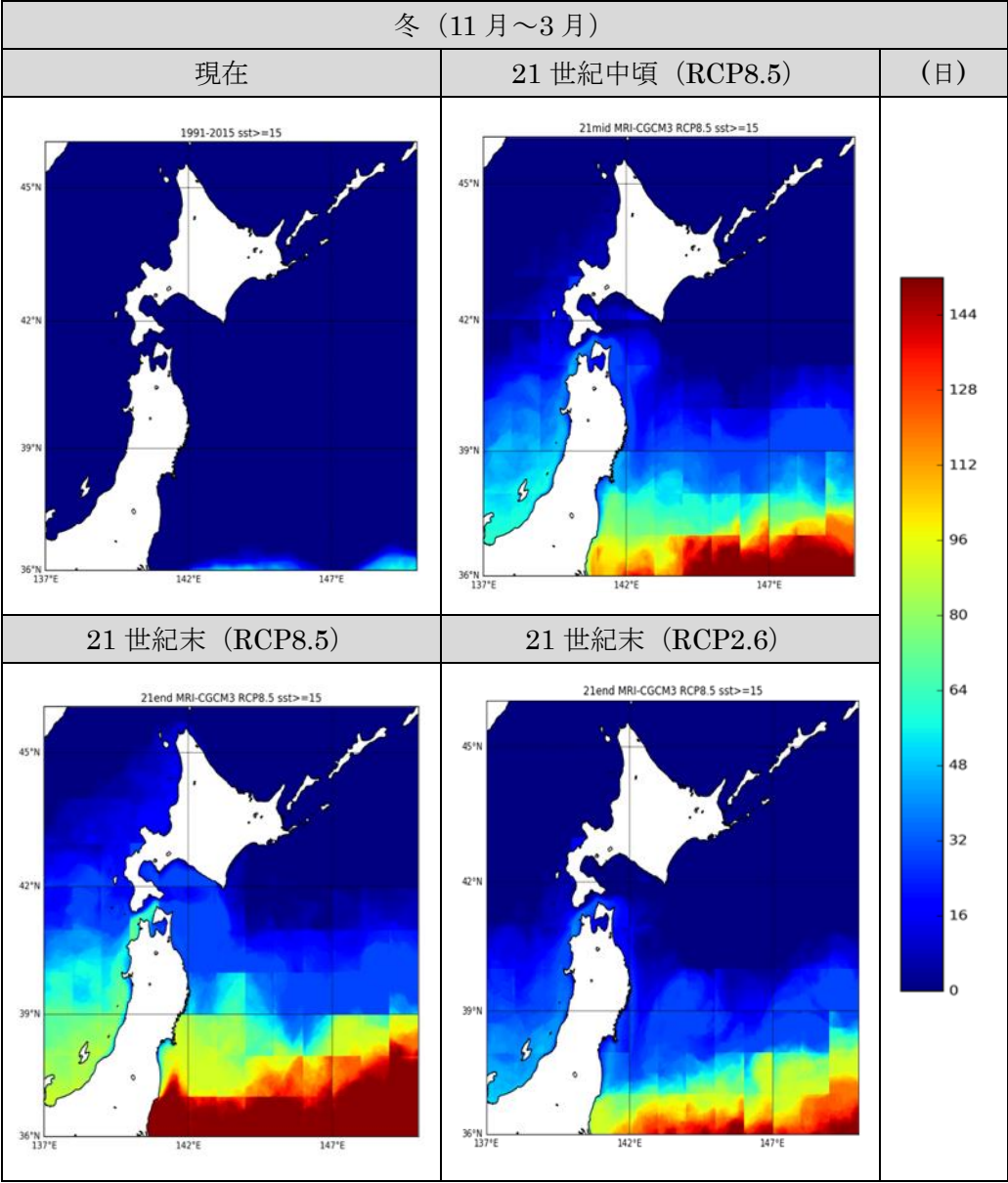


表 2-3 ワカメの成葉の成長不良が発生する水温（15℃以上）の出現頻度 MAP
(MRI-CGCM3)



2.1.6. 活用上の留意点

2.1.6.1. 本調査の将来予測対象とした事項

【ホタテガイへい死率予測】

使用した水温データは、水深毎にバイアス補正を行っている。なお、観測値がない水深帯については、内挿による補正を行っている点に注意が必要である。

【高水温出現頻度 MAP】

バイアス補正の都合上、表面水温のみの影響評価となっている。養殖施設は、表面より少し深い地点に設置されていることが多いが、水深が深いほど水温は低くなるため、予測値が若干過大評価となっていることが予想される。

【ワカメへの高温影響予測】

内湾の 1 地点における予測結果である。内湾は湾の向きと海流の流れにより、水温が大きく変化することがある。その点について考慮していない点に注意が必要である。

2.1.6.2. 本調査の将来予測の対象外とした事項

【ホタテガイへい死率予測】

ホタテガイのへい死には、水温の他、下記の要素も影響すると考えられる。ただし、本調査において気候変動影響予測を実施するに当たり、下記の影響を考慮していないことについて留意が必要である。

- ・ 貧酸素による影響
- ・ 餌環境の変化による影響
- ・ 波高や流速による影響

【ワカメへの高温影響予測】

ワカメに対する気候変動の影響については、水温及び栄養塩の他、下記の要素も影響すると考えられる。ただし、本調査において気候変動影響予測を実施するに当たり、下記の影響を考慮していないことについて留意が必要である。

- ・ 照度・光量による影響
- ・ 塩分による影響
- ・ 栄養塩濃度の影響

2.1.6.3. その他、成果を活用する上での制限事項

【ホタテガイへい死率予測】

- ・ 陸奥湾のホタテガイや水温の観測情報を基に作成されたモデルであるため、状況の異なる他の養殖地域に適用することは難しい。

2.1.7. 適応オプション

調査において検討した適応オプション及びその考え方を表 2-4～表 2-7 に示す。

表 2-4 ホタテガイへい死の適応オプション

適応 オプション	想定される 実施主体			評価結果							
	行政	事業者	個人	現状		実現可能性				効果	
				普及 状況	課題	人的 側面	物的 側面	コス ト面	情報 面	効果 発現 まで の時 間	期待 される 効果 の程 度
養殖施設の移動	●	●		普及 している	<ul style="list-style-type: none"> 養殖作業の重労働化 養殖面積の縮小化 	△	△	△	◎	短期	高
代替種の導入	●	●		-	<ul style="list-style-type: none"> 作業効率や価格面を考慮すると難しい 	◎	△	△	△	長期	低
陸上養殖の実施	●	●		-	<ul style="list-style-type: none"> 利益や養殖規模の縮小化 	△	△	△	△	長期	低
高温耐性品種の導入	●	●		-	<ul style="list-style-type: none"> 知見が十分ではない 	△	△	△	△	長期	低

表 2-5 適応オプションの考え方

適応オプション	適応オプションの考え方と出典
養殖施設の移動	過去に発生した高水温によるへい死被害の際にも、養殖施設を深く沈める対策が実施され効果も確認されている。（青森水総研、青森県庁へのヒアリング結果より）
代替種の導入	平成 22 年に高水温によるホタテガイの大量へい死が発生した際に、別の養殖種としてアカガイやホヤについての検討が行われている。代替種の導入に向けた必要経費についての支援や、適当な代替種の検討及び導入試験等については行政が行い、現場での実施は漁業者が行っていく体制になると思われる。（青森水総研、青森県庁へのヒアリング、内湾養殖 WG のヒアリング結果より）
陸上養殖の実施	現時点で、導入に必要な知見が十分ではないため、情報面を-としている。新たに情報を収集し、陸上養殖を実施するための試験を実施し、知見や経験を蓄積するためには、多くの時間やコストが必要になると想定される。
高温耐性品種の導入	現時点で、導入に必要な知見が十分ではないため、情報面を-としている。高温下での養殖が可能な品種を作出できたとしても、需要に十分に対応できるだけの高温耐性の種苗を安定的に供給するためには、さらに種苗生産技術の開発が必要になることから、高温耐性品種の導入までには非常に長い時間と、多額の研究費や新たな研究施設や種苗生産施設が必要になるとと思われるため、物的面及びコストに関しては△としている。

表 2-6 ワカメへの高温影響の適応オプション

適応 オプション	想定される 実施主体			評価結果							
	行政	事業者	個人	現状		実現可能性				効果	
				普及 状況	課題	人的 側面	物的 側面	コスト 面	情報 面	効果 発現 までの 時間	期待 される 効果の 程度
大型人工種 苗の導入	●	●		普及 している	<ul style="list-style-type: none"> 陸上で種 苗生産を 行う負担 が増える 高温への 対策につ いては、 温度管理 が必要と なる 	△	△	△	◎	短期	高
栄養塩予測 モデルの活 用	●	●		普及 している	<ul style="list-style-type: none"> モデルの 精度向上 のため、 継続的な 観測が必 要 	◎	△	△	△	長期	高
高温耐性品 種及びワカ メの南方種 の導入	●	●		-	<ul style="list-style-type: none"> 知見が十 分ではな い ブランド 維持とし ては検討 が必要 生態系へ の影響が 懸念され る 	◎	△	△	-	長期	低

表 2-7 適応オプションの考え方

適応オプション	適応オプションの考え方と出典
大型人工種苗の導入	<p>現在研究が進められており、既に現場への導入実績及び効果が得られている方法である。実施主体としては、陸上施設での種苗生産に関する、労力及びコストに対する支援は行政が担うのが適切であると考えますが、実施の可否については漁業者が周囲の状況を勘案しながら判断する必要がある。（岩手県水産技術センターヒアリング、大型人工種苗導入例 （岩手県水産技術センター HP 参照： http://www2.suigi.pref.iwate.jp/info/20171128news）</p>
栄養塩予測モデルの活用	<p>現在、既にワカメ養殖の現場で導入されており、秋季の栄養塩の供給時期については、かなりの精度で予測が可能となっている。ただし、春季の栄養塩の枯渇については、さらなる精度の向上が課題となっている。 （東北区水産研究所、岩手県水産技術センターヒアリング、栄養塩予測モデル導入例 （岩手県水産技術センター HP 参照： http://www2.suigi.pref.iwate.jp/research/20191028undaria_farming）</p>
高温耐性品種及びワカメの南方種の導入	<p>高温耐性の種苗を導入するための知見が十分ではない。地場産の高温耐性品種の選抜育種には時間を要することと異なる地域のワカメを利用するため、これまで築いてきた三陸ワカメのブランド、具体的には葉の厚さや歯ごたえあるワカメを存続させることは難しいと考えられる。その意味において、本適応オプションは三陸ワカメを対象とした適応策とはならないため、効果の程度を低いと考えられる。 （岩手県水産技術センターヒアリング、内湾養殖 WG ヒアリング結果）</p>

2.2. 気候シナリオに関する情報

2.2.1. 気候シナリオ基本情報

本調査で使用した気候シナリオの基本情報は、表 2-8 のとおりである。

表 2-8 使用した気候シナリオについて

項目	ホタテガイへい死率予測 ・高温出現頻度MAP	栄養塩予測	ワカメへの 高温影響予測
気候シナリオ名	海洋近未来予測力学的 ダウンスケーリングデータ by SI-CAT		NIES 統計 DS データ
気候モデル	MRI-CGCM3		MRI-CGCM3 MIROC5
気候パラメータ	日平均水温	日平均海面総熱 フラックス	日平均気温
排出シナリオ	RCP2.6 RCP8.5		
予測期間	21 世紀中頃 21 世紀末		
バイアス補正の有無	有り（地域）		有（全国）

2.2.2. 使用した気候パラメータに関する情報

使用した気候パラメータである平均気温を図 2-11 に、平均水温のデータを図 2-12 に示す。気温と水温のデータ両者において、今世紀末までにシナリオの RCP8.5 では、4～5℃の温度上昇が予測されている。また、気温のデータにおいて、MRI-CGCM3 と MIROC5 を比較すると、MIROC5 がより高温域に予測されている。

使用した気候パラメータであるフラックスの値を、図 2-13 に示す。図 2-13 に示した熱フラックスの値は、春に総熱フラックスが 0W/m² なる日からの積算値の値であり、正の値が上向きへの熱輸送を示している。解析した地点において、春季～夏季にかけては、21 世紀末 RCP8.5 では、上向きへの熱輸送が強く（海面冷却）なっているが、秋から冬にかけては、急激な下向きへの熱輸送（海面加熱）に移行している傾向がみられる。

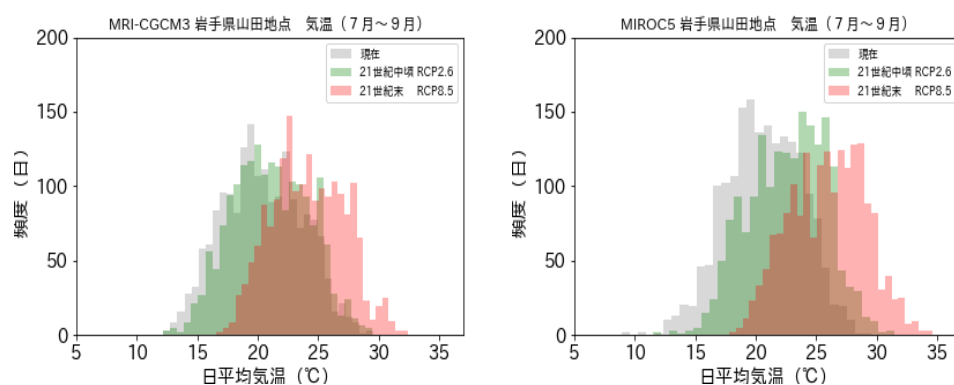


図 2-11 使用した気候シナリオにおける気温分布（左：MRI-CGCM3、右：MIROC5）

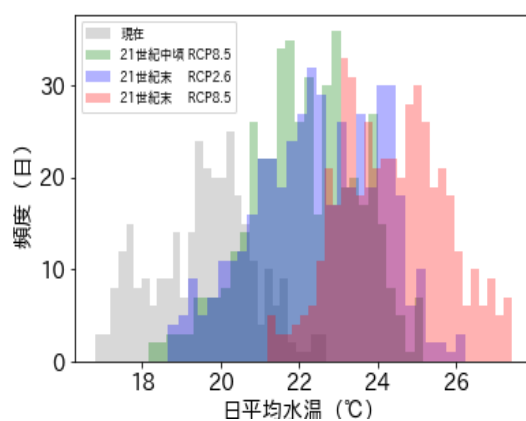


図 2-12 使用した気候シナリオにおける水温分布

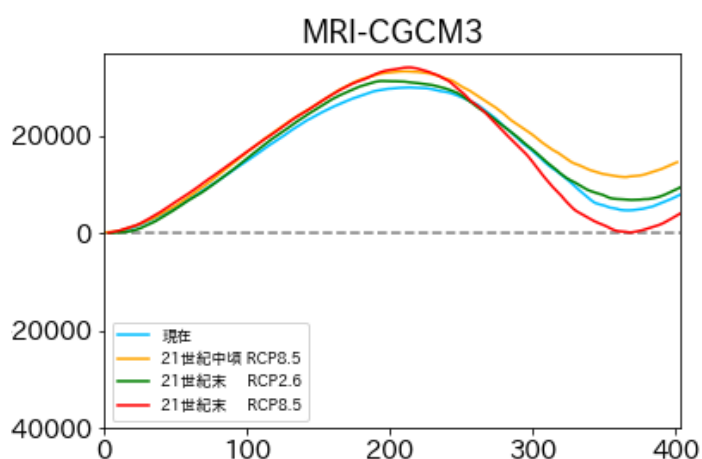


図 2-13 使用した気候シナリオにおける総熱フラックス気候値を用いた現在と将来の比較
(春に総熱フラックスが 0W/m^2 となる日からの積算値の値を示す)

2.2.3. 気候シナリオに関する留意事項

今回の影響評価では、1 地点のデータを使用して影響評価を行っている。使用するメッシュによっては、気温・水温の上昇量に多少の違いがあることに留意が必要である。

2.2.4. バイアス補正に関する情報

海洋近未来予測力学 DS データについては、バイアス補正が実施されていないデータであるため、使用する気候パラメータに合わせ、下記 2 種類の方法を実施した。

【ホタテガイのへい死率予測】

ホタテガイのへい死率予測では、陸奥湾内における各水深帯の水温データを使用するため、観測値として陸奥湾内に設置されている観測ブイのデータを使用し、深さ・季節毎に補正を行った。使用したデータの詳細を表 2-9 に示す。影響評価では陸奥湾全域の水温を対象としているが、使用できる観測値が 3 地点、深さ 4 層と限られているため、表 2-10 の補正方法によりバイアス補正を行った。バイアス補正の結果を、表 2-11 に示す。観測値と気候シナリオの RMSE 値を見ると、0.6℃以内に収まる程度に補正されていることが確認された。

表 2-9 陸奥湾内におけるホタテガイのへい死率予測を行う際の指標について

	内容
データセット	海洋近未来予測力学 DS データ by SI-CAT
気候指標	日平均水温
対象範囲	青森県陸奥湾（図 2-14）
空間解像度	2km 格子
時間解像度	日別値
対象時期	・現在の比較として 2007 年 1 月～2016 年 12 月を使用 ・21 世紀中頃として 2031 年～2050 年 日別値の 20 年平均値 ・21 世紀末として 2086 年～2100 年 日別値の 15 年平均値
バイアス補正に用いる観測データ	【データ名】陸奥湾内のブイロボデータ（青森・平舘・東湾）（図 2-14）
	【入手方法】青森産技水産総合研究所事業報告「陸奥湾海況自動観測事業」より引用
	【概要】3 地点において水深 1、15、30、底層（m）の 4 層の水温を観測して るデータ（底層は、平舘=45m、青森=44m、東湾=48m） 再現性の確認と補正に使用する深さについては図 2-15 に記載する。
	【期間】2007 年 1 月～2016 年 12 月
	【気候指標】海水温
	【空間解像度】ブイ観測地点 （平舘：N41.156,140.677E 東湾：N41.107, 140.971 青森：N 40.922, 140.787E）
	【時間解像度】半旬値

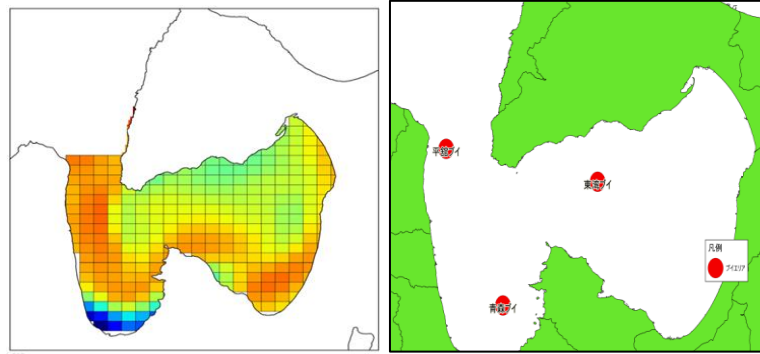


図 2-14 左：バイアス補正を行う対象範囲 右：陸奥湾内における観測ブイの位置

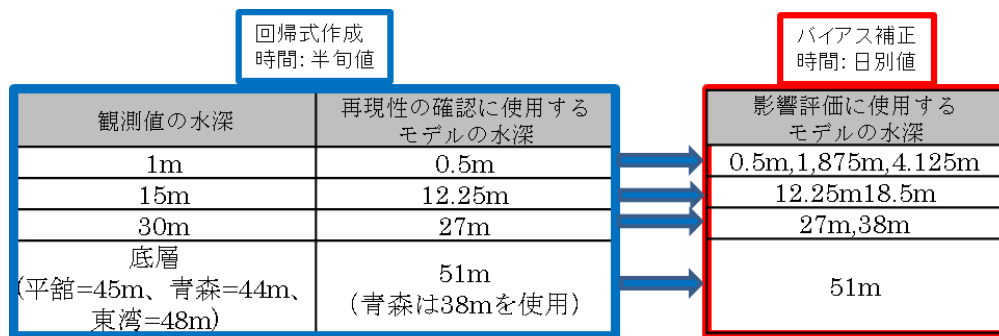


図 2-15 陸奥湾における再現性の確認とバイアス補正を行う際の水深について

表 2-10 バイアス補正方法

	内容
気候指標	水温
方法 0	観測値とモデル出力値（現在）をソートし、回帰式を作成し補正を行う方法。
概要	<p>【概要】</p> <p>深さ・季節毎に 3 地点、深さ 4 層の観測値とモデル出力値を、小さい値から大きい値の順に並べ替えて 2 次元プロットし、回帰式を作成する。作成した回帰式を、陸奥湾全域の将来水温に適用し補正を行う。</p> <p>【課題・限界等について】</p> <p>① 陸奥湾内は西側と東側で水温差があり、狭い湾内における海況の再現率等も検証した方が良いと考えられる。しかしながら、今回使用可能な観測データは 3 地点、深さ 4 層と限られており、深さ毎に 3 地点の観測値を使用し、作成した回帰式を陸奥湾全域に対応させる手法を用いることとした。</p> <p>② 影響評価に使用する時間分解能は日別値であるが、観測データが半旬値しか得られないため、半旬値を用いている。</p> <p>③ 影響評価に使用する水温データが深さ 8 層であるのに対して、観測値が 4 層のみであるため、補正の際には最も近い観測層で作成した回帰式を適用している。</p>
参考文献	<p>(Piani et al.2010)</p> <p>(佐々木他,2015)</p>

表 2-11 深さ・季節毎における補正前後の RMSE 値

季節	深さ	RMSE(補正前)	RMSE(補正後)
春季 (3月～5月)	1m	0.70	0.31
	15m	0.74	0.30
	30m	0.74	0.29
	45m	0.54	0.20
夏季 (6月～8月)	1m	1.42	0.56
	15m	1.30	0.25
	30m	1.76	0.30
	45m	1.01	0.28
秋季 (9月～11月)	1m	2.28	0.51
	15m	2.25	0.51
	30m	2.22	0.59
	45m	1.37	0.44
冬季 (12月～2月)	1m	0.47	0.33
	15m	0.47	0.35
	30m	0.47	0.36
	45m	0.71	0.39

【高水温出現頻度 MAP】

高水温出現頻度 MAP では、北海道・東北地域の沿岸水温を使用するため、補正を行うには広域な観測値が必要となる。そのため、衛星データである OISS を使用して、海面水温の補正を行った。使用したデータの詳細を表 2-12 に示す。北海道・東北沿岸の海域についてのバイアス補正に関しては、領域が広大となるため、緯度×経度それぞれ $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ で囲まれている格子毎に補正を行った。手法の詳細については、表 2-13 に示す。補正を行った結果の RMSE 値を、季節毎に図 2-17～図 2-20 に示す。観測値と気候シナリオの RMSE 値を見ると 0.6°C 以内となっており、観測値に近い値に補正することができた。

表 2-12 ②北海道・東北地域における影響を与える高温の出現頻度 MAP（簡易予測）を行う指標について

	内容
データセット	海洋近未来予測力学 DS データ by SI-CAT
気候指標	日平均水温
対象範囲	北海道・東北エリア（図 2-16 バイアス補正を行う対象範囲）
空間解像度	2km 格子
時間解像度	日別値
対象時期	<ul style="list-style-type: none"> ・現在の比較として 1996 年 1 月 1 日～2005 年 12 月 31 日 ・21 世紀中頃として 2031 年～2050 年 日別値の 20 年平均値 ・21 世紀末として 2086 年～2100 年 日別値の 15 年平均値
バイアス補正 に用いる観測 データ	【データ名】衛星データである NOAA の OISST（Optimum Interpolation Sea Surface Temperature）AVHRR-Only のデータを使用（Banzon et al,2016）
	【入手方法】HP よりダウンロード (HP : https://www.ncdc.noaa.gov/oisst)
	【概要】さまざまなプラットフォーム（衛星、船舶、ブイ）からの観測値を通常のグローバルグリッドに組み合わせて分析されたデータ。
	【期間】1996 年 1 月 2 日～2005 年 12 月 31 日(1 月 1 日のデータには不具合があり使用不可であった)
	【気候指標】海面水温
	【空間解像度】1/4°
	【時間解像度】日別値

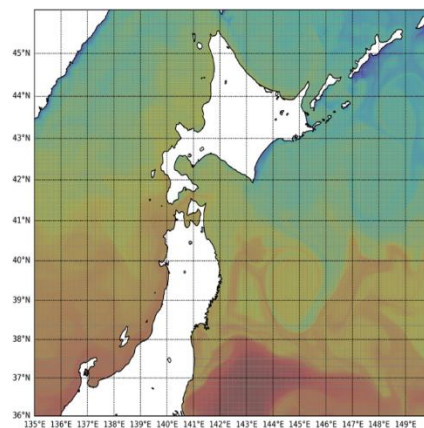


図 2-16 バイアス補正を行う対象範囲

表 2-13 バイアス補正方法

	内容
気候指標	水温
方法	観測値とモデル出力値（現在）をソートし回帰式を作成し補正を行う方法。
概要	<p>【概要】</p> <p>1° × 1° （緯度×経度）格子毎に、衛星データによる観測値とモデル出力値を小さい値から大きい値の順に並べ替え、平面プロットし、回帰式を作成した。それぞれの格子に作成した回帰式を適用し、補正を行った。</p> <p>【課題・限界等について】</p> <p>使用した衛星データは、0.25° と気候モデルデータ(2km メッシュ)よりも粗いため、補正を行う際には親潮や黒潮等の細い流れまでを補正することは難しい。</p>
参考文献	<p>Piani et al.(2010)</p> <p>(佐々木他,2015)</p>

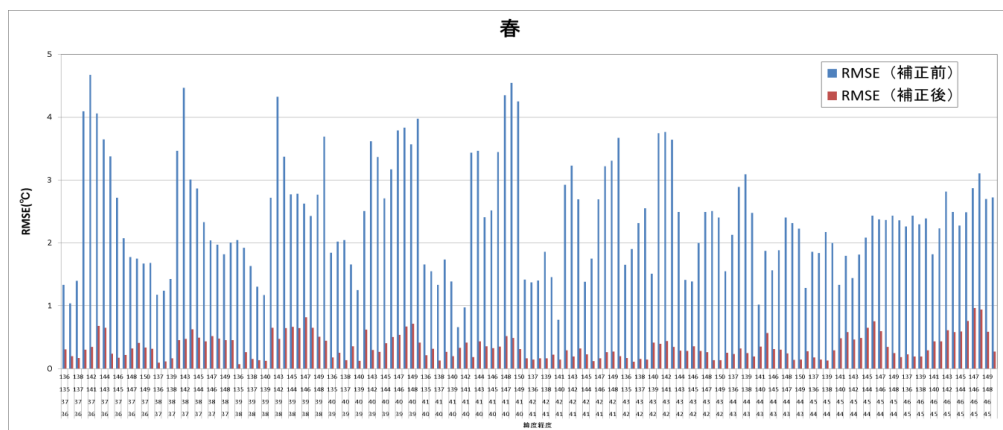


図 2-17 春季における各緯度経度の RMSE 値
(青が補正前、赤が補正後の RMSE 値を示す)

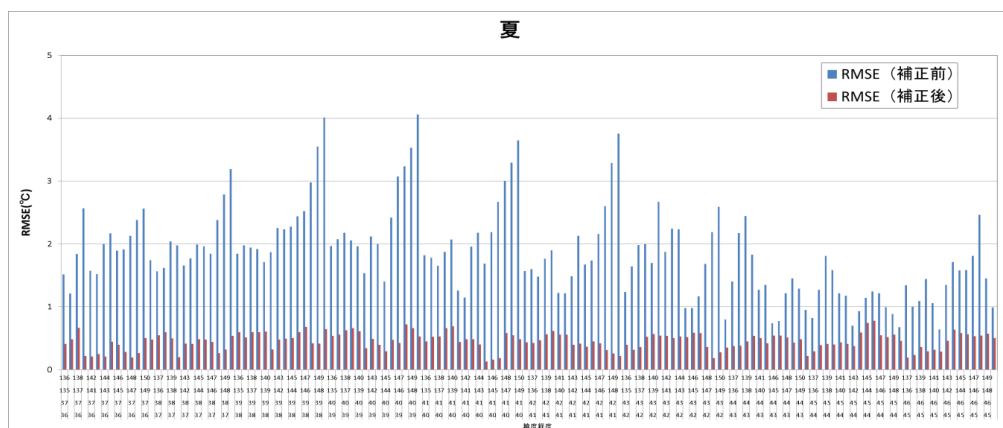


図 2-18 夏季における各緯度経度の RMSE 値
(青が補正前、赤が補正後の RMSE 値を示す)

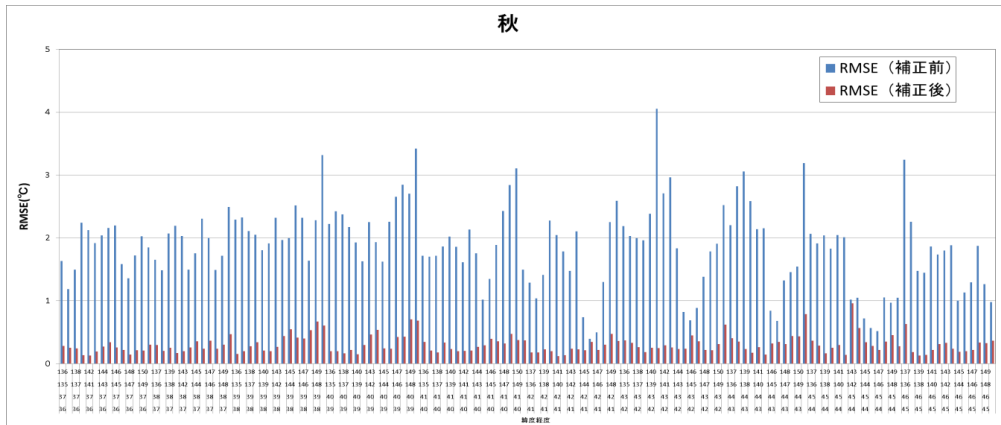


図 2-19 秋季における各緯度経度の RMSE 値
(青が補正前、赤が補正後の RMSE 値を示す)

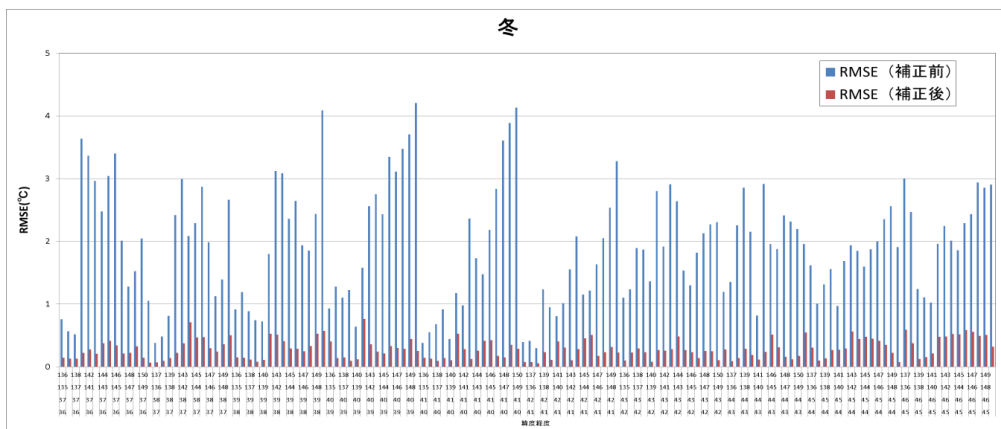


図 2-20 冬季における各緯度経度の RMSE 値
(青が補正前、赤が補正後の RMSE 値を示す)

2.2.5. 気候シナリオ選択の理由

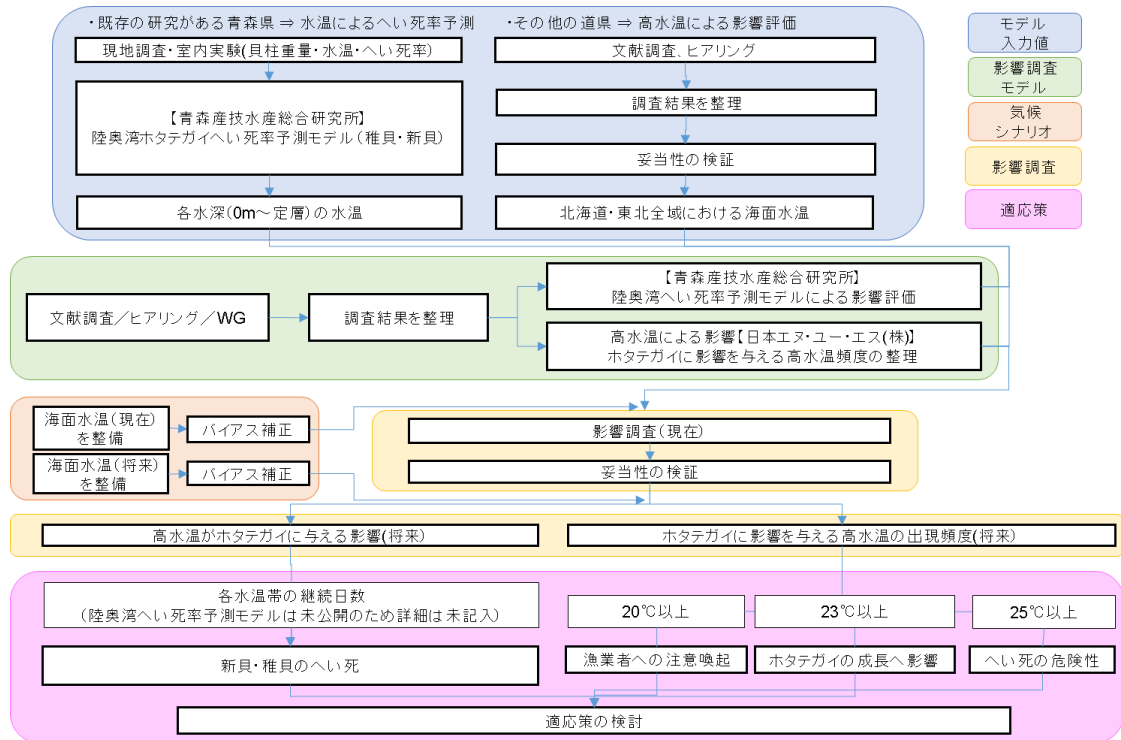
海洋近未来予測力学的ダウンスケーリングデータは、唯一海水温を含む気候シナリオであるため利用した。

NIES 統計 DS データについては、内湾の水温を算出する際に、平均的な気温情報（日平均気温）で十分な精度が確保できることから使用した。

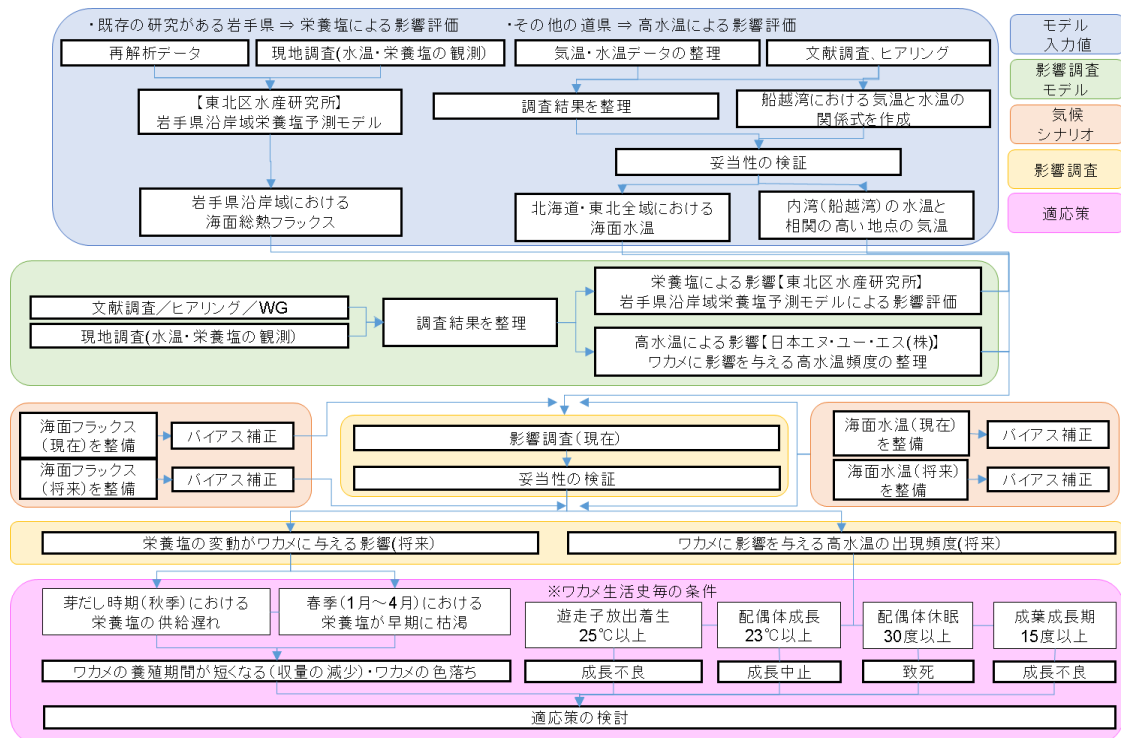
2.3. 気候変動影響に関する調査手法

2.3.1. 手順

【ホタテガイへの死率予測】



【ワカメへの高温影響予測】



2.3.2. 使用したデータ・文献

使用したデータを表 2-14、使用した文献について、表 2-15 表 2-16 に示す。そのほか、収集したデータや文献については収集データリスト及び、参考文献リストを参照。

表 2-14 収集したデータ

No.	収集したデータ	データ項目	備考
1	船越湾における連続観測データ	水温、塩分、栄養塩 (硝酸態窒素)、クロ ロフィル	本事業の現地調査に て取得
2	岩手県沖海域における 4 定線モニタリ ング	水温、塩分、栄養塩 (硝酸・亜硝酸態窒 素)	本事業の現地調査に て取得
3	衛星データである NOAA の OISST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) AVHRR-Only のデータ HP よりダウンロード (https://www.ncdc.noaa.gov/oisst)	表面水温	さまざまなプラット フォーム（衛星、船 舶、ブイ）からの観 測値を通常のグロー バルグリッドに組み 合わせて分析された 水温データ。気候シ ナリオのバイアス補 正に使用。

表 2-15 収集した文献

収集した論文	内容
「猛暑時のホタテガイへい死率を低減する養殖生産技術の開発」(青森技研水産総合研究所) ホタテガイ養殖管理情報(胆振地区水産技術普及指導所)	20℃以上の水温はホタテガイに下記指標として用いられている。 ・ 新貝の成長が鈍化し始める。 ・ 漁業者へ稚貝の分散を無理に行わないように注意喚起(噴火湾)を行う。
社団法人日本水産資源保護協会(1980)『水生生物生態資料』	23℃以上の水温では、ホタテガイの繊毛の運動が低下し、成長の鈍化がみられる。 25℃以上の水温はホタテガイのへい死の危険性が高まる。
須藤俊造(1980)『沿岸海藻類の増殖』社団法人日本水産資源保護協会	ワカメは表 2-16 に示す水温により影響を受ける。
中川憲一 福田義和 金子秀毅 中村寛 中村辰男(2018)東北地方の養殖漁業のための沿岸水温予測方法の紹介, 測候時報, 85, 13-29.	内湾の水温を近隣の気温データから予測する手法。

表 2-16 ワカメに影響を与える水温

生活史	水温条件	影響	時期(岩手県)
遊走子放出着生	25℃以上	成長不良	7月～8月
糸状体成長	23℃以上	成長中止	9月～10月
糸状体休眠	30℃以上	致死	9月～10月
成葉の成長	15℃以上	成長不良	11月～3月

2.3.3. 有識者ヒアリング

有識者ヒアリングの概要を、表 2-17 に示す。

表 2-17 ヒアリング結果

NO.	1
ヒアリング対象者	東北区水産研究所 資源環境部 海洋動態グループ 筧 茂穂氏
日付	2017 年 10 月 3 日 09:30～10:30
場所	東北区水産研究所 塩釜庁舎
概要	本調査の計画に関して確認を行った。岩手県を対象としたモデルであるが、定線での水温と栄養塩の鉛直分布データがあれば他の位置期においても適用可能であることについてご教示頂いた。
NO.	2
ヒアリング対象者	東京大学海洋生物資源部門環境動態分野 教授 伊藤進一氏
日付	2017 年 9 月 29 日 14:00～15:15
場所	東京大学大気 海洋研究所海洋生物資源部
概要	下記内容についてご教示頂いた。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 陸奥湾における将来水温予測に関する手法 ・ ホタテガイへの影響評価について(水温以外に波高や流速、溶存酸素の影響も大きいこと ・ ワカメの影響評価について
NO.	3
ヒアリング対象者	東北区水産研究所 資源環境部 海洋動態グループ 筧 茂穂氏
日付	2017 年 10 月 3 日 14:00～15:00
場所	東北区水産研究所 塩釜庁舎
概要	本調査に使用する栄養塩モデル（鉛直 1 次元モデル）についてご教示頂いた。インプットとして熱フラックスのデータが必要であること、将来予測を行うために、将来予測の上昇値（将来予測-現在）を現在の観測値に上乗せして予測することができることが可能であることが分かった。
NO.	4 第一回内湾養殖 WG
ヒアリング対象者	東京大学海洋生物資源部門環境動態分野 教授 伊藤進一氏 東北区水産研究所 資源環境部 海洋動態グループ 筧 茂穂氏 内湾養殖 WG 参加者(各県水産関係者)
日付	2017 年 12 月 4 日 13:30～15:30
場所	いわて県民情報交流センター（アイーナ）
概要	本調査の位置づけについて参加者全員で共有を行い、調査の手法や現地調査について各県の意見を頂いた。

NO.	5 第二回内湾養殖 WG
ヒアリング対象者	東京大学海洋生物資源部門環境動態分野 教授 伊藤進一氏 東北区水産研究所 資源環境部 海洋動態グループ 筧 茂穂氏 内湾養殖 WG 参加者(各県水産関係者)
日付	2017 年 2 月 15 日 13:30～15:30
場所	TKP 仙台西口ビジネスセンター「ミーティングルーム 2C」 (2F)
概要	<p>第二回内湾養殖 WG の議論から下記結果が得られた。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 各県毎に養殖管理を行う水温に違いがあり、各地域や湾別に情報を整理する必要があることが分かった。 ・ 調査手法については、統計的手法による水温予測の精度を向上する手法を有識者よりご意見頂いた。栄養塩の予測手法を他県に反映できる方法はないか、観測データの確認を行った。 ・ 適応策の検討として考えられる代替種等を議論した。
NO.	6
ヒアリング対象者	東京大学海洋生物資源部門環境動態分野 教授 伊藤進一氏
日付	2018 年 5 月 23 日 17:00～17:30
場所	JpGU 会場（幕張メッセ）
概要	<p>陸奥湾のバイアス補正について下記内容についてご教示頂いた。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 海面の観測値として OISST※が良く使用されている。 ・ バイアス補正は、将来予測値と現在の差分を使用する方法が、最も簡単に行える。 ・ 陸奥湾については観測値が限られているため、3 点のブイデータを平均し、湾の平均値として各層毎にバイアス補正をかける手法が良いのではないか。

※衛星データである NOAA の OISST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature)

NO.	7 第三回内湾養殖 WG
ヒアリング対象者	東京大学海洋生物資源部門環境動態分野 教授 伊藤進一氏 東北区水産研究所 資源環境部 海洋動態グループ 筧 茂穂氏 内湾養殖 WG 参加者(各県水産関係者)
日付	2018 年 9 月 10 日 13:30~15:30
場所	TKP 仙台西口ビジネスセンター「ミーティングルーム 2C」 (2F)
概要	<p>第三回内湾養殖 WG の議論から下記結果が得られた。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 現地調査の結果から、2018 年における岩手県沿岸の栄養塩濃度の傾向や、春季における成層のセットアップの閾値と栄養塩の消費速度が得られた。 ・ 水温以外の被害状況として、低気圧や台風等による養殖施設の被害が発生していることが分かった。 ・ ワカメの適応策に関して議論がなされた。将来気温が上昇して、栄養塩が低下した際にワカメの色落ちが心配される。薬品を用いた pH 調整が対策として挙げられるが、一般消費者への印象としてあまり良くない。色落ちする前の刈取り時期の調整等に対応していく必要がある。ただし、刈取り時期をただ早めるだけだと収量が減少してしまうため、適応策に関しては良く検討していく必要があることが分かった。
NO.	8
ヒアリング対象者	東北区水産研究所 資源環境部 海洋動態グループ 筧 茂穂氏 岩手県水産技術センター
日付	2019 年 1 月 31 日 09:30~11:00
場所	岩手県水産技術センター 1 階会議室
概要	<p>岩手県沿岸における栄養塩濃度の変化の予測を行ったところ、想定とは大きく異なる結果となることが分かった。また、適応策についての議論も実施した。</p>

NO.	9
ヒアリング対象者	東京大学海洋生物資源部門環境動態分野 教授 伊藤進一氏
日付	2019 年 4 月 11 日 10:00~11:30
場所	東京大学 柏の葉キャンパス 大気海洋研究所 5 階
概要	<p>陸奥湾におけるバイアス補正の手法と鉛直 1 次元モデルによる影響評価に関して、下記ご助言を頂いた。</p> <p>① 陸奥湾におけるバイアス補正について 観測値が有る層とモデルの最近層のデータで平均誤差を求め、観測値と離れたモデル層については鉛直内層にて求める手法が最も適当である。</p> <p>② 栄養塩予測モデルに関して 現在・21 世紀中頃・21 世紀末の熱フラックスの分布図から、熱フラックスの大きさが、現在<21 世紀末<21 世紀中頃となる傾向は、解析に使用した地点固有のものではなく、三陸沿岸全域で同様の傾向であることが分かる。</p>
NO.	10 第四回内湾養殖 WG
ヒアリング対象者	東京大学海洋生物資源部門環境動態分野 教授 伊藤進一氏 東北区水産研究所 資源環境部 海洋動態グループ 笥 茂穂氏 内湾養殖 WG 参加者(各県水産関係者)
日付	2019 年 6 月 11 日 13:30~15:30
場所	TKP 仙台西口ビジネスセンター「ミーティングルーム 2C」 (2F)
概要	<p>第四回内湾養殖 WG では、影響評価結果の共有を行い、結果について同意いただいた。また、総合討論にて各県の適応策について発表頂き、議論を行った。具体的な適応策としては下記内容が挙げられている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ワカメ養殖における大型人工種苗の導入 ・ 新しい魚種や養殖種の検討

NO.	11
ヒアリング対象者	国立研究開発法人海洋研究開発機構 石川洋一氏
日付	2019 年 8 月 30 日 16:00~17:30
場所	日本エヌ・ユー・エス株式会社 501 応接室
概要	<p>栄養塩予測モデルに関して、下記ご助言を頂いた。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 熱フラックスは、水温と気温の差に風速を乗じて求めている。気温と水温の上昇速度にラグがあるため、どの地点を取るかで熱フラックスの値は大きく変わってしまう。 ・ 海洋モデルの気温と水温については、シナリオと期間に対して想定どおりの並びである。しかし熱エネルギー（気温と水温の差）を見たときに、並び順がおかしくなる。これが熱フラックスの傾向を示しており、不確実性が大きい結果が得られている。 ・ 今回使用した栄養塩予測モデルは現在においては正しいモデルであるが、将来の状況に適用できるかは大変難しい問題である。「栄養塩については現在研究中」であるというまとめ方が事業としては良いのではないかと思われる。
NO.	12
ヒアリング対象者	東北区水産研究所 資源環境部 海洋動態グループ 笥 茂穂氏 岩手県水産技術センター
日付	2019 年 11 月 15 日 14:00~15:30
場所	岩手県水産技術センター 1 階会議室
概要	<p>熱フラックスデータの不確実性と高温による影響の整理について共有し、進め方について同意を頂いた。高温の影響評価として、配偶体時に 20℃以上の期間が長くなると成熟が遅延し芽出しが遅れる可能性についてご教示頂き、今後の整理として取り入れていくこととなった。</p>

2.3.4. 観測及び実証実験

ワカメ養殖にとって重要となる栄養塩と、水温や塩分との関係を明らかにするためのデータを収集し、影響評価に使用する栄養塩予測モデルの精度向上を図ることを目的として、平成 30 年～平成 31 年度にかけて現地調査を実施した。現地調査として、東北区水産研究所による船越湾における水温・塩分・栄養塩等の連続観測、及び岩手県水産技術センターによる岩手県沖の 4 定線の水温・塩分・栄養塩のモニタリング調査を実施した。調査内容と調査地点について、表 2-18、図 2-21、表 2-19 にそれぞれ示す。

なお、本調査では実証実験については実施していない。

表 2-18 現地調査の調査内容と実施者

調査項目	実施者	詳細
船越湾における水温・塩分・栄養塩等の連続観測	東北区水産研究所 岩手県水産技術センター	<p>使用機器： 硝酸塩センサー(SUNA-V2)、水温・塩分計、クロロフィルセンサー</p> <p>観測期間： 2018年3月～5月(春季)、2018年10月～12月(秋季)</p> <p>観測項目： 水温、塩分、栄養塩(硝酸態窒素)、クロロフィル</p> <p>観測頻度： 1回/時間</p> <p>観測層： 水深5m(海底直上1mで水温・塩分を測定)</p>
岩手県沖の海域 4 定線(黒崎、トドヶ崎、尾崎、椿島)における水温・塩分・栄養塩に関するモニタリング	岩手県水産技術センター	<p>観測方法： 漁業指導調査船(岩手丸)による 4 定線の 2 定点における採水</p> <p>観測期間： 2018年4月～2019年2月</p> <p>観測項目： 水温、塩分、栄養塩(硝酸・亜硝酸態窒素)</p> <p>観測頻度： 1回/月</p> <p>観測定点： 岸から0マイル、10マイル</p> <p>採水層： 水深0m、10m、30m、50m、75m(月により採水層の増減あり)</p>

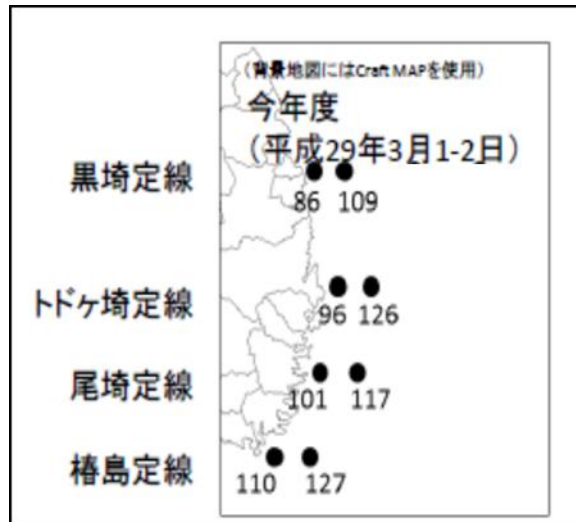


図 2-21 岩手県沖の海域 4 定線

出典：2016 年度ワカメ養殖情報第 7 号（岩手県水産技術センター）

表 2-19 観測定線の緯度情報

定線名	緯度	観測点
黒崎	北緯 40 度 00 分	0 マイル、10 マイル
トドヶ崎	北緯 39 度 32 分	
尾崎	北緯 39 度 15 分	
樺島	北緯 38 度 56 分	

2.3.5. 気候変動影響予測手法の検討

ホタテガイに関しては、青森産技水産総合研究所に影響評価を依頼した。依頼した理由及び、本調査が陸奥湾に特化している理由は下記 2 点である。①平成 22 年に陸奥湾において高水温によるホタテガイの大量へい死（青森県,2011,2012）が発生しており、中心となって原因究明や対策を検討した青森産技水産総合研究所は、高水温がホタテガイ養殖に与える影響に関して豊富な知見を有している。②青森産技水産総合研究所は、既に観測値と現地調査のデータから、陸奥湾におけるホタテガイへい死率予測モデルを開発している。同様の事例は他県において確認されていないため、高水温の影響によるへい死率の予測に関しては、陸奥湾に特化した形で影響評価を行った。

ワカメについては、東北区水産研究所に栄養塩濃度の変化による影響評価を依頼した。依頼した理由及び、本調査が岩手県沿岸に特化している理由は下記 2 点である。①岩手県沿岸では、数十年前から水温・塩分・栄養塩の定点観測が行われており栄養塩のデータ

が豊富にある。②観測データから栄養塩予測モデル（Kakehi et al.,2018）を開発しており、既に精度の良い近未来予測モデル（1 カ月先予報）として稼働していること。他県においても栄養塩予測モデルを利用できないか検討を行ったが、内湾養殖 WG において使用可能な水温・塩分・栄養塩の鉛直データがないと判断されたため、岩手県沿岸に特化した形で影響評価を行った。

しかしながら、栄養塩予測モデルを用いた将来予測の結果は不安定となり、50 年～100 年先の将来に関する影響評価に利用するのは、現時点では難しいと判断した。そのため、モデルとシナリオについて安定した予測結果が得られている水温のデータを用いて、高水温による影響評価を行うこととした。高水温の影響については、岩手県ワカメ養殖ハンドブック（岩手県,2003）を参考に、配偶体が成熟を始める水温が 20℃以下となる時期に関する予測を行った。本調査の対象とした船越湾は、最大幅で 5 km 程度の南北に伸びた小さい湾であり、ワカメ養殖が重要な水産業となっている。本事業で提供された海洋近未来予測力学的ダウンスケーリングデータは空間分解能が 2km であるため、船越湾の地形を表現しきれていない。そこで、今回は近隣の気温データから水温の統計学的に予測を行う手法を用いて、将来の水温予測を行った。

モデル分析を行った陸奥湾や岩手県沿岸以外の地域については、高水温出現頻度 MAP を作成して、定性的な影響予測を実施した。また、観測値が少なく、影響評価モデルを作成することが難しい地域については、文献情報を基にホタテガイとワカメに影響を与える水温帯の出現頻度を整理した。

2.3.6. 影響予測モデルに関する情報

2.3.6.1. ホタテガイへい死率予測モデル

青森産技水産総合研究所が、陸奥湾において発生した高水温による被害状況や、室内実験のデータを基に作成したモデルを使用し、ホタテガイのへい死率の予測を行った（図 2-22）。ホタテガイは採苗から 2～3 年の養殖期間をかけて出荷されるが、稚貝時期と新貝時期は水温が高い時期（7 月～9 月）と重なるため、高水温の影響を非常に受けやすい。

（図 2-23）。そこで、稚貝と新貝それぞれへの影響について、稚貝のへい死率予測モデル（室内試験データ、現地調査による水温データ及び、へい死率のデータから作成）と、新貝のへい死率モデル（室内試験によるへい死率データ、貝柱重量データ、水温のデータを基に作成）を使用して影響評価を行った。稚貝のへい死率モデルは 25℃以上の水温の出現日数からへい死率を予測するが、新貝のへい死率モデルでは、20℃以上の水温を 1 度刻みにした水温帯の出現日数を求め、さらに高水温の出現日数から推定される貝柱減少量から得られる貝柱重量を、へい死率の予測に用いている。

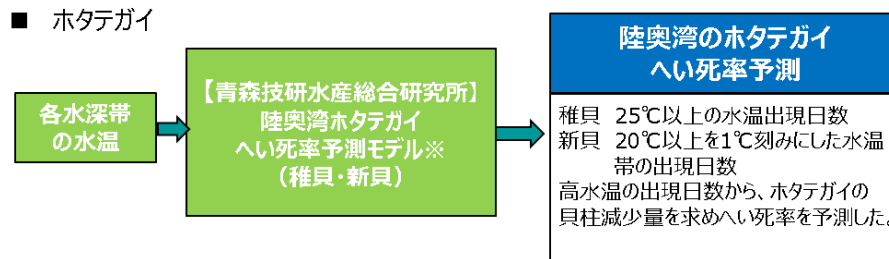


図 2-22 陸奥湾のホタテガイへい死率予測モデル

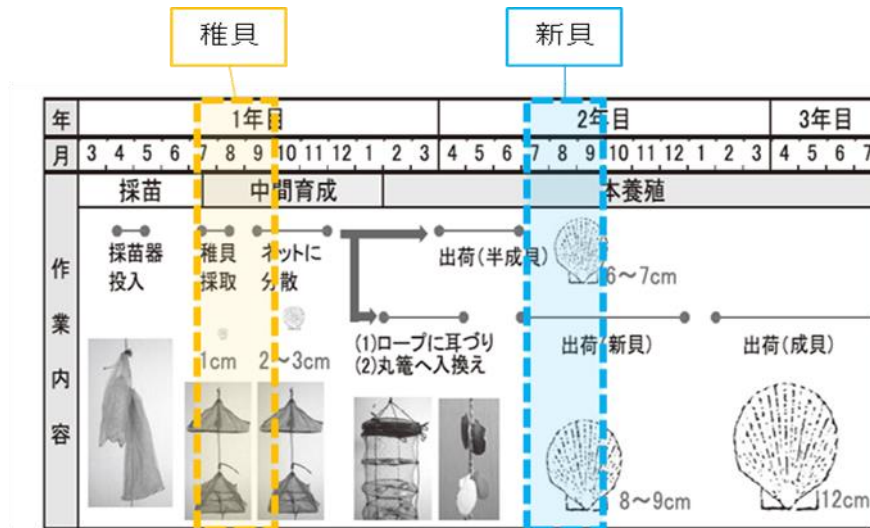


図1 ホタテガイ養殖作業の工程表

出典:青森県水産総合研究所「復活！！ホタテガイ」(42P)

図 2-23 ホタテガイの養殖行程表

(出典:青森技研水産総合研究所「復活！！ホタテガイ」(42P))

2.3.6.2. ワカメへの高温影響予測

今回対象とした岩手県船越湾は、小さな湾であるために用いたデータの解析度では捉えることが難しい。そこで、気温のデータから内湾水温を予測する手法を用いて求めた水温を用いて、ワカメに影響を与える水温の影響評価を行った(図 2-24)。

気象庁仙台管区気象台の季節予報を用いた沿岸水温の予測手法(中川他,2018)に基づき、内湾域における将来の水温予測を行った。手順は以下のとおりである。

- ① 過去水温の把握(過去 22 年程度～現在)
- ② 過去気温の把握(過去 22 年程度～現在)
- ③ ①、②のデータから相関の高い地点の組み合わせを得る。
- ④ ①、②のデータから過去水温と過去気温の関係式を求める
- ⑤ 将来の気候データから②の地点と最も近い地点の将来気温データを抽出する
- ⑥ ④で作成した関係式に⑤の将来気温のデータを代入し、将来水温データを求める。

本調査では岩手県にある船越湾を対象として、船越湾の近隣のアメダスデータ(山田、新町、釜石)のうち、最も相関が高かった観測地点を採用した(図 2-25)。

3 地点における、水温と気温のデータ関係を整理した結果、直線的な変化を示す値とし

て、気温と水温を4旬ずらした値を用いて回帰式の作成を行った。さらに、最も相関係数が高い山田の地点における回帰式を採用し（表 2-20）、配偶体が成熟を始める 20℃以下となる時期を求めて影響評価を行った。



図 2-24 船越湾におけるワカメへの高温影響予測



図 2-25 船越湾と隣の AMeDAS の地点の位置関係

出典:気象庁 HP

(http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/select/prefecture.php?prec_no=33&block_no=&year=&month=&day=&view=)を加工して作成

表 2-20 水温を4旬ずらしたデータにおける各地点の回帰式と決定係数

項目/地点名	釜石	山田	新町
回帰式	$y=0.6253x+5.6678$	$y=0.6170x+6.1886$	$y=0.5868x+6.2933$
決定係数 (R^2)	0.9804	0.9825	0.9734

2.3.6.3. 高水温出現頻度 MAP

観測データが乏しく、詳細な影響評価が難しい地域については、文献調査によって得られた情報を基に、影響を与える水温帯の出現頻度日数を求めた（図 2-26）。本調査で収集した文献情報を、表 2-21 及び表 2-22 に示す。本調査では、ホタテガイへい死の危険性が高まる 25℃以上の水温と、ワカメの成葉の成長不良を引き起こす 15℃以上の水温を、最も影響のある水温として着目し、高水温出現頻度 MAP の作成を行った。

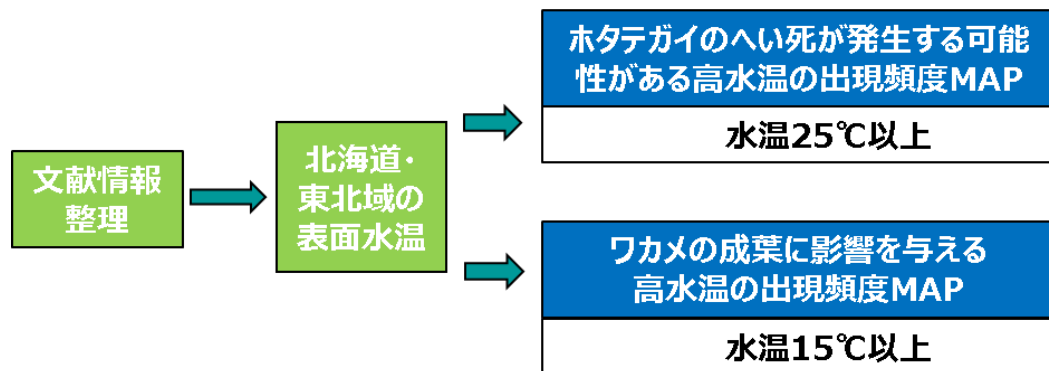


図 2-26 高水温出現頻度 MAP

表 2-21 ホタテガイに影響を与える水温

水温（日平均値）	影響	出典
20℃以上	新貝の成長が鈍化し始める。 漁業者へ稚貝の分散を無理に行わないように注意喚起（噴火湾）を行う。	内湾養殖 WG ヒアリング結果 参照： 「猛暑時のホタテガイへい死率を低減する養殖生産技術の開発」（青森技研水産総合研究所） ホタテガイ養殖管理情報（胆振地区水産技術普及指導所）
23℃以上	繊毛の運動が低下し、成長の鈍化が始まる。	社団法人日本水産資源保護協会（1980） 『水生生物生態資料』
25℃以上 （25℃～26℃）	へい死の危険性が高まる。	社団法人日本水産資源保護協会（1980） 『水生生物生態資料』

表 2-22 ワカメに影響を与える水温

生活史	水温条件	影響	時期（岩手県）	参考文献
遊走子放出着生	25℃以上	成長不良	7月～8月	須藤俊造（1980） 『沿岸海藻類の増殖』社団法人 日本水産資源保護協会
糸状体成長	23℃以上	成長中止	9月～10月	
糸状体休眠	30℃以上	致死	9月～10月	
成葉の成長	15℃以上	成長不良	11月～3月	

2.3.6.4. 栄養塩予測モデル

東北区水産研究所が、岩手県沿岸及び船越湾における観測データを基に作成した栄養塩予測モデル（Kakehi et al., 2018）を用いて将来の栄養塩予測を行った（図 2-27）。モデルに与える初期値として、水温、塩分、栄養塩濃度を用いた。また、秋季の栄養塩共有予測については、2016 年及び 2017 年の 9 月に観測したデータを使用した。一方、春季の栄養塩枯渇予測には、2017 年及び 2018 年 3 月に、東北区水産研究所と岩手県水産技術センターが、船越湾において共同で行った多項目水質計（AAQ）観測の水温、塩分の鉛

直分布を用いた。さらに、これらのデータに岩手県沿岸域における海面総熱フラックスのデータをインプットし予測を行った。

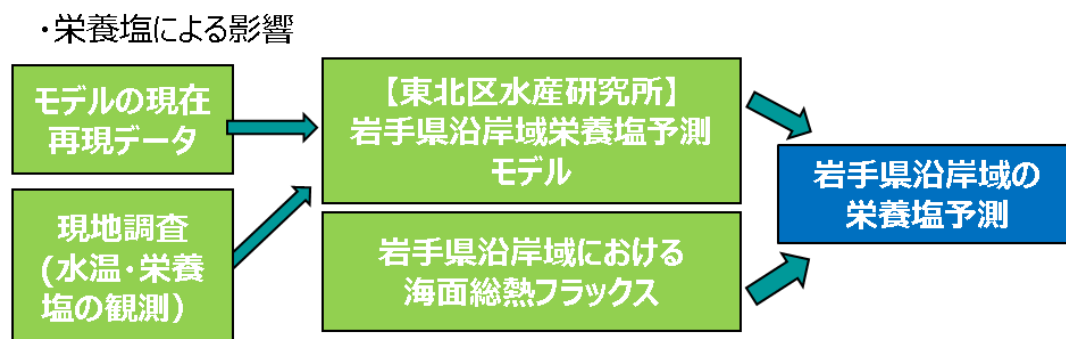


図 2-27 岩手県沿岸の栄養塩予測モデルによる栄養塩予測

2.3.7. 影響予測に必要な入力パラメータ

使用した気候パラメータについては、2.1.4 に示すとおりである。水温と気温のデータについては、日毎の 20 年平均値を作成し、モデルへのインプットを行った。熱フラックスのデータについては、現在と将来（21 世紀中頃・21 世紀末）の上昇分（将来-現在）を現在の観測値に上乗せする形で使用した。

2.3.8. 影響予測における留意事項（制限事項）

船越湾におけるワカメへの高温影響予測の際に使用した水温と気温の回帰式については、現在の関係が将来も変わらないことを前提としている点に留意する必要がある

2.4. 調査結果

2.4.1. 文献調査結果

本調査でホタテガイ・ワカメの影響評価をするうえで、必要な観測データが乏しく、詳細な影響評価が難しい地域については、文献調査の情報を用いて調査を行った。ホタテガイについては、25℃以上でへい死の危険性があること、ワカメ成葉の時期（冬）に 15℃以上の水温で影響があることから、それぞれの水温の出現頻度によりリスクの増減を定性的に評価した。

また、文献情報から海洋予測モデルで表現できない小さな湾について、気温から水温を求める手法を得ることができた。この手法により船越湾の水温を求め、調査を行った。

2.4.2. 有識者ヒアリングの結果

有識者ヒアリングでは本調査の解析手法、現地調査の手法についてご助言を頂き、反映させながら調査を行った。特にヒアリングで得られた情報は下記 2 点である。

- ・ 海水温のバイアス補正について、影響評価の内容に合わせた手法や使用する観測値についてご助言頂いた。具体的には、北海道・東北広域の海水温について観測値 OISST を使用して格子毎に補正を行う手法と、陸奥湾において、3 地点ブイの平均

値を使用し深さ毎に補正をする方法である。

- ・ 栄養塩予測モデルについては、将来予測の結果の大気海洋の整合性（熱フラックスの挙動）や、現在の観測値で作成した栄養塩予測モデルを将来へ適用することにより生まれる誤差等から、安定した結果を得ることができなかったことについてご確認頂き、将来予測結果としては用いるべきではないことをご助言頂いた。

2.4.3. 観測や実証実験の結果

栄養塩に関して、春季の観測では成層が形成され、栄養塩が消費されていく過程を連続的にとらえることができた。また、秋季の観測では、栄養塩が枯渇状態から徐々に増加していく過程を連続的にとらえることができた。得られたデータから、海面冷却による混合層の深化により、亜表層から栄養塩が供給されるという栄養塩予測モデルに組み込んでいるプロセスが確認できた。

また、得られた観測結果を用いて、成層の形成と栄養塩の枯渇との関係について検討を行った。また、春季に表面水温が高くなり成層がセットアップされると、植物プランクトンの増殖に伴う栄養塩の消費が始まるが、その際の成層強度（表底層の密度差）の閾値、及びその後の栄養塩の消費速度についても考察を行った。その結果、成層のセットアップの閾値としては、表底層の密度差を 0.2kg/m^3 、栄養塩の消費速度を $10\mu\text{g/L/day}$ として、栄養塩予測モデル（kakehi et al.,2018）による影響評価を行うこととした。なお、影響評価結果については、大気海洋の整合性（熱フラックスの挙動）や、現在の観測値で作成した栄養塩予測モデルを将来へ適用することにより生まれる誤差等から、安定した結果を得ることができず、将来予測結果としては用いるべきではないと判断した。栄養塩は三陸のワカメに対して非常に重要な指標となるため、今後の研究課題として取り組んでいく必要がある。

2.4.4. 気候変動影響予測結果

影響予測を行った結果、ホタテガイ、ワカメそれぞれに対して下記の影響が予測された。

【ホタテガイへい死率予測】

青森県の陸奥湾を対象に、青森産技水産総合研究所が所有するホタテガイへい死率予測を用いて、将来のへい死率予測を行った（図 2-28、図 2-29、図 2-30）。21 世紀中頃、21 世紀末の RCP2.6 については、水深や位置に限らず、高水温の日には場所を変えずにホタテガイを深く沈めることが最も適切な処置であることが分かった（陸奥湾では平成 22 年の大量へい死を受けて、高温に対しては深く沈めることで対応している）。しかしながら、21 世紀末の RCP8.5 のシナリオでは、現在ホタテガイの養殖が行われている水深（18.5m）でもへい死率が高まり、限られた地域でしか養殖できなくなる可能性が示唆された（図 2-28、図 2-29、図 2-30）。

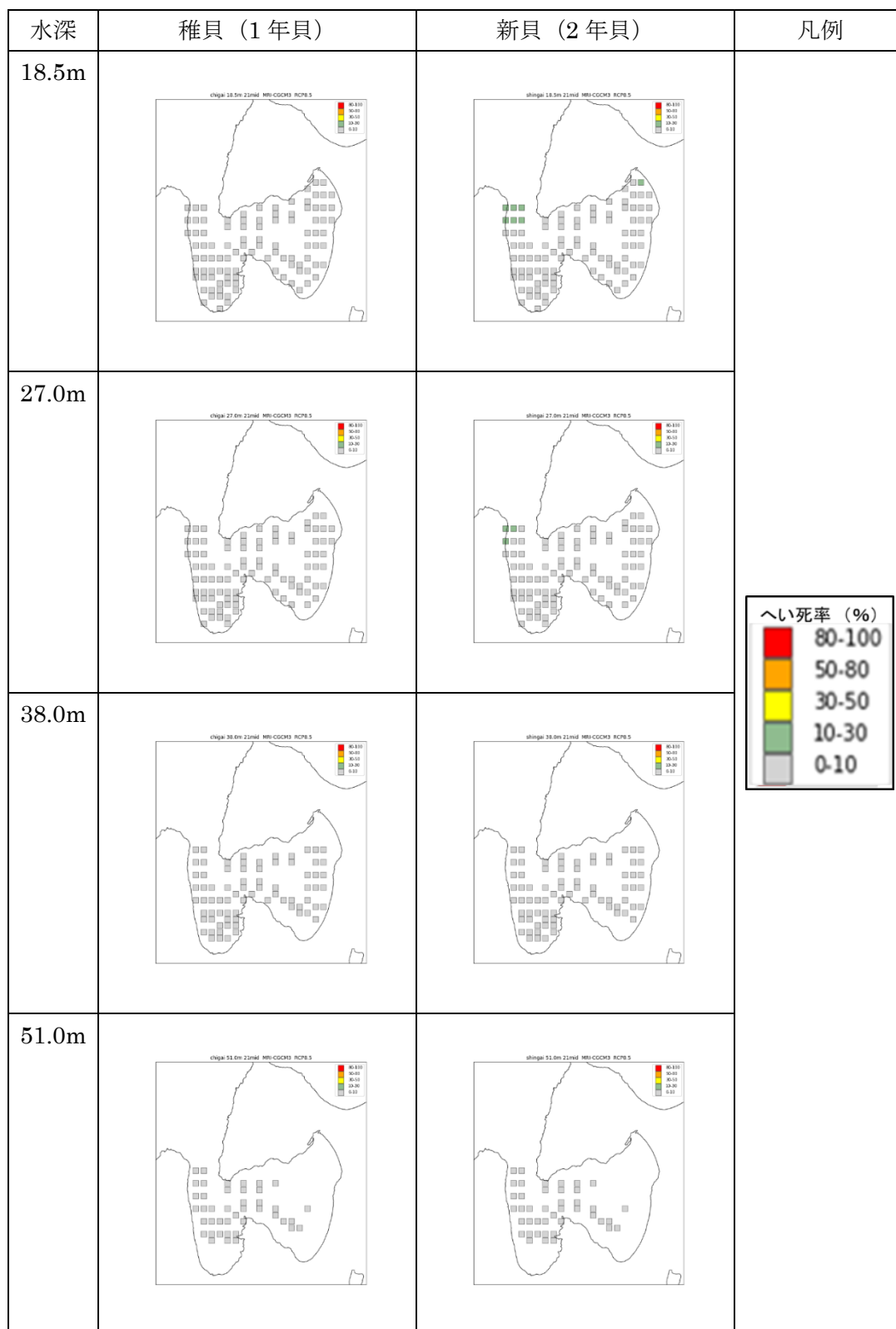


図 2-28 陸奥湾のホタテガイへい死率予測結果
 (21 世紀中頃 MRI-CGCM3 RCP8.5) 出典：青森産枝水産総合研究所提供の計算結果
 を基に日本エヌ・ユー・エス㈱が加工

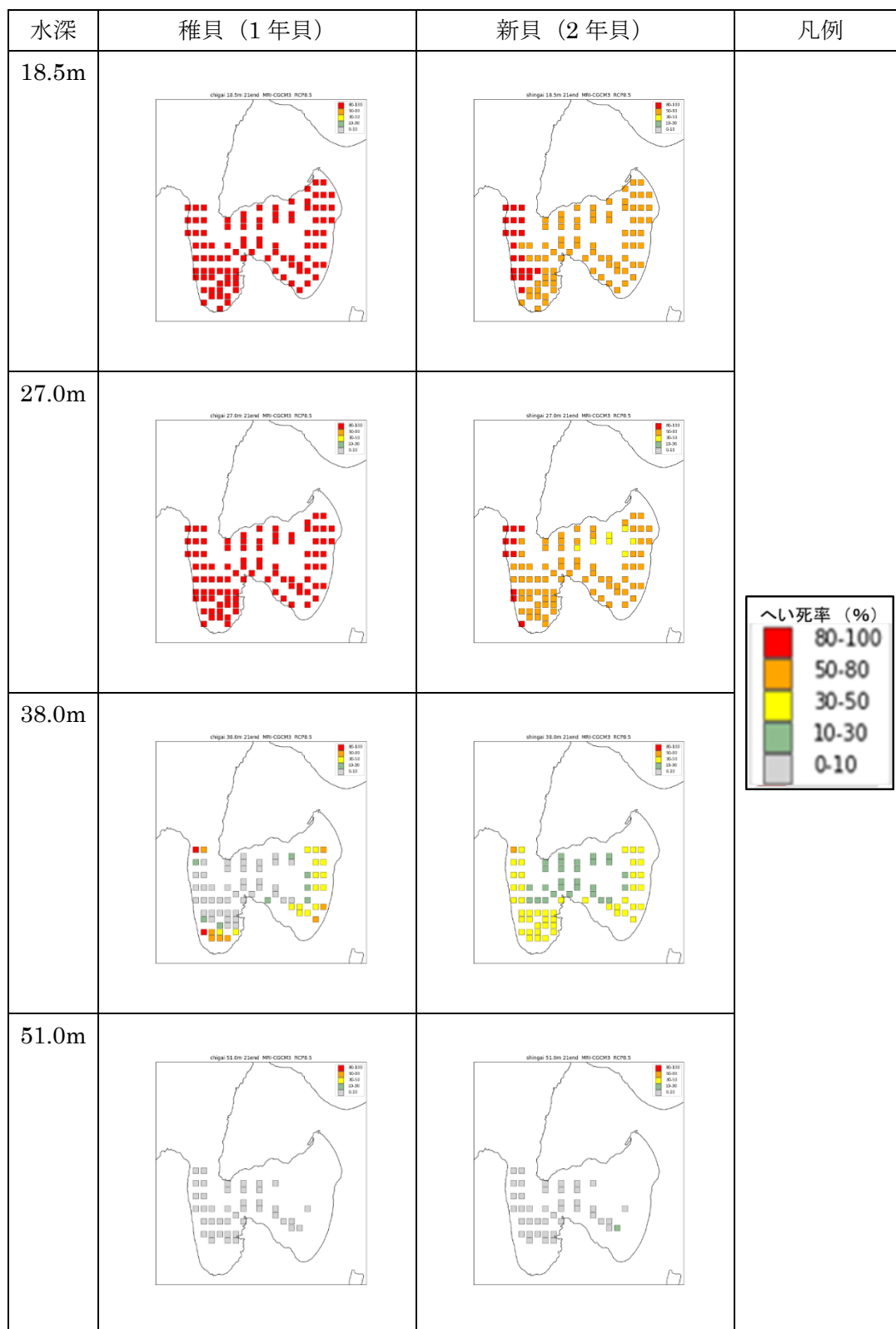


図 2-29 陸奥湾のホタテガイへい死率予測結果
(21 世紀末 MRI-CGCM3 RCP8.5)

出典：青森産技水産総合研究所提供の計算結果を基に日本エヌ・ユー・エス㈱が加工

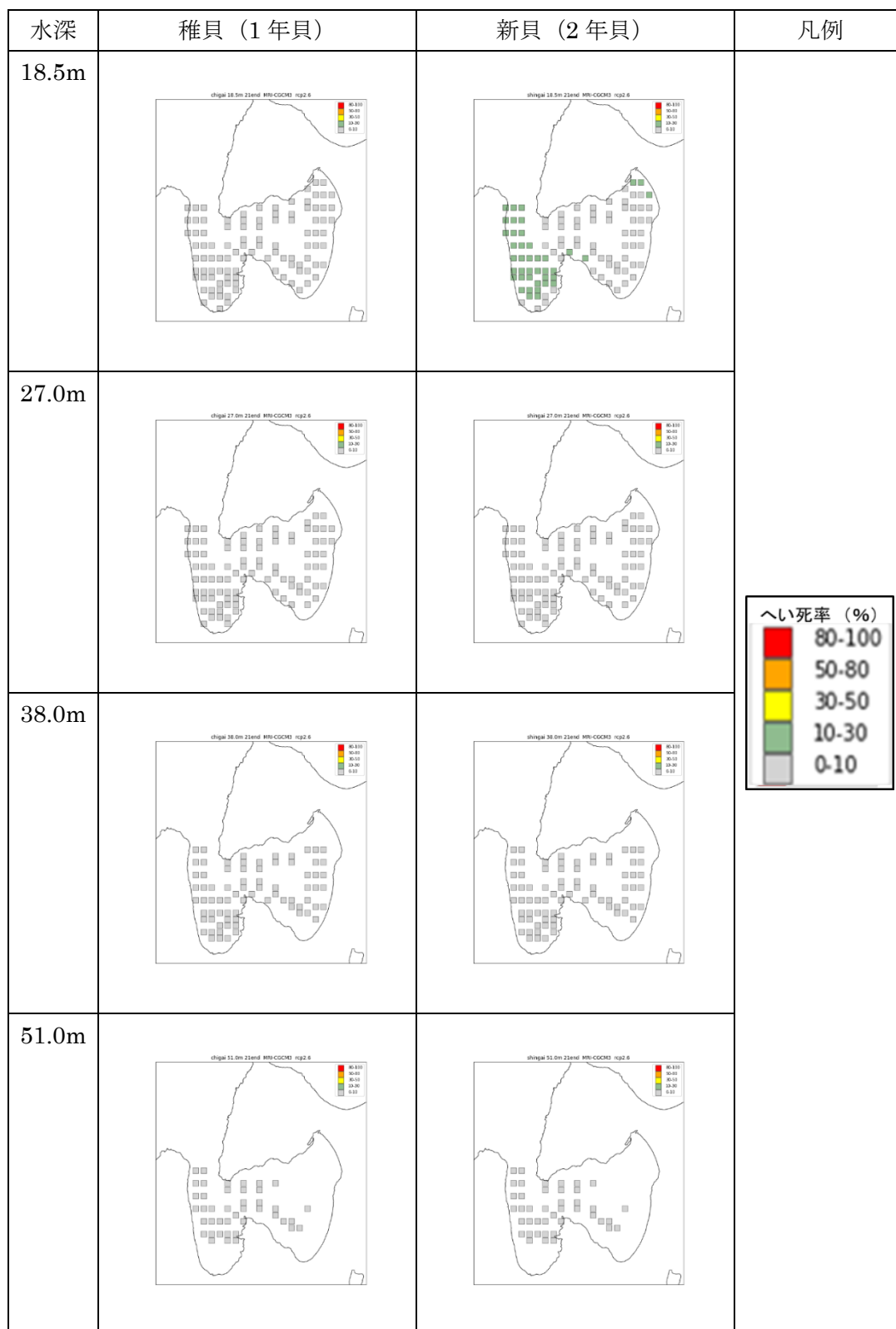


図 2-30 陸奥湾のホタテガイへい死率予測結果
(21 世紀末 MRI-CGCM3 RCP2.6)

出典：青森産技水産総合研究所提供の計算結果を基に日本エヌ・ユー・エス㈱が加工

【ワカメへの高温影響予測】

岩手県沿岸の船越湾を対象に、高水温による影響評価を行った。21 世紀末の RCP8.5 のシナリオにおいては、配偶体が成熟を始める 20℃以下となる時期が現在よりも約 1 カ月後ろにずれることが分かった。したがって、将来のワカメ養殖工程においては、芽出しの時期が遅くなり、収量が減少する可能性が示唆された（図 2-31、図 2-32、図 2-33、図 2-34）。

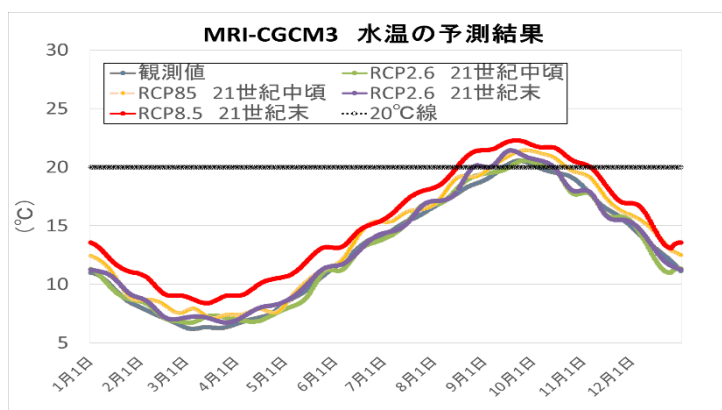


図 2-31 水温予測結果（MRI-CGCM3）

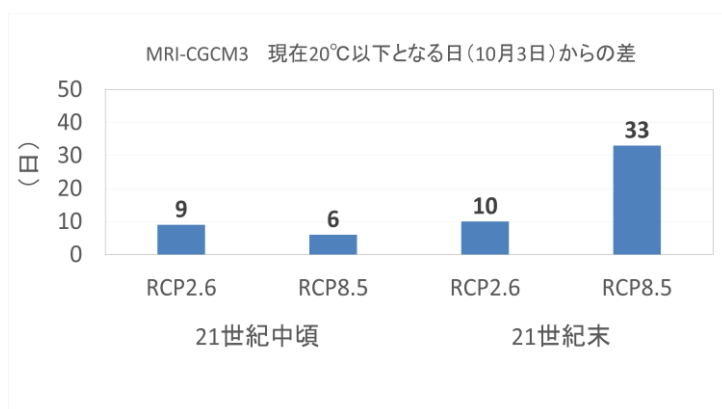


図 2-32 現在 20℃以下となる日からの差（MRI-CGCM3）

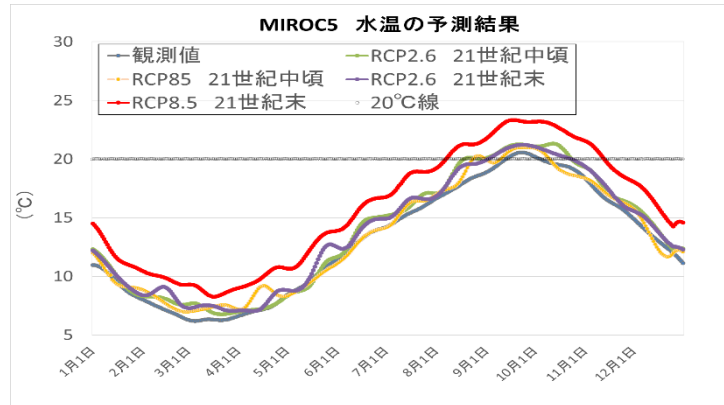


図 2-33 水温予測結果 (MIROC5)

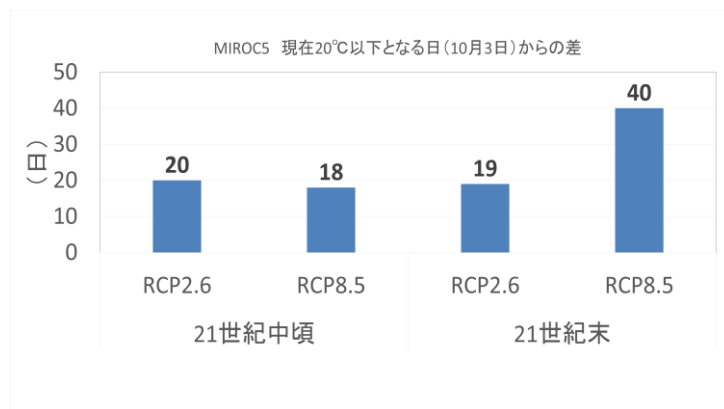


図 2-34 現在 20°C以下となる日からの差 (MIROC5)

岩手県沿岸を対象に、東北区水産研究所が所有する栄養塩予測モデルを使用して、ワカメ収量や品質に影響を与える栄養塩濃度の変化について予測を行った。しかしながら、大気海洋の整合性（熱フラックスの挙動）や、現在の観測値で作成した栄養塩予測モデルを将来へ適用することにより生まれる誤差等から、安定した結果を得ることができず、将来予測結果としては用いるべきではないと判断した。以下詳細を記す。

当初、将来予測を行った時点では、下記のように想定していた。

- ・ 気温の上昇速度が海水温の上昇速度を上回ると想定していた。
- ・ その結果として、より秋冬（冷却）期の海面冷却が弱まり、混合層の発達が抑制され、亜表層からの栄養塩供給が途絶えることにより、秋季の栄養塩の供給遅延や春季の早期枯渇が顕著になることと想定していた。
- ・ また、温暖化の進行により、21 世紀中頃よりも 21 世紀末に秋季の栄養塩の供給遅延や春季の早期枯渇がより進行すると想定していた。
- ・ 春・秋において、栄養塩の早期枯渇や供給遅延が進むことで、養殖期間の短縮に伴うワカメ収量の減少や、ワカメの色落ちが懸念された（図 2-35）。

このような想定のもと、東北区水産研究所が所有する栄養塩予測モデル（Takehi et al.,2018）を用い、海洋モデルによる熱フラックスを入力値として、岩手県沿岸における栄養塩濃度の変化について予測を行った。結果は、表 2-24 に示すとおり、想定とは大き

く異なる結果となった（モデル及び入力値諸元については表 2-1、項目 2.3.6.4 参照）。

本調査では、岩手県沿岸を対象に、東北区水産研究所が所有する栄養塩予測モデルを使用して、ワカメ収量や品質に影響を与える栄養塩濃度の変化について予測を行ったが、大気海洋の整合性（熱フラックスの挙動）や、現在の観測値で作成した栄養塩予測モデルを将来へ適用することにより生まれる誤差等から、安定した結果を得ることができず、将来予測結果としては用いるべきではないと判断した。なお、これらの課題に対して、栄養塩予測モデルの精度向上に取り組んだ Kakehi et al. (2018) は、水産海洋学会論文賞を受賞している。本調査における大きな成果の一つである。

栄養塩は三陸のワカメに対して非常に重要な指標となるため、今後の研究課題として取り組んでいく必要がある。

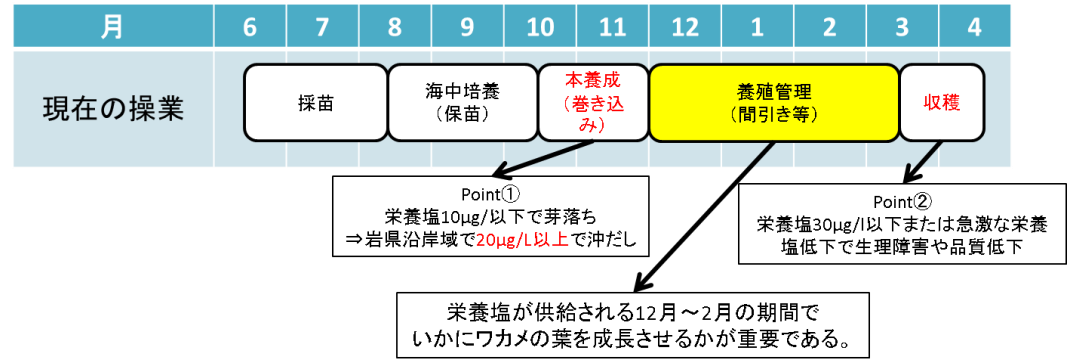


図 2-35 岩手県におけるワカメ養殖の年間操業サイクル

表 2-23 ワカメに影響を与える栄養塩の目安

時期	養殖行程	目安となる栄養塩濃度	参照
秋季 (10 月～11 月)	沖出し (成長したワカメの幼葉を 養殖網に巻き付け沖に出す 作業)	20 μ g/L 以上で沖だしを行う。 (10 μ g/L 以下で芽落ち※する) ※巻き付けた幼葉が脱落すること	出典:ワカメ 養殖ハンド ブック (岩手県)
春季 (3 月～4 月)	収穫 (成長したワカメを刈り取 る作業)	30 μ g/L 以下が続くとくと品質の低 下を招く	

表 2-24 栄養塩予測モデルの結果 【利用・転載不可】

季節	初期値	栄養塩の目安	現在	21 世紀中頃 RCP8.5 (現在との比較)	21 世紀末 RCP8.5 (現在との比較)	不確実性が高いと判断した理由
秋季	2016 年 9 月 3 日	20 μ g/L 以上となる日	65 日後	62 日後 (-3 日)	62 日後(-3 日)	現在と 21 世紀中頃・21 世紀末の結果があまり変わらない。
秋季	2017 年 9 月 7 日	20 μ g/L 以上となる日	59 日後	54 日後 (-5 日)	44 日後(-15 日)	現在と比較して、21 世紀末は栄養塩は早く供給する。
春季	2017 年 3 月 1 日	30 μ g/L 以下となる日	32 日後	24 日後 (-8 日)	28 日後 (-4 日)	21 世紀末よりも 21 世紀中頃のほうが、栄養塩が早く枯渇する。
春季	2018 年 3 月 6 日	30 μ g/L 以下となる日	29 日後	17 日後 (-12 日)	30 日後 (+1 日)	21 世紀末よりも 21 世紀中頃のほうが、栄養塩が早く枯渇する。

※本結果については、大気海洋の整合性（使用した熱フラックスの挙動）や現在の観測値で作成したモデルを将来へ適用することにより生まれる誤差等から想定した結果を得ることができておらず、妥当のものではないため、利用・転載を禁じる。

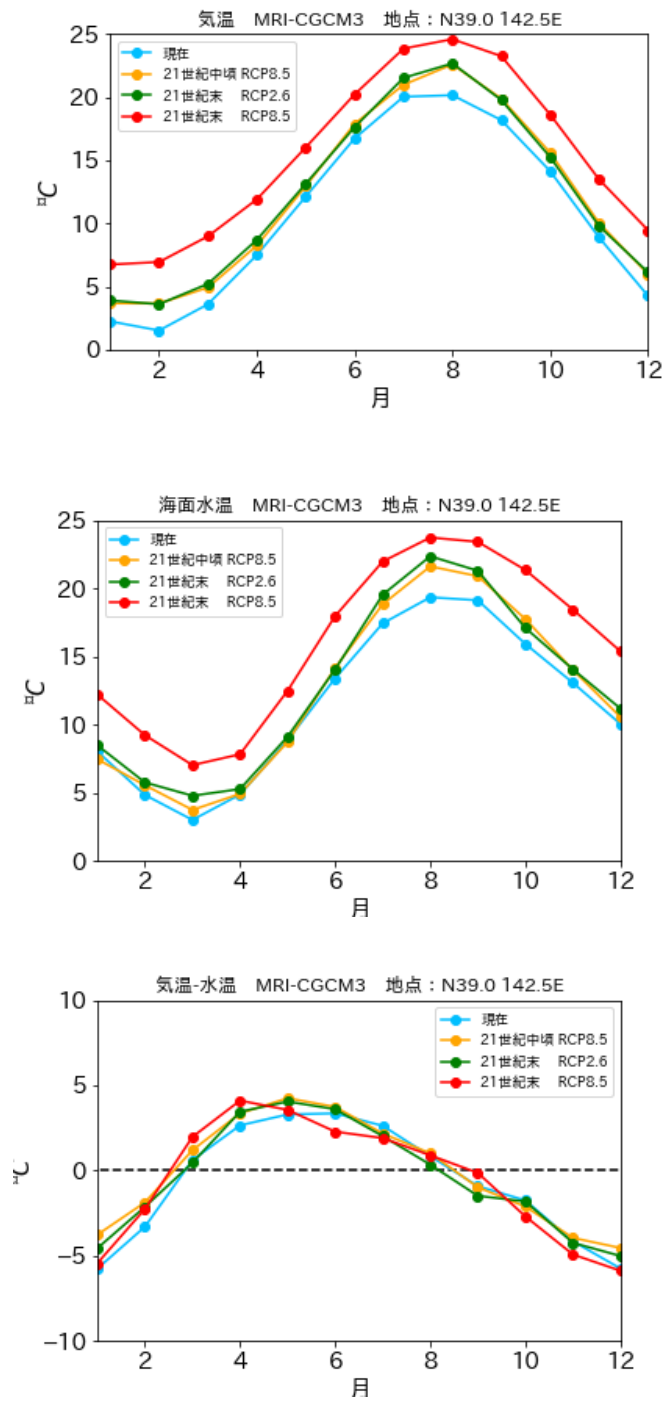
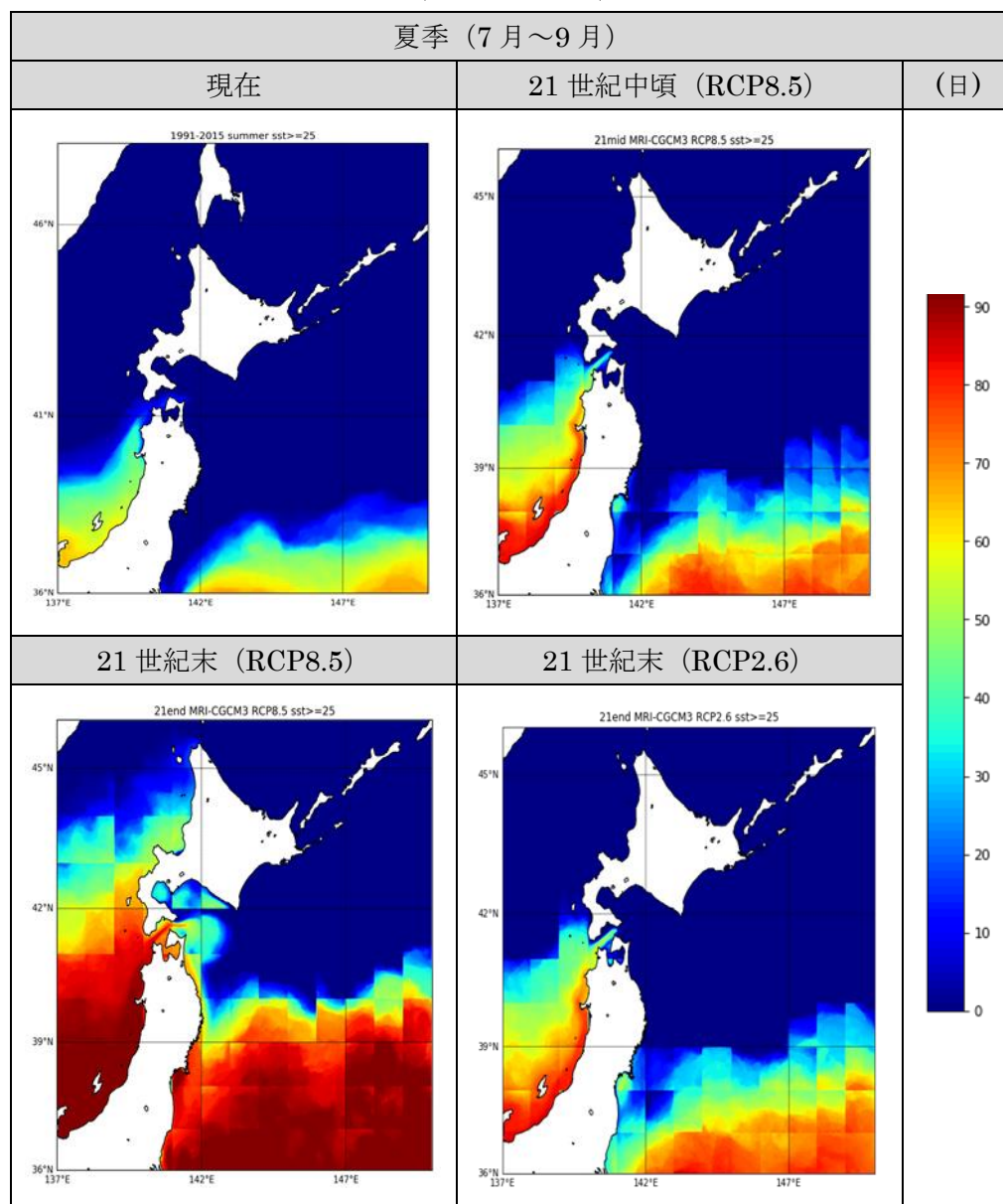


図 2-36 栄養塩予測モデルに使用した岩手県沿岸域の地点における各変数の挙動
 (上：気温、中：海面水温、下：気温と海面水温の差)

【高水温出現頻度 MAP】

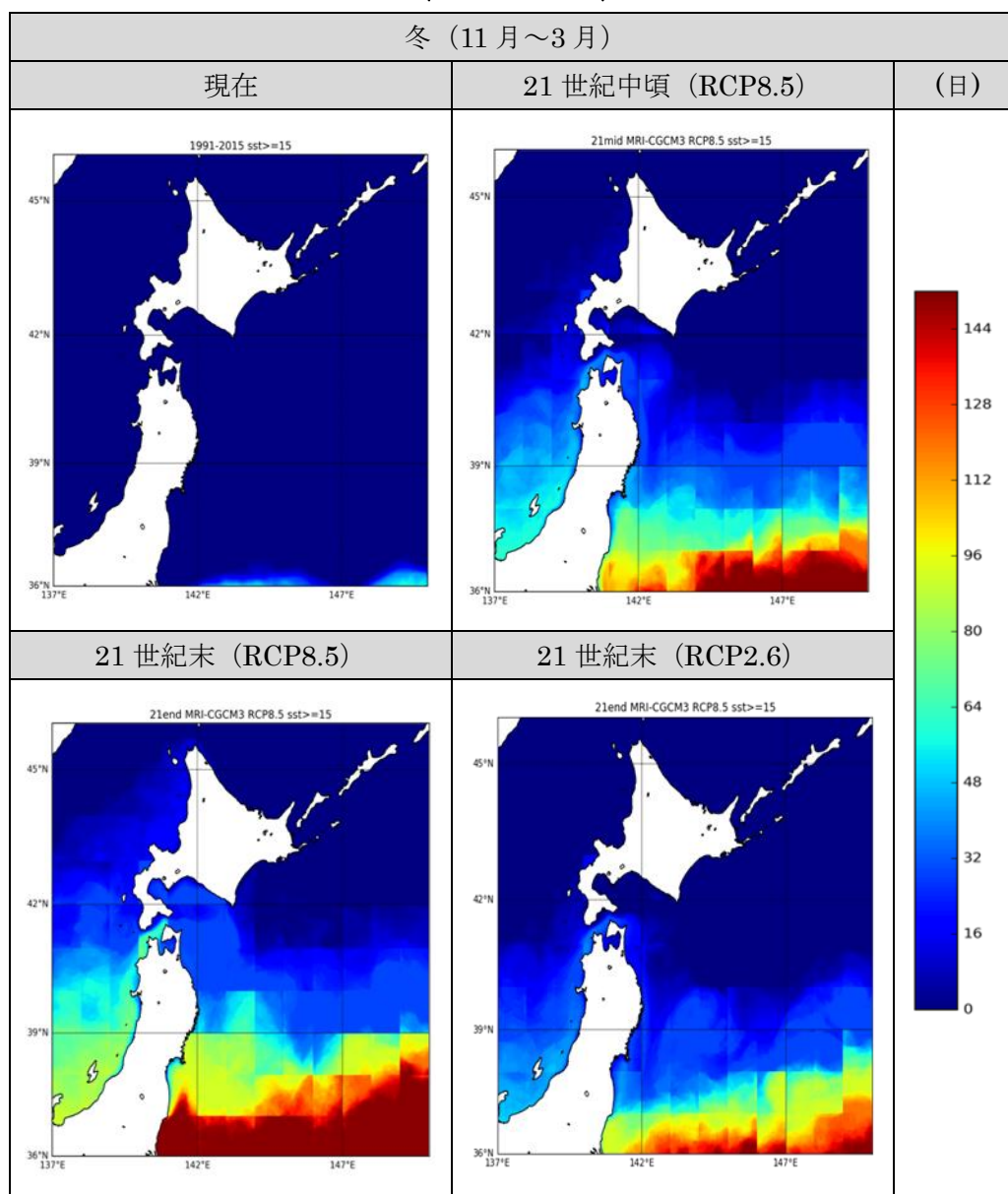
陸奥湾以外の地域においては、高水温出現頻度 MAP を作成し検討を行った。その結果、21 世紀末の RCP8.5 のシナリオでは、現在ではへい死の可能性のある高水温は発生していない、北海道の噴火湾や岩手県沿岸等においても、へい死の危険性が高まる可能性が示唆された（表 2-25）。

表 2-25 ホタテガイのへい死の危険性が発生する水温（25℃以上）の出現頻度 MAP（MRI-CGCM3）



船越湾以外の地域においては、高水温出現頻度 MAP を作成し検討を行った。その結果、北海道・東北全域において、ワカメの成長不良が発生する可能性のある水温が、今まで出現していなかった地点においても発生し、成葉の成長不良の可能性が示唆された（表 2-26）。

表 2-26 ワカメの成葉の成長不良が発生する水温（15℃以上）の出現頻度 MAP
(MRI-CGCM3)



2.4.5. 結果を活用する上での留意点・制限事項

① 使用した海洋予測データの取り扱いについて

使用した海洋予測データについては、バイアス補正が必要なデータであった。今回影響評価を行った、陸奥湾においては、複数地点・深さの水温データを使用した、観測値が少ない問題があった。今回のバイアス補正の手法では、観測値がない深さ帯については、内挿による補正を行っている点に注意が必要である。高水温出現頻度MAPの作成についても、バイアス補正を行う際に、広域の水温データとして使用できる観測値が衛星による表面水温のみしかなかったため、今回は表面水温のみの影響評価となっている。養殖施設は、表面より少し深い地点に設置されていることが多いが、水深が深いほど水温は低くなるため、実際には予測値よりも若干影響が小さくなることが予想される。

② 栄養塩予測モデルについて

今回使用した、栄養塩の予測モデルについては、大気海洋の整合性（熱フラックスの挙動）や、現在の観測値で作成した栄養塩予測モデルを将来へ適用することにより生まれる誤差等から、安定した結果を得ることができず、将来予測結果としては用いるべきではないと判断している点に留意する必要がある。

また、今回の結果以外については、下記要素を考慮していない点に留意する必要がある。

- ・ ホタテガイのへい死には、高温だけではなく波高や流速、溶存酸素による影響があることが分かっている。他項目による影響評価は大変複雑となるため、今回は高水温による影響評価に絞って調査を行った。また、適応策として養殖施設を深く沈めるオプションを挙げているが、水深が深い地点は貧酸素や餌環境等による影響を受ける可能性がある。その点を今回の調査では考慮していない点についても留意する必要がある。
- ・ ワカメに対する気候変動の影響については、岩手県ワカメ養殖(岩手県,2003)に記載されている内容では、水温・栄養塩ではなく、照度・光量や塩分による影響についても記載されている。その点を今回の調査では考慮していない点についても留意する必要がある。

その他、成果を活用する上での制限事項としては、陸奥湾のホタテガイや水温の観測情報を基に作成されたモデルであるため、状況の異なる他の養殖地域に適用することは難しいという点において留意する必要がある。

2.5. 適応オプション

2.5.1. 手順

本調査における適応オプションの検討フローを図 2-37 及び図 2-38 に示す。

【ホタテガイのへい死率】

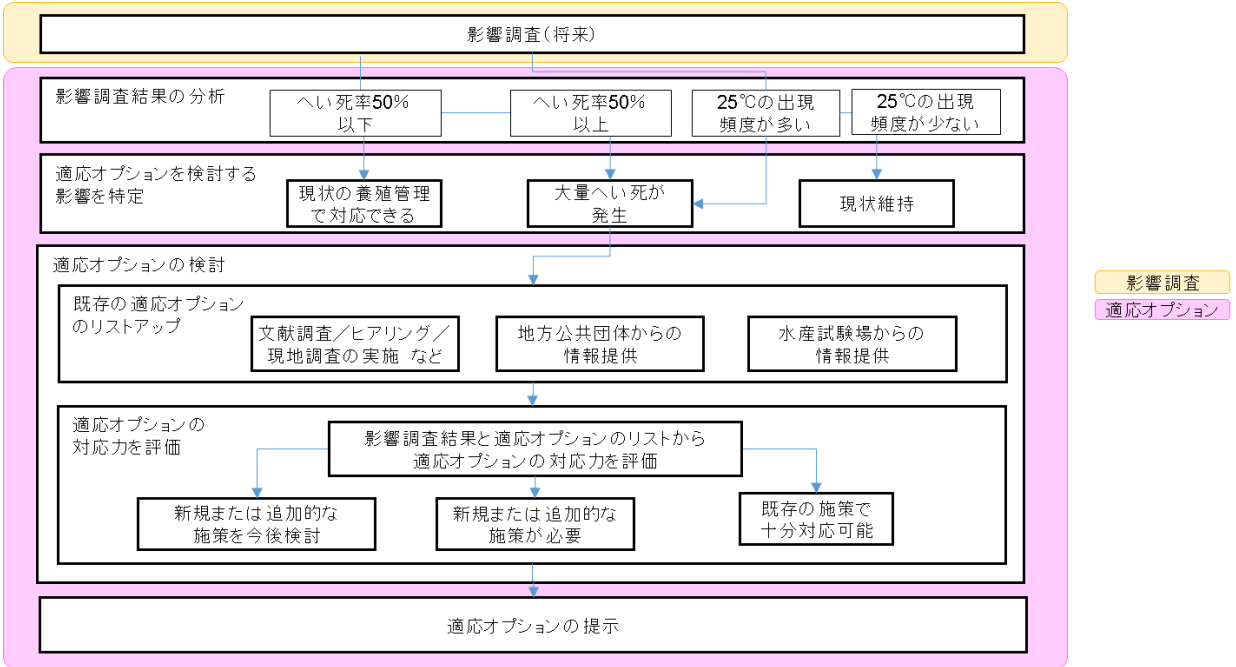


図 2-37 適応オプションの検討フロー図 (ホタテガイのへい死率)

【ワカメへの影響】

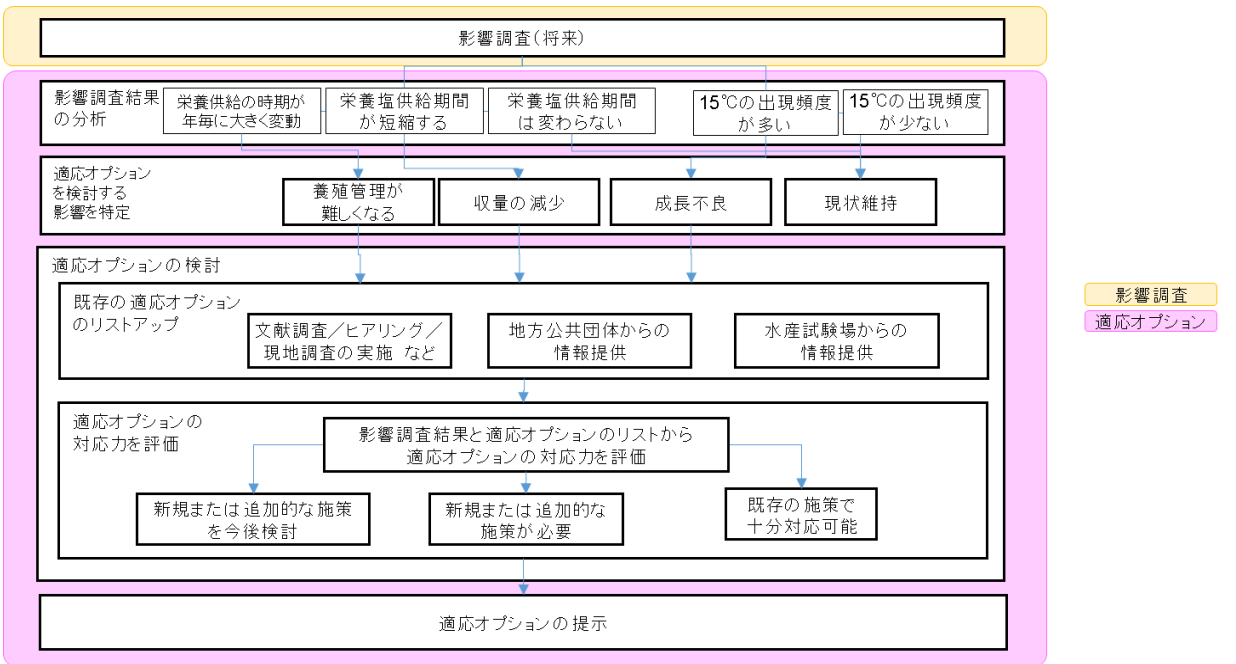


図 2-38 適応オプションの検討フロー図 (ワカメへの影響)

2.5.2. 概要

本調査において検討した適応オプション及びその考え方を表 2-27～表 2-30 に示す。

表 2-27 ホタテガイへい死の適応オプション

適応 オプション	想定される 実施主体			評価結果							
	行政	事業者	個人	現状		実現可能性				効果	
				普及 状況	課題	人的 側面	物的 側面	コス ト面	情報 面	効果 発現 までの 時間	期待 される 効果の 程度
養殖施設の移動	●	●		普及 している	<ul style="list-style-type: none"> 養殖作業の重労働化 養殖面積の縮小化 	△	△	△	◎	短期	高
代替種の導入	●	●		-	<ul style="list-style-type: none"> 作業効率や価格面を考慮すると難しい 	◎	△	△	△	長期	低
陸上養殖の実施	●	●		-	<ul style="list-style-type: none"> 利益や養殖規模の縮小化 	△	△	△	△	長期	低
高温耐性品種の導入	●	●		-	<ul style="list-style-type: none"> 知見が十分ではない 	△	△	△	△	長期	低

表 2-28 ホタテガイへい死の適応オプションの考え方

適応オプション	適応オプションの考え方と出典
養殖施設の移動	過去に発生した高水温によるへい死被害の際にも、養殖施設を深く沈める対策が実施され効果も確認されている（青森水総研、青森県庁へのヒアリング結果より）。
代替種の導入	平成 22 年に高水温によるホタテガイの大量へい死が発生した際に、別の養殖種としてアカガイやホヤについての検討が行われている。代替種の導入に向けた必要経費についての支援や、適当な代替種の検討及び導入試験等については行政が行い、現場での実施は漁業者が行っていく体制になると思われる（青森水総研、青森県庁へのヒアリング、内湾養殖 WG のヒアリング結果より）。
陸上養殖の実施	現時点で、導入に必要な知見が十分ではないため、情報面を-としている。新たに情報を収集し、陸上養殖を実施するための試験を実施し、知見や経験を蓄積するためには、多くの時間やコストが必要になると想定される。
高温耐性品種の導入	現時点で、導入に必要な知見が十分ではないため、情報面を-としている。高温下での養殖が可能な品種を作出できたとしても、需要に十分に対応できるだけの高温耐性の種苗を安定的に供給するためには、さらに種苗生産技術の開発が必要になることから、高温耐性品種の導入までには非常に長い時間と、多額の研究費や新たな研究施設や種苗生産施設が必要になると思われるため、物的面及びコストに関しては△としている。

表 2-29 ワカメへの影響の適応オプション

適応 オプション	想定される 実施主体			評価結果							
	行政	事業者	個人	現状		実現可能性				効果	
				普及 状況	課題	人的 側面	物的 側面	コスト 面	情報 面	効果 発現ま での時 間	期待 される 効果の 程度
大型人工種 苗の導入	●	●		普及 している	<ul style="list-style-type: none"> 陸上で種 苗生産を 行う負担 が増える 高温への 対策につ いては、温 度管理が 必要とな る 	△	△	△	◎	短期	高
栄養塩予測 モデルの活 用	●	●		普及 している	<ul style="list-style-type: none"> モデルの 精度向上 のため、継 続的な観 測が必要 	◎	△	△	△	長期	高
高温耐性品 種及びワカ メの南方種 の導入	●	●		-	<ul style="list-style-type: none"> 知見が十 分ではな い ブランド 維持とし ては検討 が必要 生態系へ の影響が 懸念され る 	◎	△	△	-	長期	低

表 2-30 ワカメへの影響の適応オプションの考え方

適応オプション	適応オプションの考え方と出典
大型人工種苗の 導入	現在研究が進められており、既に現場への導入実績及び効果が得られている方法である。実施主体としては、陸上施設での種苗生産に関する、労力及びコストに対する支援は行政が担うのが適切であると考え、実施の可否については漁業者が周囲の状況を勘案しながら判断する必要がある。（岩手県水産技術センターヒアリング、大型人工種苗導入例（岩手県水産技術センターHP 参照： http://www2.suigi.pref.iwate.jp/info/20171128news ）
栄養塩予測モデルの活用	現在、既にワカメ養殖の現場で導入されており、秋季の栄養塩の供給時期については、かなりの精度で予測が可能となっている。ただし、春季の栄養塩の枯渇については、さらなる精度の向上が課題となっている。 （東北区水産研究所、岩手県水産技術センターヒアリング、栄養塩予測モデル導入例（岩手県水産技術センターHP 参照： http://www2.suigi.pref.iwate.jp/research/20191028undaria_farming ）
高温耐性品種及びワカメの南方種の導入	高温耐性の種苗を導入するための知見が十分ではない。地場産の高温耐性品種の選抜育種には時間を要することと異なる地域のワカメを利用するため、これまで築いてきた三陸ワカメのブランド、具体的には葉の厚さや歯ごたえあるワカメを存続させることは難しいと考えられる。その意味において、本適応オプションは三陸ワカメを対象とした適応策とはならないため、効果の程度を低いと考えられる（岩手県水産技術センターヒアリング、内湾養殖 WG ヒアリング結果）。

2.5.3. 個々の適応オプションに関する説明

【ホタテガイへい死】

■ 養殖施設の移動

高水温によるホタテガイへい死に対する適応策である。RCP8.5 の 21 世紀末の影響評価結果から、水深 38m 以深の水深帯においては水温が低く、へい死率が低くなることが予想された。また、沖合域は沿岸域よりも水温が低いことから、養殖施設を沖合の深い水深帯に移設することで、へい死率が低下することが期待される。ただし、養殖施設を沖合、かつ水深の深い位置に設置すると、日々の養殖管理作業が重労働となる点、及び現在よりも養殖面積が縮小するため、生産量の低下が予想される点が大きな課題である。なお、21 世紀中頃及び 21 世紀末の RCP2.6 の水温であれば、養殖施設の場所を変えなくとも、高水温時に養殖施設を深く沈める処置で対応は可能である（陸奥湾では平成 22 年の大量へい死を受けて、高水温に対して養殖施設を深く沈めることを推奨している）。

ただし、ホタテガイを水深深くに沈めることによる、貧酸素や餌環境等の影響については考慮していない点において留意する必要がある。

■ 代替種の導入

平成 22 年の大量へい死時に、ホタテガイの代替種としてアカガイやホヤについて検討を行ったが、生産効率、価格、養殖規模などを考慮すると、ホタテガイに代わる養殖対象種は難しいとの結論となっている。ただし、高水温の影響によりホタテガイの生産量が激減する可能性も考えられることから、水温や塩分等の予測情報を参考にしながら、どのような代替種が可能か引き続き検討していく必要がある。

■ 陸上養殖の実施

これまで、陸上養殖を行った事例はなく、実施するために必要な知見が得られない状況である。現在、様々な水産種を対象に陸上養殖が試みられており、技術開発も進んでいる状況であるが、ホタテガイの海面養殖に比較すると、ホタテガイあるいは他の水産種であっても、同程度の生産額を期待することは難しい点が大きな課題である。引き続き情報の収集が必要である。

■ 高温耐性品種の開発、導入

ホタテガイの高温耐性品種に関する研究事例はなく、関係する知見が少ない。ただし、高温耐性品種の開発については、遺伝学的な技術を含めて、様々な研究が進められており、引き続き情報の収集が必要である。

【ワカメへの高温影響】

■ 大型人工種苗の導入

岩手県を対象とした、栄養塩供給期間の縮小や高温による、収量の減少に対する適応策である。現在、岩手県水産技術センターで研究されている大型種苗（半フリー種苗）を導入することで、2 点の効果が期待される。①種苗の芽落ちを防ぐ、②通常より早い時期から収穫することができる。さらに、既存の種苗と大型種苗を組み合わせることにより、複数の生産段階の種苗を扱うことができれば、ワカメを刈り取る期間を長く確保

することが可能となり、労働力の平均化や、様々な生産リスクの分散等の効果も期待される。なお、課題としては、大型種苗を生産するための施設、及び労働力の確保といった負担が増える点が挙げられる。また、現在は施設周辺の海水を使用して種苗生産を行っていることから、将来の高水温への対策としては、温度管理に関する配慮も必要である。

■ 栄養塩予測モデルの活用

岩手県を対象とした、栄養塩供給期間の短縮化による収量の減少と、栄養塩の年変動が大きくなり養殖管理が難しくなることに対する適応策である。岩手県のワカメ漁業者は、岩手県水産技術センターHP から配信されている、栄養塩の予測情報を参考にしながら養殖管理を行っている。本予測の精度向上を図ることで、栄養塩の供給期間短縮、あるいは年変動に対応した、効率的で安定した養殖管理を行うことができる。栄養塩枯渇モデルの精度向上のため、継続的な観測が必要である。

■ 高温耐性品種及びワカメの南方種の導入

ワカメに対する高水温の影響に関する適応策である。21 世紀末における岩手県沿岸域の水温は、鳴門ワカメが生産されている徳島県鳴門周辺海域の水温に類似している。鳴門ワカメは 10℃～20℃の水温で良好に成長するとされており（新崎,1958）、岩手県沿岸においても、鳴門ワカメが生産できる可能性が示唆される。しかしながら、ワカメの高温耐性の種苗を導入するための知見が、現時点では十分ではない点が課題である。引き続き情報収集が必要である。また、三陸ワカメは肉厚な葉をブランドとしたワカメであり、鳴門ワカメを導入しても同様の品質を維持できるか不明である。これまで築き上げた、三陸ワカメのブランドを継続していくための検討が必要である。また、岩手県沿岸に生息していなかったワカメ種苗を導入する点については、遺伝的かく乱等、海洋生態系への影響も懸念される。

引用文献一覧

- 青森県（2011）陸奥湾ホタテガイ高水温被害対策専門家委員会第一次報告書, 34.
- 青森県（2012）平成 23 年度陸奥湾ホタテガイ高水温被害対策専門家委員会報告書, 52.
- 伊藤龍星（2001）1998 年に見られた大分県国東半島沿岸の天然ワカメ不漁とその原因, 大分海水研調研報, 3, 5-7.
- 岩手県（2003）ワカメ養殖ハンドブック
- 社団法人日本水産資源保護協会(1980)『水生生物生態資料』
- 須藤俊造(1980)『沿岸海藻類の増殖』、社団法人日本水産資源保護協会
- 地方独立行政法人青森県産業技術センター(2013)『猛暑時のホタテガイへい死率を低減する養殖生産技術の開発(ホタテガイ養殖生産技術の改善)』、平成 25 年度（地独）青森県産業技術センター水産総合研究所事業報告,p377-382
- 中川憲一 福田義和 金子秀毅 中村寛 中村辰男(2018)東北地方の養殖漁業のための沿岸水温予測方法の紹介,測候時報,85,13-29.
- 新崎盛敏(1958)海藻類の生育と水温（Ⅱ）,水産増殖,6,2,27-33.
- RAS ネット北海道(2017),『胆振地区・ホタテガイ養殖管理情報第 1 号(平成 29 年度)』, <http://rasnet.sys-hk.jp/material/shidousyo/iburi_yousyokukanri_H29_01.pdf>2017 年 12 月 20 日アクセス
- Kakehi, S., K. Naiki, T. Kodama, T. Wagawa, H. Kuroda and S. Ito(2018), Project of nutrient supply to a wakame (*Undaria pinnatifida*) seaweed farm on the Sanriku Coast of Japan, Fisheries Oceanography,27:323-335.