

3. 1-3 海水温の上昇等によるシロザケ等の漁獲量への影響に関する調査

3.1. 概要

シロザケ（サケ）は、北海道・東北地域の重要な水産資源となっており、ふ化放流事業は資源の維持・増大のために大きな役割を担っている。近年、サケの回帰率減少が問題となっており、湾内の高水温による放流稚魚の減耗が一因と言われている。放流後、湾内を遊泳する幼稚魚は、13℃以上となると北上するといわれており、それまでに生理学的、解剖学的に十分な成長を終え、北上回遊による環境変化に耐えうるだけの体力を蓄えておく必要がある。

宮城県では最適な回帰率を得るために、①稚魚を 5 cm以上で放流すること、②13℃以上になる前に、幼稚魚が湾内で 12 cm以上に成長するために必要な期間を逆算して放流すること、の 2 点を考慮して放流適期が設定されている。本調査では、北上を開始する水温である 13℃を指標に、将来の宮城県沿岸域の水温を予測し、放流適期がどのように変化するかについて検討を行った。その結果、21 世紀中頃と 21 世紀末における RCP2.6 の気候シナリオでは、現在より放流適期が短縮し、特に 21 世紀末の RCP8.5 気候シナリオにおいては、宮城県沿岸は常に 13℃以上となり、放流適期が消滅する可能性が示唆された。これらの結果が得られたことから、将来予想される高水温環境においても、ふ化放流事業を継続するために必要となる適応策について検討を行った。

3.1.1. 背景・目的

シロザケ（サケ）は、北海道・東北地域の重要な水産資源であり、ふ化放流事業は資源の維持・増大のために大きな役割を担っている。近年、サケの回帰率減少が問題となっており、その要因の一つとして放流時の沿岸水温による影響（宮腰, 2007 や Saito, 2002）が報告されている。今後、気候変動に伴う沿岸域の水温上昇により、サケ放流種苗の生産から放流するまでの工程に影響が生じ、適切な放流稚魚のサイズや放流時期を維持できなくなる可能性が考えられる。その結果、回帰率の低下を招くこととなり、漁獲量に悪影響が生じることが懸念される。

本調査では、サケの放流適期に関する情報の整理や、サケ放流時の水温がサケの回帰率に与える影響等について調査を行い、宮城県において将来の高海水温環境においても実施可能な、ふ化放流事業に必要な適応策の検討を目的に調査・分析を行った。

3.1.2. 実施体制

本調査の実施者：日本エヌ・ユー・エス株式会社

アドバイザー：北海道大学 大学院水産科学研究院 海洋生物資源科学部門
教授 工藤 秀明

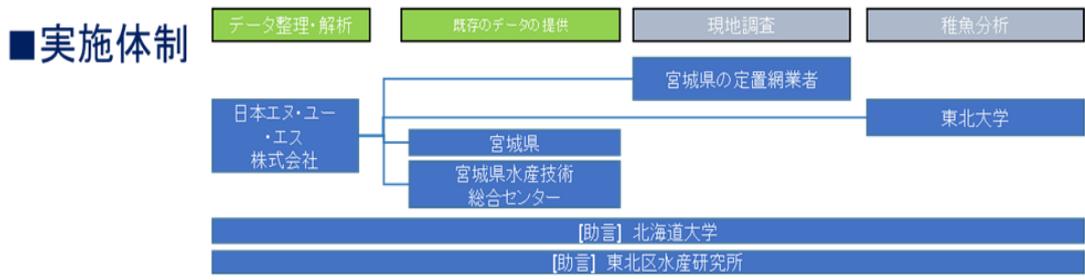


図 3-1 実施体制図

3.1.3. 実施スケジュール（実績）

3ヶ年の実施スケジュールを図 3-2 に示す。本調査の内容は、以下の 3 項目に大別される。第一に、サケと回帰率に関する既存知見の収集・整理を行い、調査計画策定・影響評価・適応策検討に必要となる、基本的な知見を取り纏めた。第二に、将来の水温データから予想される放流適期を求め、高水温の影響について評価分析を行った。第三に、サケの将来の高海水温環境に合わせたふ化放流事業を実施するために必要となる適応策について、影響評価や現地調査の結果に基づき検討を行った。

平成 29 年度の調査では、サケの影響評価モデル構築に向けて既存データの収集・整理、及び水温観測とサケ幼稚魚の採捕・分析計画の立案を実施した。

平成 30 年度の調査では、本事業で提供される海洋近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ（将来予測データ）を用いて、平成 29 年度に整理した内容、及び新たに文献調査やヒアリングにより収集した情報を参考にして、宮城県の放流適期の将来予測、及び海水温がサケの回帰率に与える影響に関する情報の整理を行った。また、宮城県の沿岸域においてサケ幼稚魚のサンプリング調査を実施した。得られたサンプルについて、耳石、骨格、胃内容物等について分析を行い、降海後のサケ幼稚魚が滞留する、沿岸域の生活環境に関する調査を行なった。平成 31 年度には、影響評価モデルの精度向上のため、有識者へのヒアリングを実施した他、さらなる文献調査を実施して最新の知見を整理し、調査対象地域における海水温等が、サケに与える影響について評価検討を行った。また、得られた影響評価の結果に基づき、適応策の検討を行った。

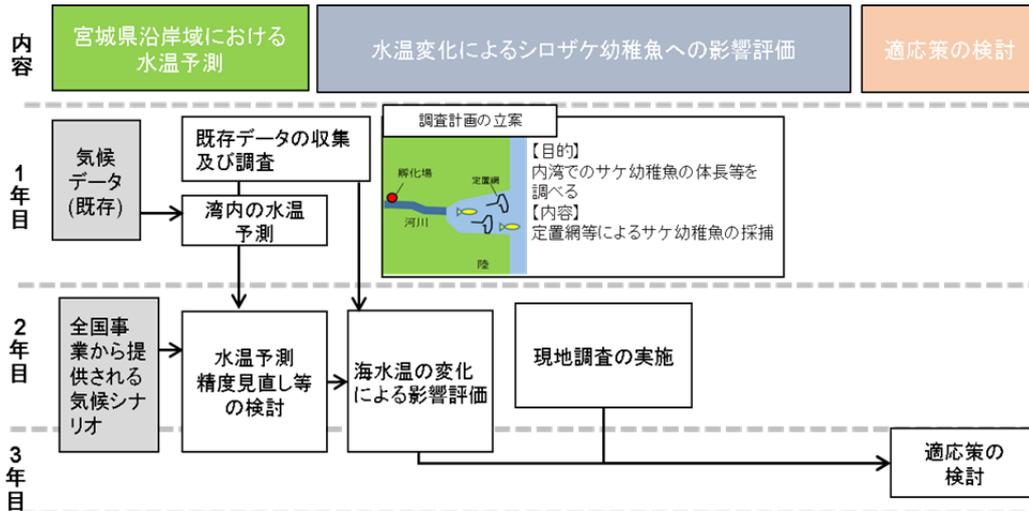


図 3-2 3年調査実施スケジュール

3.1.4. 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 3-1 のとおりである。

表 3-1 使用する気候パラメータに関する情報

項目	シロザケの放流適期予測
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
気候モデル	MRI-CGCM3
気候パラメータ	海面水温
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)

3.1.5. 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。

- ・ サケの回帰率と、放流後のサケ幼稚魚が滞留する沿岸域の水温との相関は高く、高水温が回帰率に影響する可能性があることが分かった。
- ・ 放流後の幼稚魚が沿岸域で滞留している時期の生活史が分かった。

ヒアリングで調査の結果、以下のことが分かった。

- ・ 現地調査で採捕したシロザケ稚魚の分析結果から、尾叉長 10cm 程度のサイズが多く、また、降海後の日輪数と筋肉の安定同位体分析の結果から、1 ヶ月以上にわたって海洋生活を送っていることが分かった。
- ・ 採捕したシロザケ幼稚魚の骨格形成は、既に骨化⁴が終了していることが確認された。

⁴ 脊椎動物において、基質にカルシウム塩が沈着することによって硬い骨ができること。

- ・ 適応策を検討する上で、地域毎に課題や状況が異なることが分かった。

影響予測を行った結果、以下のことが分かった。

- ・ Saito (2002) を参考としながら、海水温が回帰率に与える影響について解析を行ったが、宮城県における放流後の水温と、回帰率との関係を明らかにすることができなかった。(検討結果の詳細については、3.3.6.1 に示す)
- ・ 放流適期について将来予測を行った結果、21 世紀中頃や 21 世紀末の RCP2.6 のシナリオにおいては、現在よりも放流適期が短縮することが示唆された。
- ・ 放流適期の将来予測を行った結果、21 世紀末の RCP8.5 のシナリオにおいては、放流適期が消滅する可能性のあることが示唆された。

3.1.5.1. シロザケの放流適期予測

本調査では、現在宮城県において放流適期の基本情報として利用されている、昭和 50 年代に作成された放流適期図（以下、「宮城県放流適期図(昭和版)」という）について、まずは現在の水温に対応させて、放流適期図（北部・南部）の再構築を行った。さらに、再構築した放流適期図に将来の水温を与えて、宮城県の放流適期を予測した。結果を図 3-3、図 3-4、表 3-2 に示す。各図の赤い太線箇所が、放流適期期間を示している。宮城県北部・南部両地点において、21 世紀中頃と 21 世紀末における RCP8.5 のシナリオでは、放流適期が縮小することが分かった。また、シナリオ RCP8.5 の 21 世紀末のケースでは、宮城県沿岸域において 13℃以上の水温が継続してみられ、放流適期が消滅する可能性のあることが分かった。

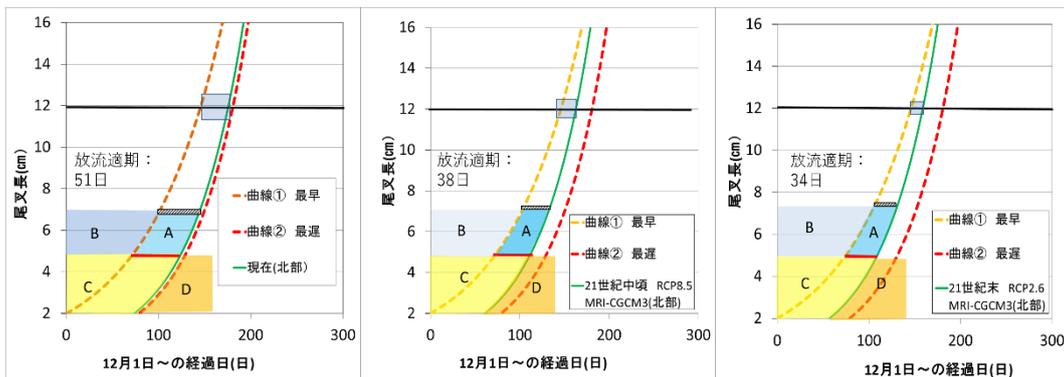


図 3-3 宮城県北部における放流適期予測

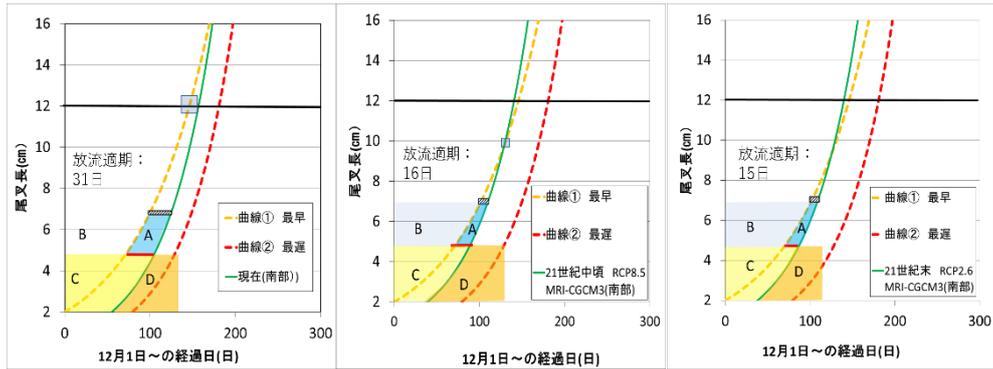


図 3-4 宮城県南部における放流適期予測

表 3-2 宮城県北部における気候シナリオ毎の放流適期

北部			
	13℃に達する日数	5cm に達する日数	放流適期期間
現在 北部 (観測値データを基に作成)	177 日 (5月27日)	126 日 (4月6日)	51 日
21世紀中頃 北部 MRI-CGCM3 RCP8.5	164 日 (5月14日)	113 日 3月24日	38 日
21世紀末 北部 MRI-CGCM3 RCP2.6	160 日 (5月10日)	109 日 (3月20日)	34 日
21世紀末 北部 MRI-CGCM3 RCP8.5	常に 13℃以上		

表 3-3 宮城県南部における気候シナリオ毎の放流適期

南部			
	13℃に達する日数	5cm に達する日数	放流適期期間
現在 南部 (観測値データを基に作成)	158 日 (5月8日)	107 日 (3月18日)	31 日
21世紀中頃 南部 MRI-CGCM3 RCP8.5	142 日 (4月22日)	91 日 (3月2日)	16 日
21世紀中頃 南部 MRI-CGCM3 RCP2.6	141 日 (4月21日)	90 日 (3月1日)	15 日
21世紀末 南部 MRI-CGCM3 RCP8.5	常に 13℃以上		

3.1.6. 活用上の留意点

3.1.6.1. 本調査の将来予測対象とした事項

本調査では下記2点に留意する必要がある。

- ・ 降海後の幼稚魚が沿岸域において滞留している時期から、沖合域を北上するまでの時期を影響評価の対象としている。
- ・ 上記の評価対象以外の期間となる、親魚の回帰時期あるいは種苗飼育時等の環境条件は、現在と変わらないと仮定している。

3.1.6.2. 本調査の将来予測の対象外とした事項

本調査において、下記の影響は考慮していないことに留意が必要である。

- ・ 降海後に幼稚魚が滞留する沿岸域での急激な水温変化
- ・ 親魚回帰時の水温
- ・ 種苗生産用の卵の確保（親が回帰して、種苗生産用の卵が確保できることを前提）
- ・ 放流幼稚魚の健苗性

3.1.6.3. その他、成果を活用する上での制限事項

本調査は、宮城県で実際使用されている放流適期図を基に予測を行っている。放流適期は各地域の環境条件等に左右されるため、他の地域に同じ手法を適用することは難しい。

3.1.7. 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 3-4～表 3-5 に示す。

表 3-4(1) シロザケの適応オプション

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
沖合移動期の尾又長引き下げによる放流適期の見直し ⁵	●	●		-	適切な尾又長設定のため、更なる調査、分析が必要	◎	◎	◎	△	短期	高
放流適サイズに達するまでに必要な種苗飼育期間の短縮（加温飼育等）	●	●		-	新たなコスト負担を考えると、現状では設備の増設や、労働力の確保が難しい。	△	△	△	◎	短期	中
飼料や飼育環境改善による幼稚魚の健苗性向上	●	●		-	新たなコスト負担を考えると十分な予算確保が難しい。	△	△	△	◎	短期	中
高温耐性品種の活用	●	●		-	県内の種苗だけで、21 世紀末に予想されている水温に耐えられる品種を作出できるか不明である。 遺伝的劣化が影響として懸念される。	△	△	△	△	長期	低

※行政は県庁と水産試験場を想定している

⁵ 放流後のサケ幼稚魚の沿岸生活期を短くすることで、放流期間を長く確保する適応オプションである。放流時の尾又長は現在と同様に 5cm 以上必要である。

表 3-4(2) シロザケの適応オプション

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
沿岸漁獲のサケの 利用 (海産卵)	●	●		一部普 及され ている	早期の種苗卵 確保が目的で あるが、サケの 回帰率が大き く減少しない ことが前提に なる。	△	△	△	◎	長期	低
野生魚の活用 ⁶	●	●		-	環境収容力を 超える数のサ ケが遡上した 場合、あるいは サケが遡上し ていない河川 にサケが遡上 した場合には、 遡上河川の生 態系に悪影響 が及ぶ可能性 がある。	△	△	△	◎	長期	中
代替種の検討	●			-	サケと同程度 の規模を代替 できる水産種 を考えるのは 難しい。 漁業者や加工 業者等、水産業 界全体を考慮 する必要がある。	△	△	△	-	長期	低

※行政は県庁と水産試験場を想定している

⁶ 野生魚は自然産卵で生まれた個体であり、両親が野生魚か放流魚(人工種苗)かは問われない。人工環境下でふ化、成長した稚魚に比較して、自然環境でふ化、成長した稚魚は、自然選択の影響を受けることで、人工種苗よりも自然環境に適した個体が生き残っていると考えられる。したがって、野生魚を利用する事で、より環境に適応した遺伝子を残すことが可能となる。ただし、現時点においては、環境収容力の範囲内においてサケの野生魚の数が保たれているため、積極的に野生魚を保全する場合には、環境収容力を超えないよう気を付ける必要がある。

表 3-5 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
<p>沖合移動期の尾又長引き下げによる放流適期の見直し</p>	<p>回帰率が良いといわれるサケの放流には、下記の3つの条件がある。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 5cm 以上で放流し、その後は沿岸域で成長する。 ② 北上（沖合移動）には、一般的に 7cm(宮城県では 12 cm) 以上に成長していることが望ましい ③ 水温が 13℃に達すると自然に北上（沖合移動）するため、稚魚が沖合移動に十分な大きさに育つことができるよう、その時間を考慮して放流する必要がある。 <p>沖合移動を 12cm と設定している宮城県では、一般的な設定である 7 cm よりも、長く沿岸域で成長させる必要があるため、早く放流している。本事業にて現地調査を行ったところ 10 cm でも沖合移動に十分な大きさであることが分かったため、沖合移動の設定を 12cm から 10cm 以下に変更することで、放流までの時間に余裕を持つことができるという考え方である。しかし、1 年限りの現地調査から得られた結果であるため、さらなる調査により、適切な尾又長を設定していくことが重要である。本適用オプションを採用した場合、種苗放流の作業工程は変えずに、放流適期の期間を長くすることが可能となるため、短期での対応が可能であり、効果も高いと予想される。</p>
<p>放流適サイズに達するまでに必要な種苗飼育期間の短縮（加温飼育等）</p>	<p>放流種苗が、放流適サイズに達するまでに必要な飼育期間を短縮する方法としては、下記に示す2つの方法が想定される。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 飼育水温の管理、低密度飼育、あるいは高カロリー餌料の利用等により、成長の速さを早める方法 ② 宮城県に回帰するサケは、回帰時期が早い前期群と、遅い後期群に分けることができるため、前期回帰群を優先的に利用し、早期に卵を確保し、種苗育成にかかる時間をできるだけ長く確保する方法。なお、この方法を採用することにより、前期群のサケの割合を遺伝的に増やすことが期待される。 <p>両方法とも、現在研究が行われている分野である。①②のどちらの方法を採用するにしても、新たな労力や設備等が必要となる。回帰率への影響については、現在も盛んに研究されている分野であるが、様々な原因が想定される非常に難しい課題となっており、未だ不確実な部分が多いため、期待される程度は中としている。（北海道大学工藤先生、宮城県庁、宮城県水産研究センターヒアリングより）</p>
<p>飼料や飼育環境改善による幼稚魚の健苗性向上</p>	<p>高カロリーの餌を与えることにより、早く大きく育てるだけでなく、体力的に温度耐性がある優良種苗を生産する適応オプションである。ある程度の温度耐性及び生存率向上は期待できるが、温暖化で予想される高水温に対しての適応可否については不明な点が多い。（北海道大学工藤先生ヒアリングより）</p>
<p>高温耐性品種の活用</p>	<p>今年度のサケ回帰率の低下を受けて、岩手県が研究に着手した段階であり、今後知見は増えていくことが予想される。宮城県内で適応オプションとして検討する場合には、県内の種苗を利用した品種改良（生物多様性を考慮）を想定している。</p>
<p>沿岸漁獲のサケの利用（海産卵）</p>	<p>岩手県等で実際に導入されている手法である。（参照：2019年12月16日水産経済新聞「放流用卵、市場で調達」）河川遡上する前のサケを沖捕りし、できるだけ早い時期に、種苗生産のための卵を確保する方法であり、適応オプションの「放流適サイズに達するまでに必要な種苗飼育期間の短縮」②の方法に関係する内容となる。沖で捕獲したサケの場合には、採卵に高度な技術が必要となる。（宮城県庁、宮城県水産総合研究センターヒアリングより）</p>
<p>野生魚の活用</p>	<p>野生魚活用については、シミュレーション（大熊ら,2016）や現地調査等（森田ら,2013）による研究が行われており、非常に注目されているテーマである。しかし、関連情報の多くは北海道の大きな河川での事例であるため、宮城県の河川でも同様の効果が期待できるかについては検討が必要である</p>
<p>代替種の検討</p>	<p>サケは北日本において、古くから多種多様な利用がされており、地元では最も重要な水産物である。したがって、サケと同様の価値が期待できる代替種を探すことは非常に困難であると思われる。サケを扱っている漁業者、加工業者、流通業者等、影響する幅広い範囲を考慮すると、期待される効果の程度は低いと考えられる。</p>

3.2. 気候シナリオに関する情報

3.2.1. 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 3-6 のとおりである。

表 3-6 使用する気候パラメータに関する情報

項目	シロザケの放流適期予測
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
気候モデル	MRI-CGCM3
気候パラメータ	海面水温
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)

3.2.2. 使用した気候パラメータに関する情報

本調査では、宮城県沿岸の海域を北部と南部に分けて影響調査を行った。解析した領域を図 3-5 に示す。影響調査に使用した、宮城県北部と南部における放流時期（12 月 1 日～6 月 30 日）の日別平均値を、5 日間移動平均した水温について、各々図 3-3、及び図 3-4 の表に示す。北部と南部両地域において、21 世紀中頃までに 2℃～3℃、21 世紀末までには、RCP8.5 のシナリオで 4～5℃の海水温上昇が予測されている。

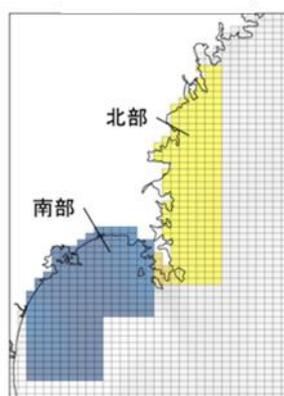


図 3-5 解析に使用したモデルのメッシュ

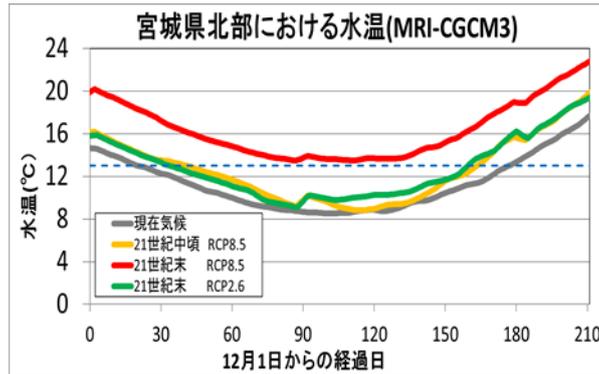


図 3-6 宮城県北部沿岸域における放流期間の日平均水温(5日間移動平均値)

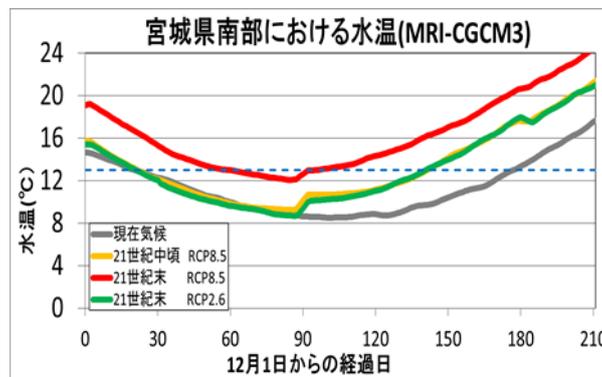


図 3-7 宮城県南部沿岸域における放流期間の日平均水温(5日間移動平均値)

3.2.3. 気候シナリオに関する留意事項

今回の影響評価では、図 3-5 に示した広域にわたるメッシュ平均の値を使用している。そのため、使用するメッシュによっては、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。

3.2.4. バイアス補正に関する情報

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。そこで、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・東北沿岸の海域におけるバイアス補正に関しては、領域が広大となることから、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 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 値は 0.6°C 以内となり、観測値に近い値に補正することができた。

表 3-7 シロザケの放流適期予測に使用した指標について

	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

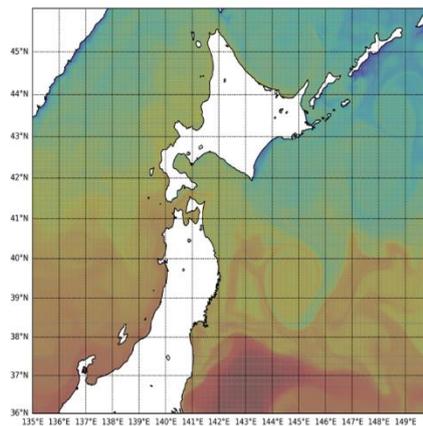


図 3-8 バイアス補正を行う対象範囲

表 3-8 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て平面プロットし、回帰式を作成した。それぞれの格子について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、親潮や黒潮等の細い流れまで補正することは困難である。</p>
参考文献	(Piani et al, 2010) (佐々木他, 2015)

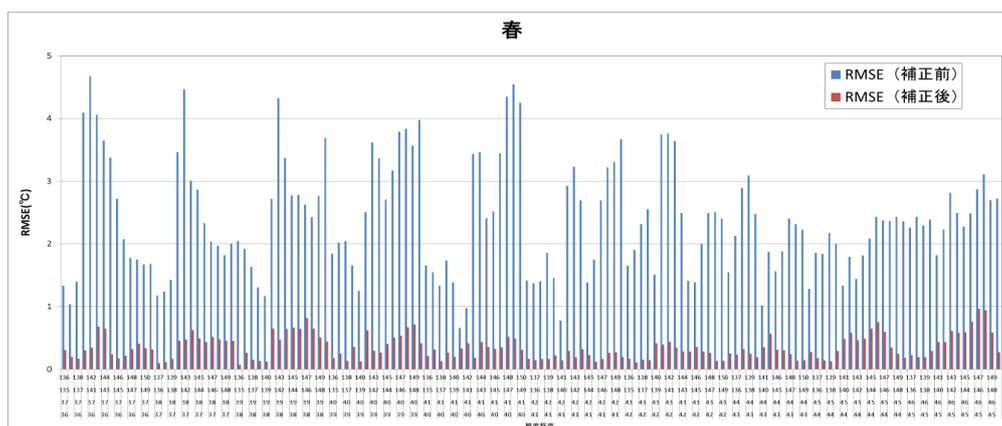


図 3-9 春季における各緯度経度の RMSE 値
(青が補正前、赤が補正後の RMSE 値を示す)

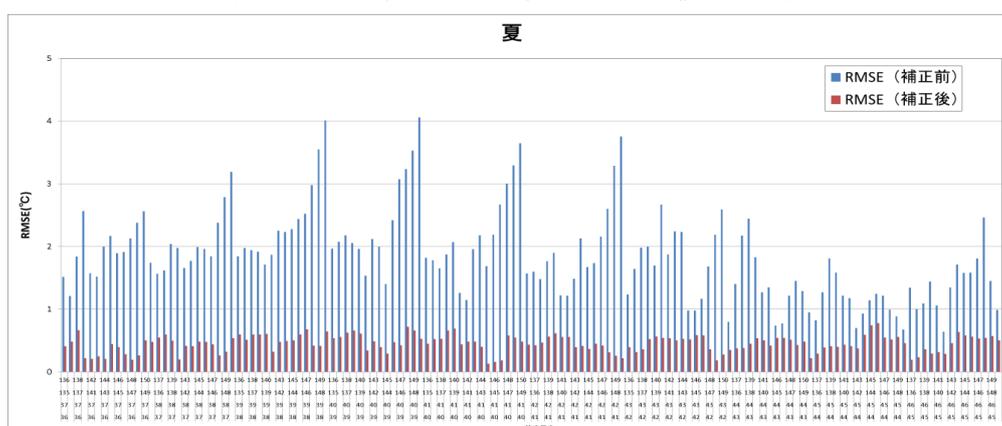


図 3-10 夏季における各緯度経度の RMSE 値
(青が補正前、赤が補正後の RMSE 値を示す)

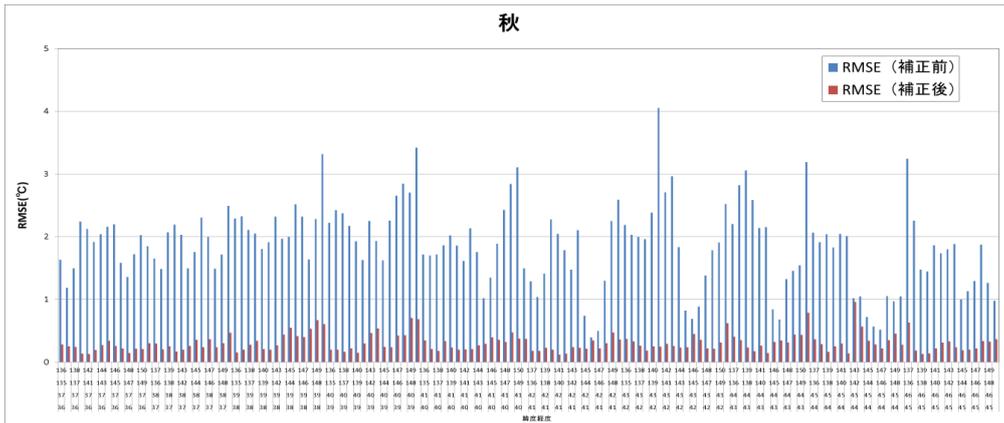


図 3-11 秋季における各緯度経度の RMSE 値
(青が補正前、赤が補正後の RMSE 値を示す)

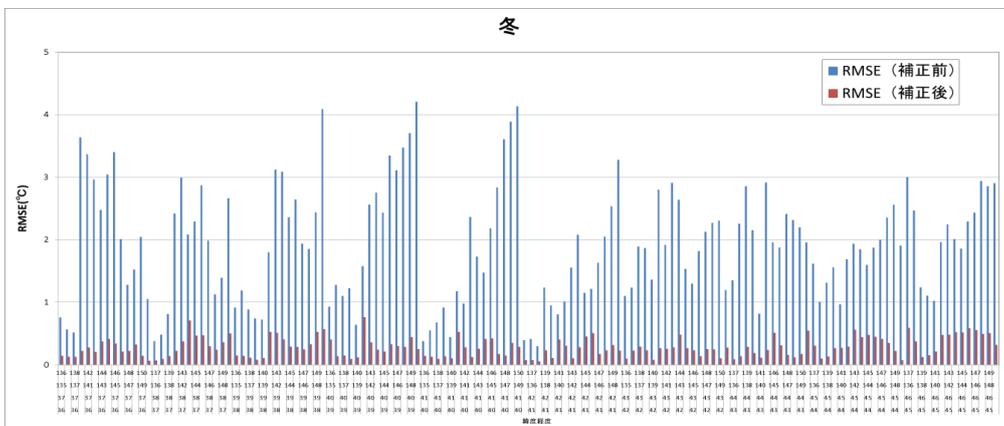


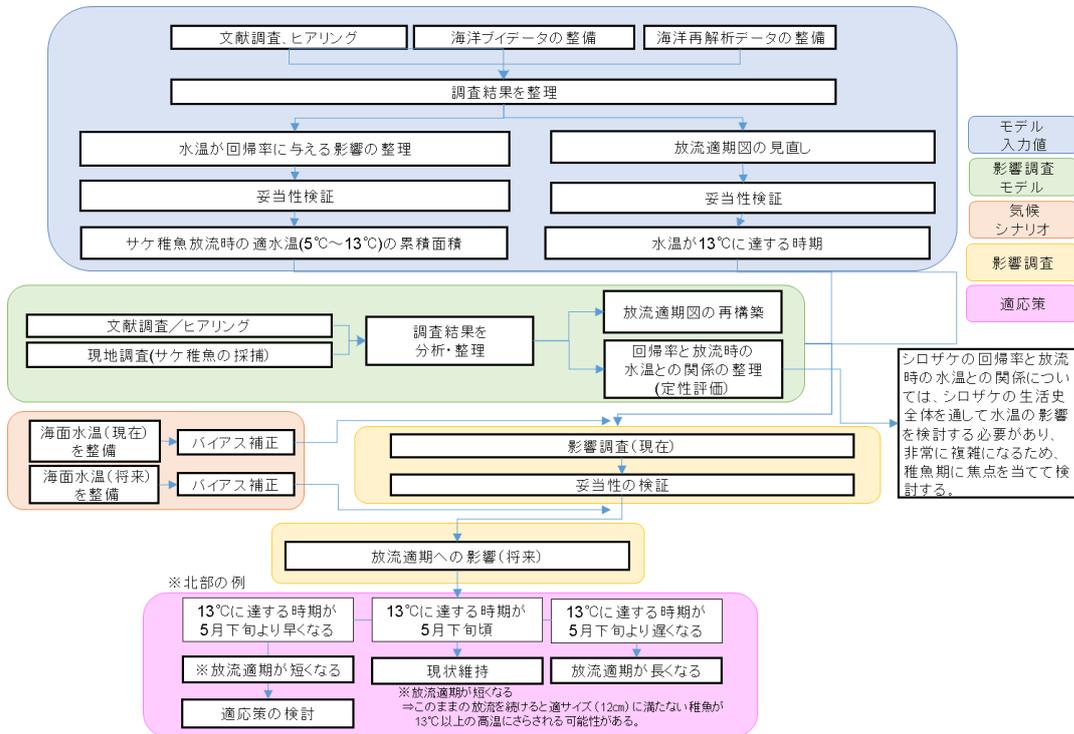
図 3-12 冬季における各緯度経度の RMSE 値
(青が補正前、赤が補正後の RMSE 値を示す)

3.2.5. 気候シナリオ選択の理由

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

3.3. 気候変動影響に関する調査手法

3.3.1. 手順



3.3.2. 使用したデータ・文献

使用したデータを表 3-9、使用した文献について、表 3-10、表 3-11 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 3-9 収集したデータ

データ名	内容
サケ親魚に関するデータ(回帰率)	各河川別の捕獲数、年齢組成、漁協毎の海面漁獲数（1997年～2014年） 各漁協別の海面漁獲数（2014年～2016年）
サケ幼稚魚分析データ	本事業において、宮城県の沿岸域で採捕した幼稚魚の分析を行った結果に関するデータ。 各地点にて採捕された幼稚魚の体長、耳石、胃内容物、脊椎骨数、安定同位体比の分析結果
定置網で測定した水温データ	本事業において、宮城県の沿岸域で幼稚魚を採捕した定置網にて観測した水温データ。
北西太平洋海洋長期再解析データセット FORA-WNP30 HPよりダウンロード (http://synthesis.jamstec.go.jp/FORA/)	日本周辺の約30年にわたる海洋環境を水平解像度0.1度（約10km）という高分解能で再現したデータセット。現在の影響評価に使用。
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 （HP： https://www.ncdc.noaa.gov/oisst ）	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 3-10 水温上昇が回帰率に与える影響に関する知見

内容	調査地域	参考文献
本州太平洋地域においては、適温期 5～13℃の累積面積と回帰率に正の相関がみられる	北太平洋	Saito,T.(2002) Fluctuations in return rates of hatchery-reared chum salmon (<i>Oncorhynchus keta</i>) in relation to coastal ocean environment in Japan, NPAFC Doc, 614, 20
岩手県の回帰率の変動と三陸沖における団水費（津軽暖龍と親潮の相対的強さ）には負の関係がみられる	三陸沿岸	Wagawa, T.,T. Tamate, H. Kuroda, S. Ito, S. Kakehi, T. Yamanome and T. Kodama(2016) Relationship between coastal water properties and adult return of chum salmon (<i>Oncorhynchus keta</i>) along the Sanriku coast, Japan Fisheries Oceanography, 25, 598-609.
降海時期の沿岸海水温が温暖であると、年級群の生き残りが良くなる傾向がある。（低水温から高水温への急激な昇温が見られた年は回帰率が低かった。）	北太平洋	斎藤 寿彦・福若 雅章(2018)「北太平洋におけるサケ属魚類の資源動態」,海洋と生物,237,vol40,no.4,319-328.
現地調査の結果から、沿岸域の高水温化によりプランクトンが減少傾向となり、十分に成長できなかった放流魚が減耗したため、サケ資源が減少している可能性があるという情報が得られた。	岩手県	川島拓也,清水勇一,太田克彦,山根広大(2018)「三陸沿岸におけるサケ幼稚魚の分布、生息環境と親魚回帰」,海洋と生物,237,vol40,no.4,342-345

表 3-11 放流適期設定に関する知見

内容	参考箇所	参考文献
日本系サケは、岸から数 km～数十 km 以内の沿岸域を岸沿いに北上し、7 月末頃までに日本沿岸域を離れてオホーツク海に移動する。	幼稚魚の遊泳域の情報として	入江隆彦（1990）海洋生活初期のサケ稚魚の回遊に関する生態学的研究，西海区水産研究所研究報告，68, 1-142
北海道等で採用されている放流適期では、海水温が 13℃に達してサケ幼稚魚が沖合域に移動するまでに、体重 3g(尾叉長 7 cm)以上に成長するよう放流時のサイズが設定されている	放流時の尾叉長	関二郎（2013）さけます類の人工ふ化放流に関する技術小史(放流編)，Journal of Fisheries Technology, 6, 69-82.
1980 年代に宮城県で実施されたサケ幼稚魚の採捕調査の結果から、沿岸における幼魚の瞬間成長係数の平均値は、低水温域で 0.012、水温の昇温期で 0.015 と報告されている。	瞬間成長率	宮城県（1984）さけ・ます資源増大対策調査報告書昭和 54～58 年度総括，74.
沿岸域での一般的な瞬間成長係数(体長)を 0.01 として放流適期図を作成。	瞬間成長率	野川秀樹(1992) 本州日本海沿岸におけるサケ増殖と資源動態，魚と卵，161, 29-43.

3.3.3. 有識者ヒアリング

有識者ヒアリングの概要を、表 3-12 に示す。

表 3-12 ヒアリング結果

NO.	1
ヒアリング対象者	北海道大学 教授 工藤 秀明氏
日付	2017年8月18日 09:00~10:00
場所	北海道大学水産学部4階 研究室(409室)
概要	水温がサケ稚魚や回帰率に与える影響について、現在行われている「さけます関係研究開発推進会議」で議論されている東北周辺の水温変化と回帰率を研究(Wagawa et al. 2016)等の最新の知見があることが分かった。また、現地調査の内容や分析項目について、骨格形成に関する分析が必要等、ご助言頂いた。
NO.	2
ヒアリング対象者	東北区水産研究所 沿岸漁業資源研究センター さけます資源グループ(塩釜庁舎)
日付	2017年8月18日 10:30~11:30
場所	東北区水産研究所 塩釜庁舎
概要	他の道県におけるサケ幼稚魚の調査に関する動向や、放流適期図に関する知見、種苗放流工程の実態等についてご助言頂いた。
NO.	3
ヒアリング対象者	北海道大学 教授 工藤 秀明氏
日付	2018年5月28日 13:30~15:30
場所	北海道大学水産学部4階 研究室(409室)
概要	北海道におけるサケ幼稚魚の知見として、低水温や海鳥による捕食等も影響している等をご教示頂いた。また、幼稚魚だけではなく、親魚の回帰時の影響も出ており、最新の研究では高水温により漁獲次期が変化することや、河川遡上率が高くなる等の報告がされていることが分かった。

NO.	4
ヒアリング対象者	北海道区水産研究所 さけます資源研究部 福若 雅章部長
日付	2017年9月5日 14:00~16:00
場所	北海道区水産研究所 2階会議室
概要	<p>以下コメントを頂いた。</p> <ul style="list-style-type: none"> 宮城県の放流適期図については、曲線式の設定方法等について帰山先生の論文に詳細が記載されている可能性があるため、一とおりに目を通した方が良い（文献リストを供与頂いた）。 尾叉長 7cm は、水温が高くなった際に沖合に泳ぎだしても問題ないとされる最低限の尾叉長である。宮城県沿岸は水温が高いために成長も早い。そのため、早期に放流された稚魚は内湾に滞留し成長するため、環境条件によっては 7cm 前後で移動することもあるが、12 cmはそれ程大きい数字ではない。 放流適期を設定する際の水温は、サケ稚魚が遊泳する海域（沿岸域と沖合域）の水温も考慮に入れながら検討した方が良い。
NO.	5
ヒアリング対象者	<p>東北大学大学院農学研究科 片山 知史教授 宮城県庁水産林政部水産基盤整備課 宮城県水産技術センター 気仙沼水産試験場</p>
日付	2017年10月24日 14:00~16:00
場所	宮城県水産基盤整備課 12階 打合せスペース
概要	<p>調査の方針について議論し、宮城県の放流適期図について、今後は下記の考え方に沿って実施していくこととなった。</p> <ul style="list-style-type: none"> 宮城県の放流適期図について、尾叉長と瞬間成長率については現地調査の結果から最終的に整理する。 水温については、宮城県沿岸の水温変動は激しいため、複数のメッシュ間で平均を取り検討を行う。

NO.	6
ヒアリング対象者	東北大学大学院農学研究科 片山 知史教授 宮城県庁水産林政部水産基盤整備課 宮城県水産技術センター 気仙沼水産試験場
日付	2017年2月1日 10:00～12:00
場所	宮城県庁本庁舎 16階 1601会議室
概要	現地調査の結果から、採捕されたシロザケは尾叉長 10cm 程度のサイズが多く、また、降海後の日輪数と筋肉の安定同位体分析の結果から、1ヶ月以上にわたって海洋生活を送っていることが分かった。今回の現地調査の結果も踏まえて関係者で検討を行った結果、種苗放流に関する最優先事項は、海水温が 13℃に達して沖合～北上移動を開始する 1ヶ月前に放流することである。このことにより、沖合～北上移動を行うための準備期間を確保することができる、という議論がなされた。
NO.	7
ヒアリング対象者	北海道大学 教授 工藤 秀明氏
日付	2019年12月10日 14:00～15:00
場所	北海道大学水産学部 4階 研究室 (409室)
概要	適応策の案について、それぞれの適応策に関する新たな知見や課題、また、新たな知見(飼料や飼育環境改善による幼稚魚の健苗性向上に関する内容)についてご教示頂いた。

3.3.4. 観測及び実証実験

本調査では、サケの幼稚魚の海洋生活初期における成長、食性、骨格形成について調べ、外洋への移出の過程を明らかにすることを目的として現地調査を実施した。宮城県の定置網(図 3-13)で混獲されたサケ幼稚魚の採捕、及び水温測定を実施した。また、採捕された幼稚魚について、表 3-13に記載する8つの項目に関する分析を東北大学に依頼した。なお、本調査を行うに当たり、宮城県漁業調整規則第 37 条(さけ:全長二十センチメートル以下)の適用除外に関する特別採捕許可を、宮城県気仙沼地方振興事務所、及び宮城県東部地方振興事務所へ申請し、採捕許可を受けてから調査を実施した。

ただし、本調査では、実証実験については実施していない点に注意が必要である。

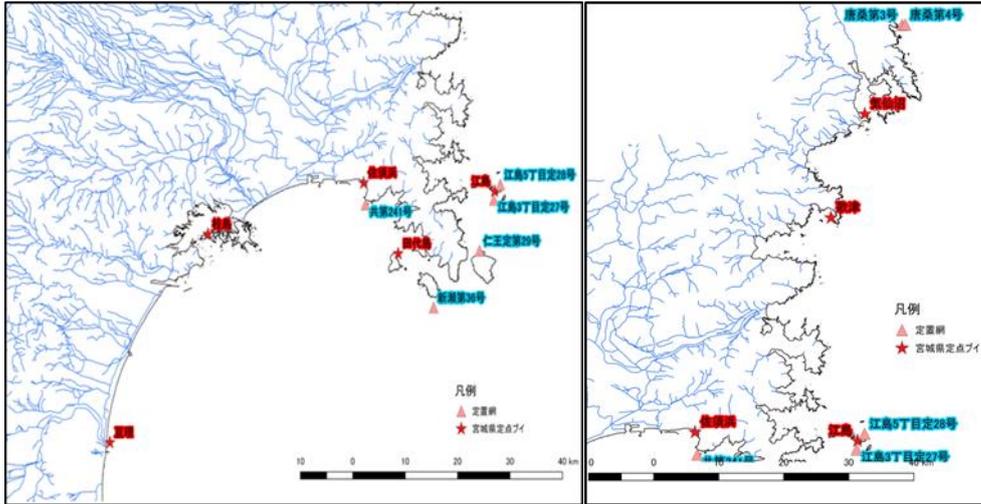


図 3-13 ブイによる定点観測の地点と定置網の位置関係（左：石巻、右：気仙沼）

出典：国土交通省国土政策局「国土数値情報（河川データ・平成 19 年）」

（<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/cgi-bin/download.php>）及び国土数値情報（海岸線データ・平成 18 年（<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/cgi-bin/download.php>）」をもとに日本エヌ・ユー・エス（株）が編集加工

表 3-13 分析項目

No.	分析項目
1	尾叉長測定
2	胃内容物分析
3	耳石温度標識判別（バーコード様輪紋の確認）
4	耳石輪紋数カウント
5	日周輪紋間距離の測定(瞬間成長率の推定)
6	耳石微量元素分析
7	筋肉の安定同位体比の測定
8	骨格形成に関する分析(X線撮影または透明標本作成)

3.3.5. 気候変動影響予測手法の検討

本調査では、宮城県からの要望により、現在利用されている宮城県放流適期図（昭和版）を使って、将来の放流適期に関する予測を行った。なお、宮城県の北部と南部では水温が大きく異なることから、放流適期図を北部と南部で別々に再構築した上で将来予測を行った。

また、ヒアリングや文献調査によって得られた情報に基づき、宮城県における水温上昇と回帰率の関係について解析を行ったが、両者の間に関係性を示す結果は得られなかった（詳細を 3.3.6.1 に示す）。

3.3.6. 影響予測モデルに関する情報

3.3.6.1. 水温上昇がサケ親魚の回帰率へ与える影響に関するモデルについて

近年、サケの回帰率減少が問題となっており、その要因として放流時の沿岸水温による影響が指摘されている（宮腰, 2007 や Saito, 2002）。将来的に、気候変動に伴う湾内の水温上昇により、サケ放流種苗の生産放流工程に影響が生じ、適切な放流幼稚魚のサイズや時期を維持できなくなる可能性が考えられる。その結果、回帰率の低下を招くこととなり、漁獲量に悪影響が出てくることが懸念される。そこで、宮城県を含む本州太平洋岸において、サケ幼稚魚が北上移動するとされる沖合域の水温と、サケの回帰率との関係について解析を行った。参考として利用した情報は、本州太平洋海域において、適温期 5~13°C の累積面積と回帰率との間に正の相関がみられると報告した Saito(2002)である。解析には、回帰率のデータとして、宮城県全体の年級別回帰率を使用した。また、水温のデータについては、国立研究開発法人海洋研究開発機構及び気象庁気象研究所により作成された、北西太平洋海洋長期再解析データセット (FORA-WNP30) を利用した (Usui et al., 2017)。なお、水温データはサケの放流年級群に統一した (例: 2002 年 1 月の水温⇒2001 年級に対する水温)。使用した海洋再解析データの詳細を表 3-14、表 3-15 に示す。解析は Saito (2002) に基づき、表 3-16 に示す手順で適温域の累積面積を計算した後、回帰率と面積の散布図を作成し相関係数を求めた。

本州太平洋海域と宮城県の沿岸域を対象として累積面積を求め、回帰率との関係を整理した結果を表 3-17 に示す。回帰率と各海域の累積面積との相関係数は、太平洋については 0.407721 となり、何らかの関係が示唆される結果が得られているが、宮城県の沿岸域においては-0.074938 となり、両者の関係性を確認することは出来なかった。

その他の情報として、岩手県におけるサケ回帰率の変動と、三陸沖における暖水比（津軽暖流と親潮の相対的強さ）との間には、負の関係がみられるという結果が報告されている (Wagawa et al, 2016)。また、斎藤・福若 (2018) は、親潮の勢力低下によって、暖水比の急激な増加が生じているのであれば、津軽暖流の影響は太平洋沿岸域において広範囲に波及する可能性があるとして報告している。しかしながら、親潮・津軽暖流・黒潮が混ざり合う三陸沿岸域は水温が安定せず、さらにリアス式海岸の入組んだ地形により、潮の流れも複雑になっていることが予想される。そのため、暖水比を用いた分析を行うために必要となる、詳細な海洋環境情報（水温、塩分、潮流等）を揃えるのは非常に難しいと考えられる。そこで、本事業では主として放流適期図を用いた影響評価を行うこととし、海水温の変化がサケ親魚の回帰率に与える影響については今後の課題とした。なお、海水温と回帰率との関係は、現在盛んに研究されているテーマであることから、関連情報の収集を継続することが重要である。

表 3-14 使用した海洋再解析データ FORA-WNP30 について

項目	内容
データセット	北西太平洋海洋長期再解析データセット (FORA-WNP30)
気候指標	日平均水温 (ポテンシャル水温)
対象範囲	本州太平洋エリアと宮城県沿岸エリア (図 3-14)
空間解像度	10km 格子
時間解像度	日別値
使用する深さ	0m
使用する期間	現在として 1991 年～2015 年 日別値の 15 年平均値

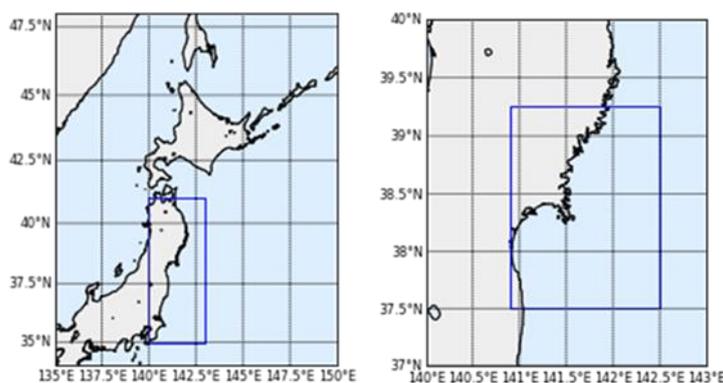


図 3-14 解析に使用した領域 (左：本州太平洋、右：宮城県沿岸)

表 3-15 解析に使用した領域

領域	緯度	経度	面積
本州太平洋	35.00° ~ 41.00°	140.00° ~ 143.00°	約 27,199 km ²
宮城県沿岸	37.50° ~ 39.25°	140.90° ~ 142.50°	約 175,530 km ²

表 3-16 水温上昇が回帰率へ与える影響に関する調査方法 (Saito,2002)

手順	内容
1)	指定領域内における FORA-WNP30 でのメッシュ数、及び適温 (5°C～13°C) となるメッシュ数をカウントする。
2)	指定領域の面積を台形と仮定し計算する。
3)	求めた指定領域の面積をデータ数で割り、1メッシュあたりの面積を求める。
4)	適温となるメッシュ数に1メッシュあたりの面積を乗じ、適温域の面積を求める
5)	年毎に適温域の面積を加算し、累積面積を求める
6)	回帰率と面積の散布図を作成し相関係数を求める

表 3-17 累積面積と回帰率の相関係数

領域	相関係数
本州太平洋海域	0.407721
宮城県沿岸	-0.074938

3.3.6.2. 宮城県の放流適期モデル

本調査では、現在宮城県において放流適期の参考として使用されている、「昭和 50 年代に作成された宮城県放流適期図(昭和版)」(図 3-15) の見直しと再定義を行っている。宮城県沿岸では、金華山を境に水温が大きく変わるため、宮城県沿岸を北部と南部の 2 つの領域に分けて再構築を実施した。なお、宮城県放流適期図(昭和版)の成長曲線式には、宮城県(1984)の報告書に記載されている瞬間成長率を使用し、最も当てはまりの良いデータとして下記の曲線①及び曲線②を用いた。

曲線① : $y=2.0*\exp(0.012275*x)$ (瞬間成長率 : 0.012275)

曲線② : $y=2.0*\exp(0.0176*(x-79))$ (瞬間成長率 : 0.0176)

サケの回帰時期は変わらない(曲線①最早の成長曲線は変わらない)と仮定して、曲線②の 13°C の時期がいつになるかを予測し、将来の放流適期を求めた。最初に、宮城県水産技術センターが観測している定点観測のデータから、曲線②最遅の成長曲線において、海水温が 13°C に達する時期を求めることで、地域別に(北部及び南部)宮城県放流適期図(2000 年版)を作成した。しかしながら、宮城県沿岸は黒潮と親潮が混合する海域であり、地点によって大きく水温が変わるため、定点観測データを用いて温度を設定すると、地点による水温の差が大きくなってしまう可能性がある。文献調査やヒアリングの結果、幼稚魚は沿岸から 30 km 程度までの浅い海域を遊泳するとの情報が得られたため、図 3-16 に示した広範囲の海域の平均値として 13°C の値を設定し、再度放流適期の再構築を行った。その結果を図 3-17 に示す。さらに、再構築した放流適期図を使用して、将来の北部・南部それぞれにおける放流適期の予測を行った。

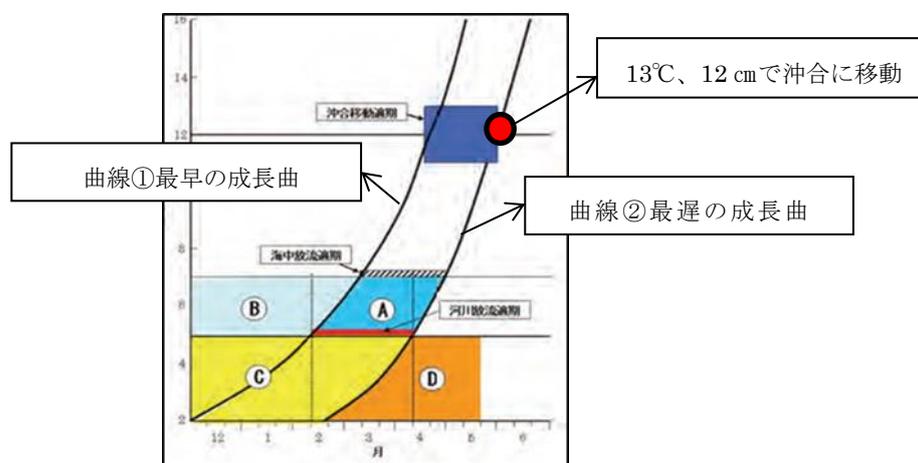


図 3-15 宮城県のサケ放流適期のシミュレーション(宮城県放流適期図(昭和版))

出典:第 22 回「食」と「漁」を考える地域シンポジウム 北日本漁業経済学会シンポジウムサケの資源と流通をめぐる今日的課題 3. 前期・後期来遊サケ資源と種苗放流の諸問題 高橋清孝(元・宮城県内水試)

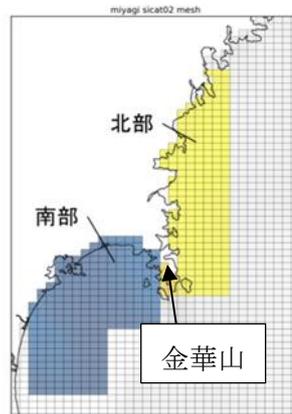


図 3-16 解析に使用した領域

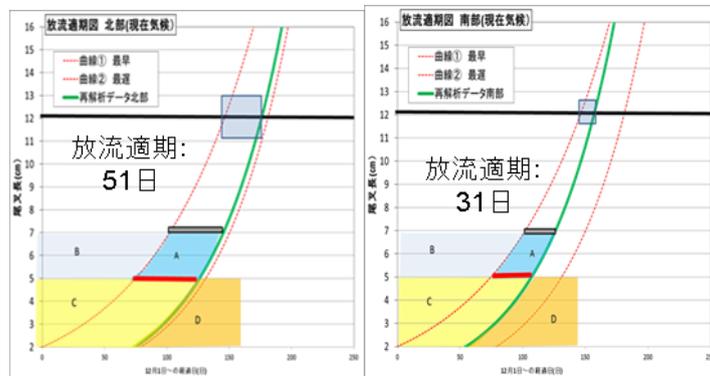


図 3-17 再構築した宮城県放流適期図 (左：北部、右：南部)

3.3.7. 影響予測に必要な入力パラメータ

使用する海洋データについて、図 3-6 に示すように宮城県沿岸を北部と南部に分けて平均値を作成した。その後、放流時期(12月1日～6月30日)について、日別平均値の20年平均値を作成し、5日間移動平均した値を作成し、放流適期の予測を行った。

3.3.8. 影響予測における留意事項(制限事項)

本調査では下記2点に留意する必要がある。

- ・ 河川降下後の幼稚魚が沿岸域において滞留している時期から、沖合域を北上するまでの時期を影響評価の対象としている。
- ・ 上記の評価対象以外の期間となる、親魚の回帰時期あるいは種苗飼育時等の環境条件は、現在と変わらないと仮定している。

3.4. 調査結果

3.4.1. 文献調査結果

文献調査では、①水温上昇が回帰率に与える影響に関する知見、②放流適期設定に関する知見について情報収集を行い、下記に示す関連情報を得た。

- ① 水温上昇が回帰率に与える影響に関する知見

- ・ 岩手県の沿岸域を対象とした研究としては、回帰率の変動と三陸沖における暖水比（津軽暖流と親潮の相対的強さ）との間に、負の関係がみられるという結果が報告されている（Wagawa et al., 2016）。
- ・ サケ幼稚魚の降海期における、沿岸域の海水温が温暖であると、年級群の生き残りが良くなる傾向があるとの結果が報告されている（斎藤・福若, 2018）。
- ・ 本州太平洋域において、適温期（5～13℃）の累積面積とサケの回帰率との間に、正の相関がみられるとの結果が報告されている（Saito, 2002）。

② 放流適期設定に関する知見

- ・ 放流適期図の水温を設定するための検討を実施した際には、入江（1990）の結果を参考にした。また、沿岸から 30 km 程度までの海域における水温を使用することとした。なお、瞬間成長率の検討においては、文献調査の結果以外に、現地調査の結果も合わせて用いた。

3.4.2. 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。サケ幼稚魚の分析を行って頂いた東北大学からは現地調査の分析結果から、採捕されたシロザケは尾叉長 10cm 程度のサイズが多く、また、降海後の日輪数と筋肉の安定同位体分析の結果から、1ヶ月以上にわたって海洋生活を送っているという結果を得ることができた。また、適応策を検討する上で、地域毎に課題や状況が異なることについて様々ご助言を頂き、宮城県の状況や課題内容に合わせて適応策の整理を行った。

3.4.3. 観測や実証実験の結果

現地調査の結果、採捕された個体数は 454 尾であった。現地調査、及び分析結果により、放流時期を再定義する際に重要となる情報が得られた。

- ① 海水温が 13℃に到達して以降は、定置網で幼魚が捕獲されることはほとんどなく、既報文献等で報告されているように、13℃までに沿岸から沖合へ移出し、北上を開始したと推察された。
- ② 宮城県沿岸で採捕された尾叉長 7cm～13 cm 程度のサケは、降海後 1ヶ月以上経過した個体が多く確認された。また、胃内容物分析を実施した結果、サケ幼稚魚は海洋域で得られる高カロリーの餌を摂取しており、海洋環境に十分に適応している状態であることが分かった。なお、その根拠を以下に示す。
 - ・ 耳石日周輪数を計測した結果、放流個体は約 20～30 日で降海し、尾叉長 7cm～13 cm 程度までの 1～2ヶ月間、沿岸域に滞留していることが推定された。
 - ・ 降海したサケは、体長の増加とともに徐々にカイアシ類やオキアミといった小型甲殻類等を摂食していることが胃内容物分析から確認された。また、炭素窒素安定同位体比を分析したところ、胃内容物分析の結果が反映されていることが確認された。なお、降海後すぐに外洋に向かわず、沿岸域に 1～2ヶ月滞留するという、日周輪の解析結果とも整合性がとれている。

- ・ 既に骨格形成が十分に進んでいることが確認された

以上のことから、サケの幼稚魚が沖合移動を開始するまでに、海洋生活に適応して北上するための準備が十分に整った状態となるには、13°Cに達するおよそ1ヶ月前に放流を行う必要があると考えられた。

3.4.4. 気候変動影響予測結果

現在利用されている放流適期図の再構築を行い、宮城県の北部・南部における将来の放流適期を予測した。その結果、北部・南部ともに、21世紀中頃や21世紀末のRCP2.6のシナリオにおいては、現在よりも放流適期が短縮することが分かった。また、21世紀末のRCP8.5のシナリオにおいては、放流適期が消滅する可能性が示唆された(図3-18、図3-19)。

また、海水温が回帰率に与える影響に関する解析については、宮城県における放流後の水温と、回帰率への影響との関係を明らかにすることができなかった。現在も研究が盛んにおこなわれている分野であり、最新の知見を取り入れていく必要がある。

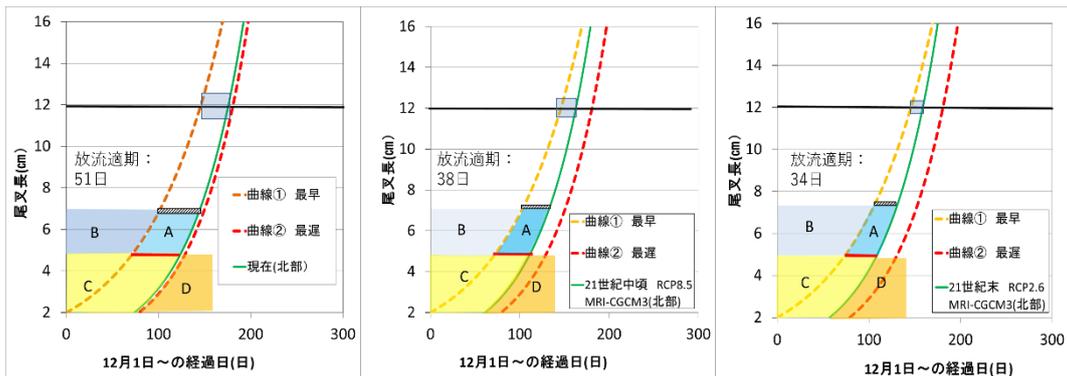


図 3-18 宮城県北部における放流適期予測

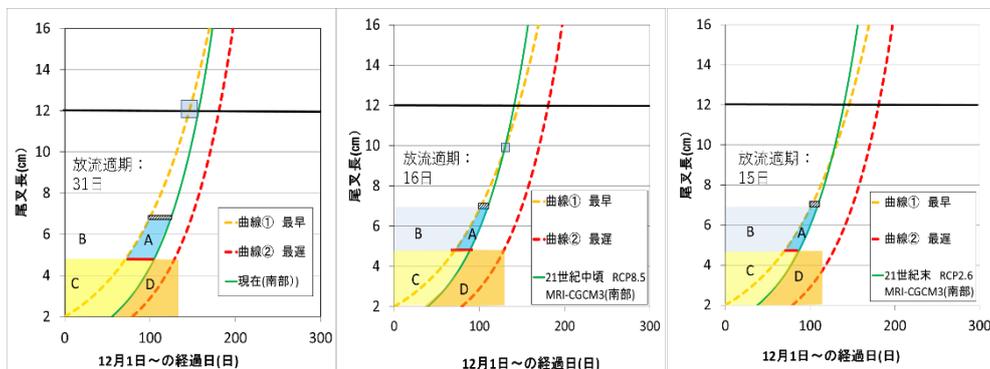


図 3-19 宮城県南部における放流適期予測

3.4.5. 結果を活用する上での留意点・制限事項

将来的に予想される、海水温の高水温化は、サケ親魚の回帰時期の変化や、幼稚魚の成長速度が変わる等、種苗放流工程に様々な影響を及ぼすことが推測されるが、本事業では、河川降下後の幼稚魚が沿岸域での遊泳期を経て、沖合移動を開始するまでの時期だけを評価対象としている。また、親魚の回帰時期と種苗飼育時の環境は、現在と変わらないと仮定している点に留意が必要である。

サケの回帰率には表 3-10 に示すように様々な要因が挙げられているが、幼稚魚の降下後における沿岸域の急激な水温変化や、三陸沖の暖水渦・冷水渦等の影響も懸念されている。しかしながら、これらの要因がサケに与える影響については、まだ未解明の部分も多く解明されておらず、引き続き最新の情報を収集していく必要がある。

また、今回使用した放流適期図は、宮城県で実際に使用されているものを再構築した図である。そのため、宮城県における将来予測に用いた放流適期図を他の地域に適用する場合には、対象地域の状況に合わせて、さらに再構築を行う必要があると考えられる。

3.5. 適応オプション

3.5.1. 手順

本調査における適応オプションの検討フローを図 3-20 に示す。

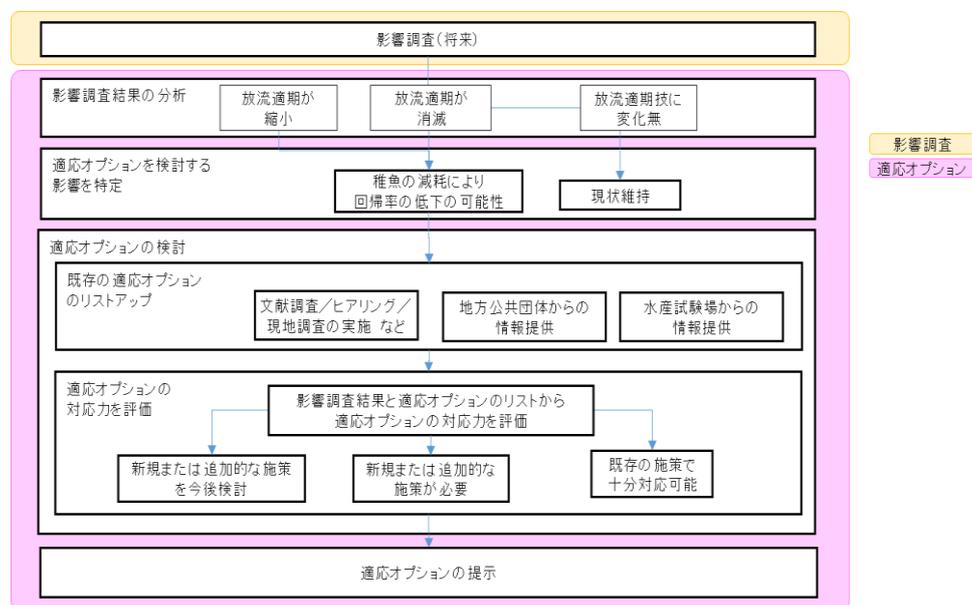


図 3-20 適応オプションの検討フロー図

3.5.2. 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 3-18～表 3-19 に示す。

表 3-18(1) シロザケの適応オプション

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
沖合移動期の尾又長引き下げによる放流適期の見直し ⁷	●	●		-	適切な尾又長設定のため、更なる調査、分析が必要	◎	◎	◎	△	短期	高
放流適サイズに達するまでに必要な種苗飼育期間の短縮（加温飼育等）	●	●		-	新たなコスト負担を考えると、現状では設備の増設や、労働力の確保が難しい。	△	△	△	◎	短期	中
飼料や飼育環境改善による幼稚魚の健苗性向上	●	●		-	新たなコスト負担を考えると十分な予算確保が難しい。	△	△	△	◎	短期	中
高温耐性品種の活用	●	●		-	県内の種苗だけで、21世紀末に予想されている水温に耐えられる品種を作出できるか不明である。遺伝的劣化が影響として懸念される。	△	△	△	△	長期	低

※行政は県庁と水産試験場を想定している

⁷ 放流後のサケ幼稚魚の沿岸生活期を短くすることで、放流期間を長く確保する適応オプションである。放流時の尾又長は現在と同様に5cm以上必要である。

表 3-18(2) シロザケの適応オプション

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
沿岸漁獲のサケの 利用 (海産卵)	●	●		一部普 及され ている	早期の種苗卵 確保が目的で あるが、サケの 回帰率が大きく 減少しないこ とが前提にな る。	△	△	△	◎	長期	低
野生魚の活用 ⁸	●	●		-	環境収容力を 超える数のサ ケが遡上した 場合、あるいは サケが遡上し ていない河川 にサケが遡上 した場合には、 遡上河川の生 態系に悪影響 が及ぶ可能性 がある。	△	△	△	◎	長期	中
代替種の検討	●			-	サケと同程度 の規模を代替 できる水産種 を考えるのは 難しい。 漁業者や加工 業者等、水産業 界全体を考慮 する必要がある。 。	△	△	△	-	長期	低

※行政は県庁と水産試験場を想定している

⁸ 野生魚は自然産卵で生まれた個体であり、両親が野生魚か放流魚(人工種苗)かは問わない。人工環境下でふ化、成長した稚魚に比較して、自然環境でふ化、成長した稚魚は、自然選択の影響を受けることで、人工種苗よりも自然環境に適した個体が生き残っていると考えられる。したがって、野生魚を利用する事で、より環境に適応した遺伝子を残すことが可能となる。ただし、現時点においては、環境収容力の範囲内においてサケの野生魚の数が保たれているため、積極的に野生魚を保全する場合には、環境収容力を超えないよう気を付ける必要がある。

表 3-19 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
<p>沖合移動期の尾又長引き下げによる放流適期の見直し</p>	<p>回帰率が良いといわれるサケの放流には、下記の3つの条件がある。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 5cm以上で放流し、その後は沿岸域で成長する。 ② 北上（沖合移動）には、一般的に7cm(宮城県では12cm)以上に成長していることが望ましい ③ 水温が13℃が来ると自然に北上する（沖合移動）ため、稚魚が沖合移動に十分な大きさに育つことができるよう、その時間を考慮して放流する必要がある。 <p>沖合移動を12cmと設定している宮城県では、一般的な設定である7cmよりも、長く沿岸域で成長させる必要があるため、早く放流している。本こと業にて現地調査を行ったところ10cmでも沖合移動に十分な大きさであることが分かったため、沖合移動の設定を12cmから10cm以下に変更することで、放流までの時間に余裕を持つことができるという考え方である。しかし、1年限りの現地調査から得られた結果であるため、さらなる調査により、適切な尾又長を設定していくことが重要である。本適応オプションを採用した場合、種苗放流の作業工程は変えずに、放流適期の期間を長くすることが可能となるため、短期での対応が可能であり、効果も高いと予想される。</p>
<p>放流適サイズに達するまでに必要な種苗飼育期間の短縮（加温飼育等）</p>	<p>放流種苗が、放流適サイズに達するまでに必要な飼育期間を短縮する方法としては、下記に示す2つの方法が想定される。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 飼育水温の管理、低密度飼育、あるいは高カロリー餌料の利用等により、成長の速さを早める方法 ② 宮城県に回帰するサケは、回帰時期が早い前期群と、遅い後期群に分けることができるため、前期回帰群を優先的に利用し、早期に卵を確保し、種苗育成にかかる時間をできるだけ長く確保する方法。なお、この方法を採用することにより、前期群のサケの割合を遺伝的に増やすことが期待される。 <p>両方法とも、現在研究が行われている分野である。①②のどちらの方法を採用するにしても、新たな労力や設備等が必要となる。回帰率への影響については、現在も盛んに研究されている分野であるが、様々な原因が想定される非常に難しい課題となっており、未だ不確実な部分が多いため、期待される程度は中としている。（北海道大学工藤先生、宮城県庁、宮城県水産研究センターヒアリングより）</p>
<p>飼料や飼育環境改善による幼稚魚の健苗性向上</p>	<p>高カロリーの餌を与えるにより、早く大きく育てるだけでなく、体力的に温度耐性がある優良種苗を生産する適応オプションである。ある程度の温度耐性及び生存率向上は期待できるが、温暖化で予想される高水温に対しての適応可否については不明な点が多い。（北海道大学工藤先生ヒアリングより）</p>
<p>高温耐性品種の活用</p>	<p>今年度のサケ回帰率の低下を受けて、岩手県が研究に着手した段階であり、今後知見は増えていくことが予想される。宮城県内で適応オプションとして検討する場合には、県内の種苗を利用した品種改良（生物多様性を考慮）を想定している。</p>
<p>沿岸漁獲のサケの利用 (海産卵)</p>	<p>岩手県等で実際に導入されている手法である。（参照：2019年12月16日水産経済新聞「放流用卵、市場で調達」）河川遡上する前のサケを沖捕りし、できるだけ早い時期に、種苗生産のための卵を確保する方法であり、適応オプションの「放流適サイズに達するまでに必要な種苗飼育期間の短縮」②の方法に關係する内容となる。沖で捕獲したサケの場合には、採卵に高度な技術が必要となる。（宮城県庁、宮城県水産総合研究センターヒアリングより）</p>
<p>野生魚の活用</p>	<p>野生魚活用については、シミュレーション（大熊ら,2016）や現地調査等（森田ら,2013）による研究が行われており、非常に注目されているテーマである。しかし、関連情報の多くは北海道の大きな河川での事例であるため、宮城県の河川でも同様の効果が期待できるかについては検討が必要である</p>
<p>代替種の検討</p>	<p>サケは北日本において、古くから様々な仕方で利用されており、地元では最も重要な水産物である。したがって、サケと同様の価値が期待できる代替種を探すことは非常に困難であると思われる。サケを扱っている漁業者、加工業者、流通業者等、影響する幅広い範囲を考慮すると、期待される効果の程度は低いと考えられる。</p>

3.5.3. 個々の適応オプションに関する説明

■ 沖合移動期の尾又長引き下げによる放流適期の見直し

高水温化の影響による、放流適期の短縮に対する適応策である。平成 30 年度に本事業で実施した現地調査では、尾又長 7cm～13 cmの程サケが採捕され、餌の摂食状況や骨格形成の様子から、おおむね海洋生活に適応した状態であることが確認された。したがって、12cm 以下のサケにおいても、沖合移動が可能であると推測された。そこで、宮城県放流適期図で設定されている、「沖合移動期（13℃）の際の尾又長は 12 cm」という基準のうち、尾又長の長さを 12cm より小さくすることで、孵化場での稚魚飼育期間を短くすることができれば、放流適期を長く確保することができる（図 3-21）。ただし、1 年間のみの現地調査結果であるため、具体的な放流尾又長を設定するには、更に調査、分析が必要である。

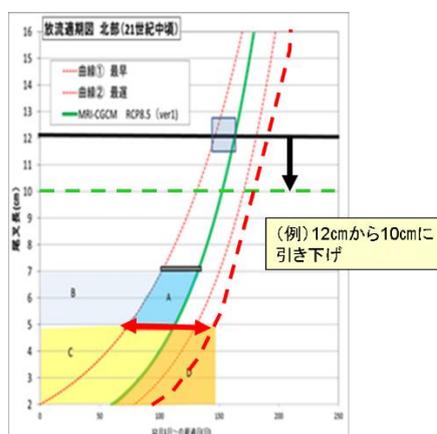


図 3-21 放流適期の尾又長設定引き下げのイメージ図

■ 放流適サイズに達するまでに必要な種苗飼育期間の短縮（加温飼育等）

高水温化の影響による、放流適期の短縮に対する適応策である。放流適期が短縮すると、早期に卵を確保し、短期間に種苗を孵化・成長させ放流する必要が生じてくる。そこで、前期回帰群を優先的に利用することで、早期に卵を確保する対策が重要となる。また、県の試験場等において、飼育水温の調整（加温飼育）、低密度飼育、あるいは高カロリーの餌を開発する等、種苗を短期間に放流サイズまで成長させるための技術の導入について検討していくことも、適応策として有効であると思われる。イメージ図を図 3-22 に示す。

沿岸域の海水温が 5℃以下の場合、降下後のサケ幼稚魚が低水温の影響を受けてしまう可能性が懸念される。ただし、宮城県では沿岸域の海水温が 5℃以下となることは無いため、早期に放流しても悪影響を受けないと思われる。また、河川に遡上する前に漁獲した個体から採卵した卵を、種苗用に利用する技術が研究されており（適応オプションの沿岸漁獲のサケの利用（海産卵））、より早期に卵を確保できる可能性がある。なお、設備の増設等による新たなコスト負担や、労働力の確保等が難しいが課題である。

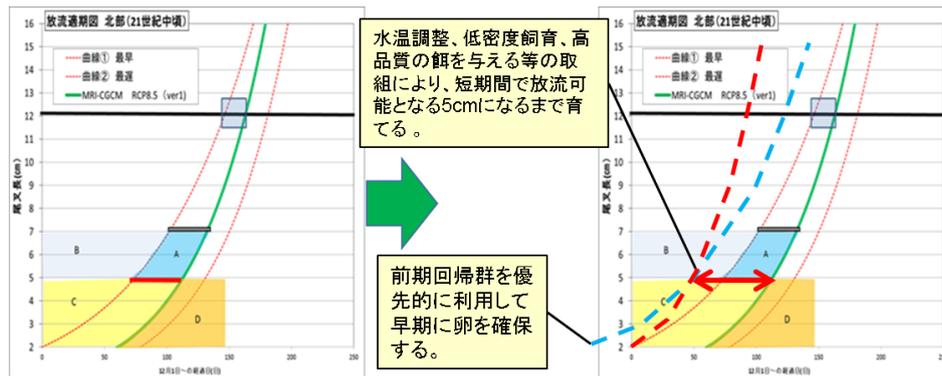


図 3-22 放流適期の短縮化イメージ図

■ 飼料や飼育環境改善による稚魚の健苗性向上

高水温化の影響による、放流適期の短縮に対する適応策である。高カロリーの餌を与えることにより、早く大きく育てるだけでなく、体力的に温度耐性がある優良種苗の生産も期待できる方法である。沿岸域で生活するサケ幼稚魚の、初期減耗を減少させる適応策である。ただし、どの程度までの高水温に対して適応できるかについては不明な点が多いため、効果の程度を中としている。

■ 高温耐性品種の活用

放流適期の短縮・消失による、回帰率の低下に対する適応策である。近年のサケ回帰率の低下を受けて、岩手県が研究に着手した段階であり、今後の実用化が期待される技術である。宮城県において導入を検討する場合には、県南の高水温域に回帰する親魚から得られる種苗を活用し、高温に強い種を作出していく方法を想定している。県南からの種苗移送や、品種改良、選抜育種を実施するためには、専門家の増員や新たな設備導入等が必要となるだけでなく、高温耐性品種の作出には長い試行期間が必要となることから、新たな労力やコストが必要となることや、人為選抜による遺伝的劣化（北田,2018）が課題として挙げられる。また、21世紀末に予想されている水温に耐えられる品種を作出できるか、あるいは食品としての高品質を維持できるか等、不明な点も多い。

■ 沿岸漁獲のサケの利用（海産卵）

岩手県等で実際に導入され始めている技術である（参照：2019年12月16日水産経済新聞「放流用卵、市場で調達」）。海域において漁獲した、河川遡上する前のサケから、種苗生産のための卵を確保する方法である。「放流適サイズに達するまでに必要な種苗飼育期間の短縮（加温飼育等）」にも関係する技術である。ただし、海域で漁獲したサケの卵を利用するためには、高度な技術が必要となるため、効率よく必要量の卵を確保するためには、更なる技術開発が必要である。

- 野生魚の活用（※野生魚の定義：自然産卵で生まれた個体で、両親が野生魚か放流魚かは問わない。）

放流適期の短縮・消失による、回帰率の低下に対する適応策である。大熊ら（2016）は、シミュレーション分析の結果から、自然産卵が可能な場所に分散放流を行い、そこに母川回帰する自然産卵魚を保全すれば、人工種苗だけの場合よりも約 2 倍の回帰効果が期待されると報告している。また、自然産卵で生まれた個体は、河川環境における自然選択を受けているため、人工種苗よりも自然環境に適していると期待される。

ただし、野生魚を活用した結果、環境収容力を超える数のサケが遡上した場合、あるいはサケが遡上していない河川にサケが遡上した場合には、遡上河川の生態系に悪影響が及ぶ可能性がある。また、産卵後に死亡した多数のサケが腐敗し、悪臭問題が発生することも懸念材料の一つである。そのため、まずは野生魚の実態把握を行い、人工種苗魚と野生魚を適切に管理する方法を検討する必要がある。ウライ（遡上するサケを捕獲する柵。ヤナ）を超えて、漁獲されずに遡上する個体が自然産卵している場合等、野生魚を有効に利用できる河川等において、サケの繁殖環境を整備するような方法が望ましいと思われる。

- 代替種の検討

サケ以外の水産種を利用する適応策である。ただし、サケは北日本において、古くから様々な仕方で利用されており、地元では最も重要な水産物である。したがって、サケと同様の価値が期待できる代替種を探すことは、非常に困難であると思われる。漁業者、加工業者、流通業者、販売業者等、幅広い関係者への影響を考慮すると、期待される効果の程度は低とするのが妥当だと判断した。なお、必要経費についての支援や、代替種の検討、及び導入試験等を行う実施主体を行政が担い、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。

引用文献一覧

- ・ 入江 隆彦 (1990) 海洋生活初期のサケ稚魚の回遊に関する生態学的研究, 西海区水産研究所
- ・ 大熊一正・長谷川巧・佐藤俊平・岸大弼・市村正樹・飯田真也・森田健太郎(2016)「野生魚を活用した持続可能なさけます漁業と増殖事業」,SALMON 情報,10,30-37.
- ・ 北田 修一 (2018) 水産増養殖の遺伝的影響と野生集団の持続,日本水産学会誌,84,779
- ・ 斎藤 寿彦・福若 雅章(2018)北太平洋におけるサケ属魚類の資源動態,海洋と生物, 237, 140, 4, 319-328.
- ・ 関二郎 (2013) さけます類の人工ふ化放流に関する技術小史(放流編), Journal of Fisheries Technology, 6, 69-82.
- ・ 野川秀樹 (1992) 本州日本海沿岸におけるサケ増殖と資源動態, 魚と卵, 161, 29-43.
- ・ 宮城県 (1984) さけ・ます資源増大対策調査報告書 昭和 54~58 年度総括, 74.
- ・ 宮城県 (1984) 昭和 57 年度さけ・ます資源増大対策調査報告書, 80.
- ・ 宮腰靖之・永田光博・齋藤誠一 (2007) 衛星リモートセンシングにより観測したオホーツク海東部地区の春季の沿岸水温とサケの回帰率との関係, 北海道水産孵化場研報, 61, 1-10.
- ・ Saito, T. 2002, Fluctuations in return rates of hatchery-reared chum salmon (*Oncorhynchus keta*) in relation to coastal ocean environment in Japan, NPAFC Doc, 614, 20.
- ・ Usui N,T Wakamatsu,Y Tanaka,N Hirose,T Toyoda1,S Nishikawa,Y Fujii1,Y Takatsuki,H Igarashi,H Nishikawa,Y Ishikawa,T Kuragano, M Kamachi (2016) Four-dimensional Variational Ocean Reanalysis: A 30-year high-resolution dataset in the western North Pacific (FORA-WNP30). J. Oceanogr., 73, 205-233.
- ・ Wagawa, T.,T. Tamate, H. Kuroda, S. Ito, S. Kakehi, T. Yamanome and T. Kodama(2016) Relationship between coastal water properties and adult return of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) along the Sanriku coast, Japan Fisheries Oceanography, 25, 598-609.