



Title	海洋環境変動下における岩手県サケの資源と生態に関する研究
Author(s)	佐々木, 系
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(環境科学)
Dissertation Number	甲第15723号
Issue Date	2024-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k15723
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/94532
Type	doctoral thesis
File Information	Kei_Sasaki.pdf



博士論文

海洋環境変動下における岩手県サケの

資源と生態に関する研究

(Studies on stocks and ecology of chum salmon *Oncorhynchus keta* under
the marine environmental change in Iwate Prefecture, Japan)

北海道大学大学院環境科学院

佐々木 系

令和5年度

目次

序論

1	サケの分布と資源量の推移.....	1
2	岩手県のサケ資源の特徴.....	2
3	本研究の目的	6

第1章 岩手県のサケ資源に影響を及ぼす要因の探索

1-1	緒言	13
1-2	材料・方法	15
1-2-1	レジームシフトの検出	15
1-2-2	サケ回帰率を説明する要因の解析	15
1-3	結果	17
1-4	考察	18

第2章 異なる沿岸環境条件下でのサケ稚魚の成長率と親魚回帰率の変化

2-1	緒言	27
2-2	材料・方法	28
2-2-1	耳石温度標識魚の放流と再捕	28
2-2-2	標識稚魚の成長速度分析	30
2-2-3	標識親魚の回帰率の推定	31
2-3	結果	33
2-3-1	標識稚魚の成長速度と親魚の回帰率	33
2-3-2	春季の海面水温と河川回帰率	34
2-4	考察	34

第3章 サバ類による降海直後のサケ幼稚魚の捕食

3-1	緒言	49
-----	----------	----

3-2 材料・方法	50
3-2-1 胃内容物試料の採取	50
3-2-2 DNA 分析による胃内容物の種特定	51
3-2-3 胃内容物中のサケ尾叉長の推定および耳石温度標識有無の確認	55
3-3 結果	56
3-3-1 釣獲されたサバ類の特性	56
3-3-2 サバ類の食性とサケ幼稚魚の有無	56
3-4 考察	58
 第4章 サケ非放流河川における野生サケ遡上数の変動	
4-1 緒言	71
4-2 材料・方法	72
4-2-1 河川の踏査調査	72
4-2-2 親魚遡上数および産卵床数の推定	73
4-3 結果	74
4-3-1 親魚遡上数の年変動	74
4-3-2 産卵床数と産卵場所	75
4-4 考察	76
 第5章 総合考察	
5-1 環境変動下における岩手県のサケの現状	89
5-2 持続的な資源利用へむけた検討	90
5-2-1 放流方法の検討	91
5-2-2 野生サケの保全に向けた検討	93
謝辞	99
文献	102

序論

1 サケの分布と資源量の推移

サケ *Oncorhynchus keta* はサケ科サケ属に分類され、サケ属魚類の中で最も分布範囲が広く、その分布の北限は、アジア側ではロシア北極海沿岸のレナ川、北米大陸側ではカナダ北極圏のマッケンジー川に及び、日本系サケは分布の南限域にあたる (Neave et al. 1976; Salo 1991)。近年は、アラスカ北極圏においてサケの再生産が確認されている (Dunmall et al. 2022)。

北太平洋全体のサケ属魚類の商業漁獲量は、1970 年代後半から増加し、近年では観測史上最も高い水準を維持している (Fig. 1)。サケに限ると、サケ属魚類全体の商業漁獲量と似た年変動パターンを示し、1990 年代後半以降は 27-40 万トンの範囲で変動していたが、最近年の 2019 年は約 23 万トン、2020 年、2021 年は漁獲量が約 17 万トンに減少した (Fig. 1)。サケの商業漁獲量を地域別にみるとアジア側では日本沿岸の漁獲量は 1980 年代に急速に増加した (Fig. 2)。その後、1990 年代から 2000 年代にピークを迎え、近年では減少傾向にある。一方、それとは対照的にロシアでは 2000 年代後半から漁獲量が増えている。北米大陸側においても 1990 年代以降、アラスカ州の漁獲量が増加している一方、カナダの漁獲量は減少傾向にある (Fig. 2)。このように北太平洋全体で見た場合、サケの漁獲の中心は北方に移動しつつあり、南側の地域では減少傾向にある。

日本国内においては、2010 年以降、北海道の根室海区およびえりも以東海区から本州太平洋地域の漁獲量の減少が著しい (斎藤・福若 2018)。さらに北海道太平洋側と本州太平洋側では、本州太平洋側の減少

幅が大きくなっている（水産研究・教育機構 令和 3（2021）年さけます来遊状況（第 7 報：2/28 現在）：http://salmon.fra.affrc.go.jp/zousyoku/salmon/R3comment_1428_river.pdf）。北海道および本州太平洋側の主要なサケ漁獲県について、サケの単純回帰率を比較すると、2020 年以降、北海道がやや回復傾向を示すのに対し、本州太平洋側の主要なサケ漁獲県では低下している（Fig. 3）。ここで、単純回帰率とは、サケが 4 年魚（4 歳魚）で最も多く回帰することから、簡易的に 4 年前の年級（生まれ年）の放流数に対する来遊数（沿岸漁獲数および河川捕獲数を合算したもの）の割合を示したものである（水産研究・教育機構 主な道県におけるサケの放流数と来遊数及び回帰率の推移：http://salmon.fra.affrc.go.jp/zousyoku/fri_salmon_dept/ok_relret.html）。なお、一般にサケは秋に採卵され、翌年春に稚魚で放流されることから、年級（生まれ年）+1 年が放流年となる。

以上のように、ここ数年は北太平洋全体のサケ属魚類の商業漁獲量が歴史的な高水準にある中、サケの商業漁獲量は減少傾向にあり、世界的にみると南側の地域で減少しており、日本国内でも南側の地域ほど減少が顕著となっている。

2 岩手県のサケ資源の特徴

日本系サケの遺伝的個体群構造は、北海道ではオホーツク、北海道日本海、根室、えりも以東、えりも以西の 5 地域、本州では本州太平洋、本州日本海の 2 地域の合計 7 地域個体群に分かれ（佐藤・浦和 2015）、河川そ上盛期、4 年魚の尾叉長、成熟年齢、4 年魚の繁殖形質などの生物学的特性も 7 地域間で異なることが知られている（斎藤ほか 2015）。岩手県は本州太平洋の三陸地域に位置し、サケ分布の南限域に

近く、日本国内では北海道に次いで漁獲量が多かった。しかし、2021年以降は北海道、青森県に次いで3番目に多い漁獲量となっている。岩手県では1896年に初めて人工ふ化放流が閉伊川で開始され、1905年に津軽石川にふ化場が開設、人工ふ化放流事業が開始された。その後1970年代後半に多数のふ化場が整備され、稚魚の放流数は1970年の4600万尾から1980年代の約4億尾に至るまで約9倍に増加した。その後は2010年まで約4億尾の放流数で推移したが、2011年の東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）直後の2012年は放流数が2.9億尾に低下した（清水 2015）。その後は3-4億尾を維持するも、2019年以降は採卵用の親魚の不足により、再び放流数が2億尾前後に減少している（水産研究・教育機構 主な道県におけるサケの放流数と来遊数及び回帰率の推移：http://salmon.fra.affrc.go.jp/zousyoku/fri_salmon_dept/ok_relret.html）。岩手県では、ふ化場で生産された稚魚は、2月から5月にかけて尾叉長30-50 mmの大きさと自然河川に放流される。岩手県のサケの稚魚は放流後、河川で短期間生活した後、春季をリアス式の内湾で過ごす（関 1978; Minegishi et al. 2019）。初夏までに日本沿岸を離れた幼魚はオホーツク海南部に移動し、晩秋まで滞在した後、冬季には北西太平洋へ南下移動し、表面海水温が4-8℃の海域で初回の越冬を行う（浦和 2000）。その後は夏季にベーリング海、冬季にアラスカ湾という南北移動を繰り返し、海洋生活が3-5年に達し成熟した個体から、夏季にベーリング海を離脱し、日本沿岸の母川へと移動する（浦和 2000）。

前述の通り、岩手県では震災によりサケの放流数は一時的に減少した後に、再び増加したが、回帰率はこれに追随せず低下し続けている。本州太平洋側の主要なサケ漁獲県の単純回帰率をみると1990年代後

半以降は、岩手県の低下が顕著となっている（Fig. 3）。

日本のサケ漁獲量を資源指標としてその変動を長期的に見た場合、太平洋十年規模振動（PDO）のレジームシフトと対応して数十年スケールで増減を繰り返したという指摘がある（Kaeriyama et al. 2009）。また、日本のサケ漁獲量は、例えば 1980 年代以降の沖合漁業の禁止に伴う沿岸漁獲量の増加など人間活動の歴史ともよく対応することが指摘されている（森田 2016）。したがって、日本のサケ資源量の変動は生物学的な要因だけでは決まらないと考えられている（森田 2020）。一方で、海洋環境との関係を指摘した報告が多い。一般に、太平洋サケの死亡率は降海初期の沿岸滞泳期および海洋での初回越冬時に決定的に高いことが知られている（Healey 1982; Beamish and Mahnken 2001; Wertheimer and Thrower 2007）。岩手県では、春季の沿岸域におけるサケ稚魚の分布密度が放流から 3 年後の 4 年魚の回帰数と正の相関関係にあることが知られている（岩手県水産技術センター 2021）。このことは、沿岸滞泳期のサケ稚魚の死亡が最終的な資源豊度に影響を及ぼすことを示唆していると考えられている（川島ほか 2018）。このような背景から、岩手県を含む三陸地域のサケ回帰数の変動についてもサケ稚魚の沿岸滞泳期の海洋環境との関係を扱った先行研究が多い。Fig. 4 に、岩手県あるいは三陸地域のサケ回帰数と海洋環境との関係を扱った先行研究について、分析が行われた放流年（年級）とサケ単純回帰率を対応させて示した。岩手県のサケ単純回帰率は、1970 年代後半の放流群になると 1%前後から 3%台まで上昇し、以降は平均 3.5%という高い水準で推移し、1993 年放流群では過去最高の 5.5%を記録した（Fig. 4）。この間の 1977–1999 年放流群において、岩手県を含む本州太平洋のサケ回帰率は、稚魚の沿岸滞泳期における 5–13℃の沿岸表面海水温

の面積と正の相関関係があった一方で、放流時のサケ稚魚の体サイズとの相関関係は見られなかったとされている（Saito and Nagasawa 2009）。その後、1996-1997 年放流群になると、回帰率は 1.6%まで急激に低下した（Fig. 4）。帰山・秦（2015）は、このときの回帰率の低下は、1997/98 年のスーパー・エルニーニョに端を発する東部ベーリング海における円石藻による珪藻－オキアミ生態系の崩壊（Kruise 1998; Stabeno et al. 2001）に起因すると指摘している。その後、2007 年放流群まで 1.3-2.3%の低レベルで推移し、2008 年放流群において回帰率が 0.6%にまで急落した。さらに、その後は 2015 年放流群まで回帰率 0.6-1.3%で推移し、1%を下回るケースも散見されるようになった。そして、2016、2017 年放流群は回帰率がさらに 0.2%に低下、2018 年放流群では 0.04%と著しく低下した（Fig. 4）。斎藤・福若（2018）は、この間の 1990-2014 年放流群について分析を行い、3-5 月の沿岸域の表面海水温（SST）と本州太平洋側のサケ 4 年魚までの漁獲数には正の相関がみられたと報告している。一方、Wagawa et al. (2016) は、2001-2013 年放流群について、2008 年放流群以降、岩手県沿岸から沖合の 5-6 月の暖水比（暖水である津軽暖流水と黒潮水の頻度／冷水である親潮水と沿岸親潮水の頻度）が卓越したことで岩手県のサケ 4 年魚の回帰率の急激な低下に関連があるとしている。しかし、2016 年放流群以降の回帰率の急激な低下について扱われた研究はない。

以上のように、1990 年代から 2000 年代前半までの放流群では春季の海水温が高いほうが回帰率も高くなる傾向があるとされたが、2008 年放流群以降では、海水温の上昇が資源に負の作用をもたらすとの指摘に変化した。Kaeriyama (2022)は、地球温暖化は 1990 年代には日本のサケにプラスの影響を与えていたが、21 世紀初頭からはマイナスの

影響に転じたとしている。

温帯域の河川に生息するサケ科魚類などの冷水性魚類に対する温暖化の影響は、分布南限域の縁辺部に生息する個体群で最初に顕在化すると考えられている（例えば、北野 1995; Keleher and Rahel 1996）。本研究で扱う岩手県のサケを含む三陸地域のサケは、分布南限域の縁辺部に生息する個体群である。このため、海水温上昇などの地球温暖化の影響を最初に受けやすいものと考えられる (Kaeriyama 2022)。

3 本研究の目的

2021 年 8 月公表の IPCC 第 6 次評価第 1 次作業報告書によれば、温暖化の進行はほぼ確実であり、人間活動による影響によるものであることは「疑う余地がない」とされた (IPCC: AR6 Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>)。Kuroda et al. (2020) は、2000 年以降、日本周辺の海面水温について、従来では関連性のあった PDO では全く説明のできない変動を示し、サケを含む水産資源の変動に潜在的な影響を与えた可能性があるとして、2000 年以降の日本周辺での海面水温ならびにサケを含む水産資源の状態を「慣例的ではない」という意味から “Unconventional Regime” と呼んだ。そして、地球温暖化の進行にともない、過去に経験したことのないような Unconventional Regime が今後出現する可能性を指摘している。このことは、過去の海洋環境変動と資源変動の関係が将来の個体群動態を予測するうえで信頼できる指標ではなくなっていることを意味する (Kuroda et al. 2020)。

分布南限域の岩手県のサケは、漁業資源としての価値のみならず、文化的な価値をもち、教育資源や観光資源となる潜在性を持つ (峰岸・

青山 2019)。岩手県には人工ふ化放流により造成されたサケの他に自然産卵を行う野生サケが存在することが確認されている (Aoyama 2017, 玉手ほか 2019, 峰岸・青山 2019)。自然産卵を行う野生サケ類は遺伝的な資源としての価値をもつ (佐藤・森田 2019) のみならず, 産卵回帰し自然繁殖することにより, 海洋からの栄養塩を陸域生態系へと運ぶ機能を担っている (帰山 2005; 柳井ほか 2006; Koshino et al. 2013)。温暖化は人類が招いたことであるならば, 我々にはこのような重要な資源を安易に消失させない責務があろう。

現在のふ化放流技術の基本となる部分は海洋環境が好適でサケの資源量が高水準であった時期に確立されたものである。海洋環境が変化し, 資源が激減する現在, サケ資源管理の在り方を再考する必要がある。そのためには, 先ず現在の海洋環境変動に対するサケ資源の応答パターンとその要因を明らかにし, 生残に不適な部分を回避するための対応を検討するアプローチが必要である。また, 岩手県の野生サケ資源も産卵環境を保全するなどの何らかの手立てが必要と思われるが, 現在の資源状態や産卵生態に関する基礎的な情報が少ない。

本研究では, サケをとりまく海洋環境が変動する中において, その影響を最初に受けやすいと考えられる分布南限域の岩手県のサケを対象に, サケ稚魚の降海直後の生活ステージであるリアス式海岸の湾内での沿岸滞泳期に注目して生残に影響を与える要因を解明することを目標にした。加えて, 野生サケの資源状態, および保全を行う際に必要な情報となる産卵生態を明らかにすることを目的とした。Figure 4 に各章で対象とした放流年 (野生サケは降海年) の範囲を示す。第 1 章では, サケの放流条件や沿岸滞泳期の海洋環境について親潮の挙動に注目し, 近年の岩手県のサケ資源豊度に影響を与える環境要因の抽出

を行った。第 2 章では，降海直後の稚魚の成長速度が親魚の回帰率に与える影響および環境変動下でその影響がどのように変化するのかを明らかにした。同時に，放流方法の違いによる回帰率の変化について明らかにした。第 3 章では，沿岸海水温の上昇とともに多獲性の魚食性魚類であるサバ類成魚がサケ稚魚の沿岸滞泳期に来遊するようになったことから，サバ類による捕食の影響についても検討を加えた。第 4 章ではサケの自然産卵河川における野生サケ遡上数と産卵時期，産卵床の分布の変動を調べ，環境変動下における自然産卵個体群の現状を評価した。第 5 章では，第 1 章から第 4 章で得られた知見に基づいて，岩手県のサケの現状について整理し，サケ資源を持続的に利用するための方策について検討した。

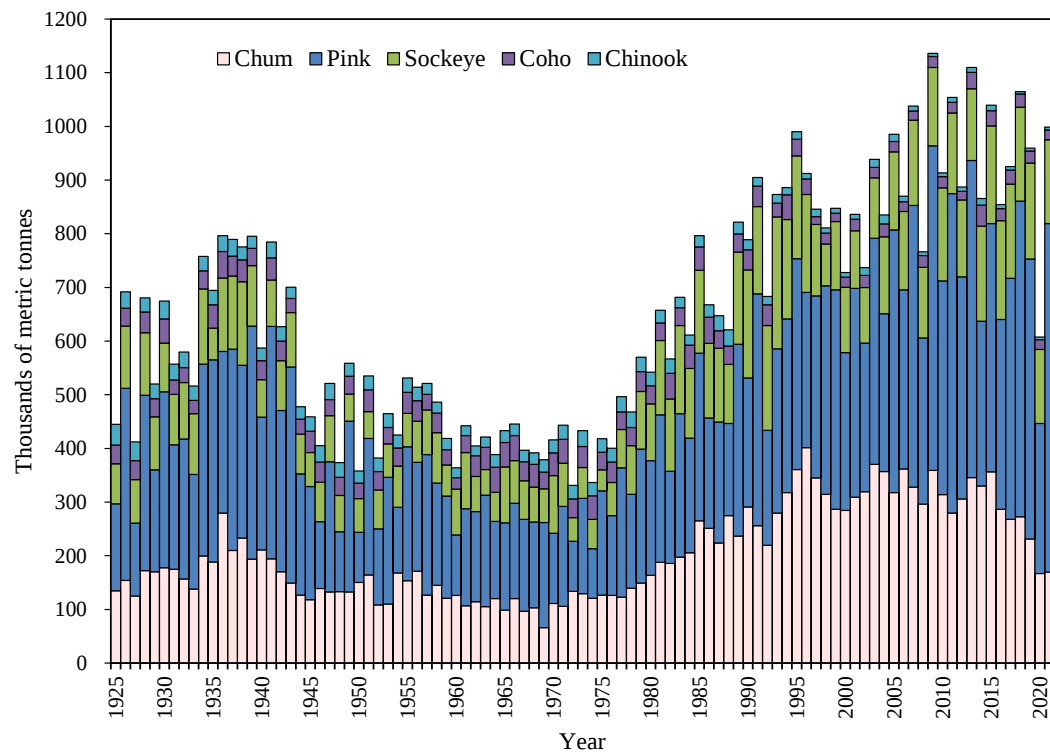


Fig. 1. Commercial catches of pink, chum, sockeye, coho, and chinook salmon in the North Pacific Ocean from 1925 to 2021.
Data Source: North Anadromous Fish Commission (NPAFC).

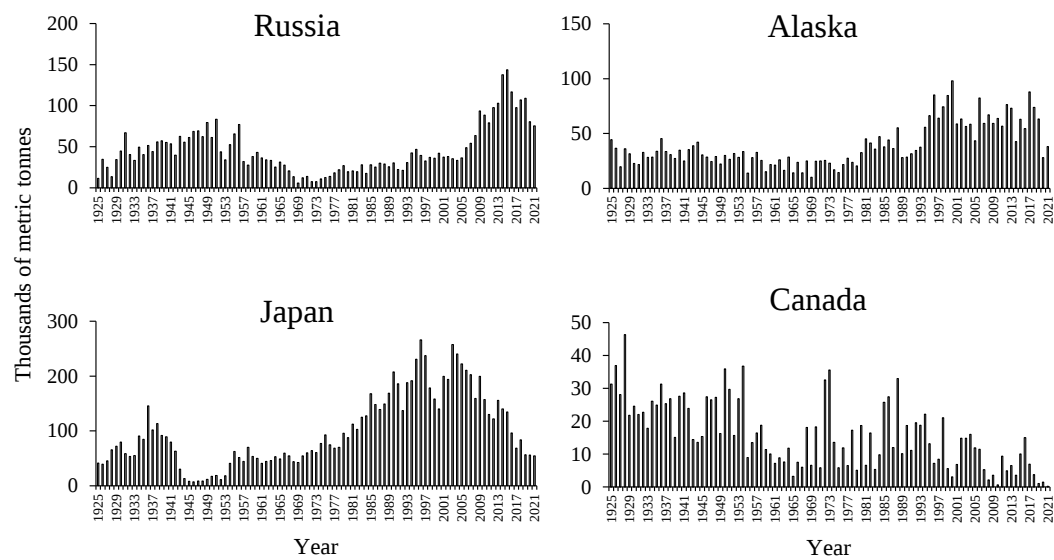


Fig. 2. Annual catch of chum salmon in Russia, Japan, Alaska, and Canada from 1925 to 2021.
Data Source: North Anadromous Fish Commission (NPAFC).

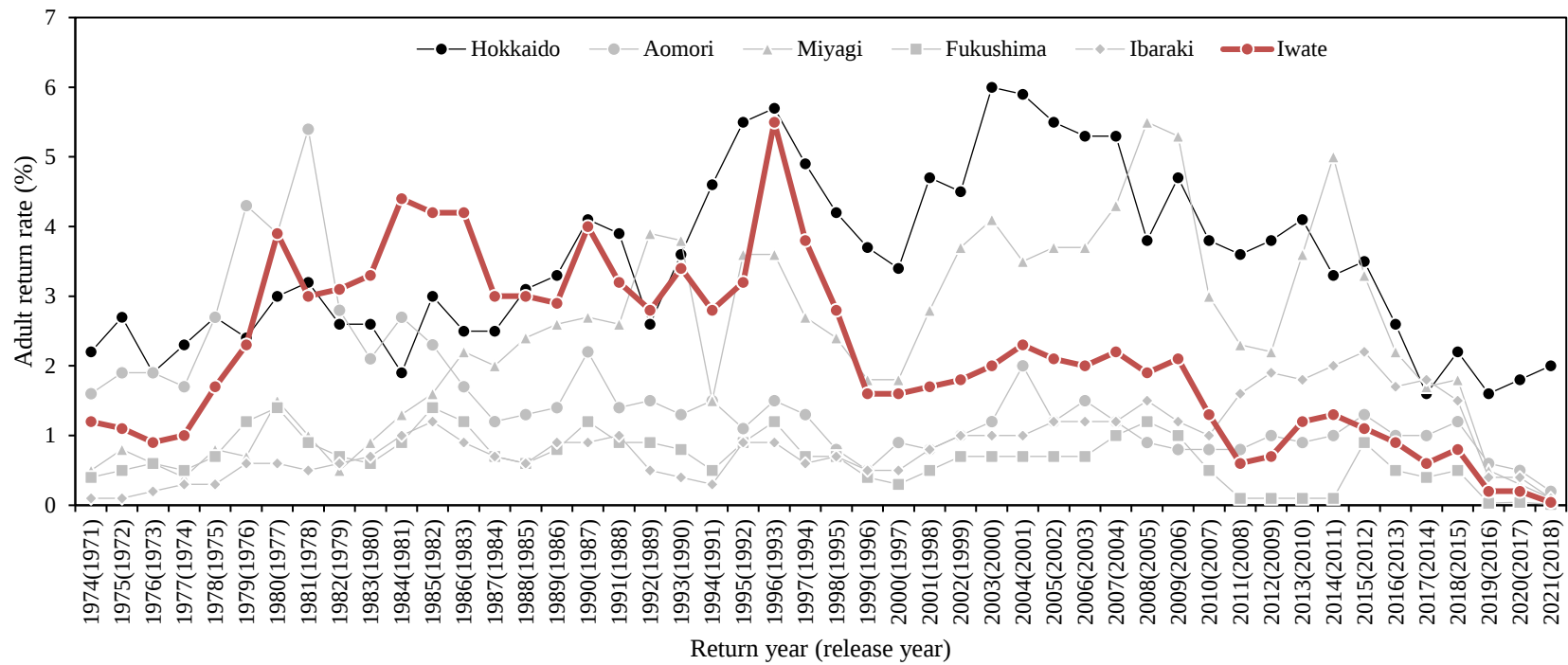


Fig. 3 Annual changes in simple return rates in Hokkaido, and major chum salmon fishing prefectures in the Pacific region of Honshu, Japan. Data Source: Japan Fisheries Research and Education Agency (FRA).

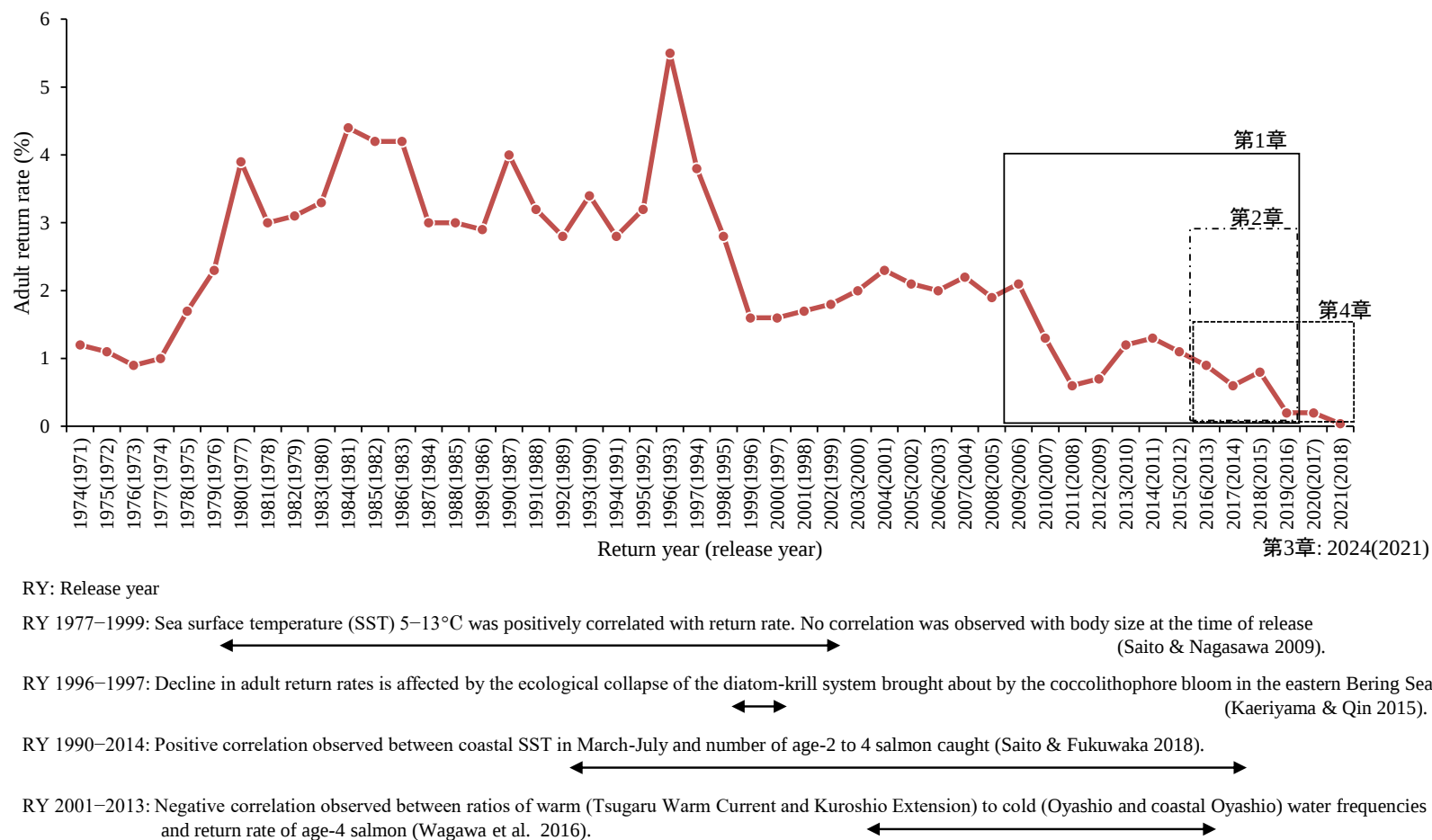


Fig. 4. Annual changes in simple return rates of chum salmon in Iwate Prefecture. Previous studies investigating the relationship between changes in salmon stocks and the marine environment in the Honshu Pacific region, including Iwate Prefecture, are indicated by arrows for each release year under analysis. The square boxes in the figure indicate the range of release and/or return years analyzed in each chapter of this study. Data Source: Japan Fisheries Research and Education Agency (FRA).

第 1 章 岩手県のサケ資源に影響を及ぼす要因の探索

1-1 緒言

岩手県を含む三陸沿岸域には複数の大規模な強い海流である親潮（寒流）、沿岸親潮（寒流）、津軽暖流に加え、規模は小さいものの黒潮続流（暖流）が流れ込む（Hanawa and Mitsudera 1987）。これら複数の寒流および暖流がぶつかり合うことに加え、各海流の勢力が時空間的に大きく変動することから、三陸沿岸域は水温の変動が大きい（Hanawa and Mitsudera 1987）。また、岩手県沿岸の河川は、流程の短い急峻な河川が多く（堺ほか 1991）、サケの放流は河口付近にあるふ化場から実施されることが多い（清水 2015）。このため、岩手県の河川から放流されたサケ稚魚が河口域に達する日数は、1 日以内（Hiyama et al. 1972; Iwata and Komatsu 1984）と考えられており、ふ化場から河口までの距離が数十 km に及ぶ北海道の 10 日程度（真山ほか 1983; 虎尾ほか 2010）と比べて河川内滞留期間が短く、放流後に短期間で降海する。序論で述べたように、岩手県沿岸域におけるサケ稚魚の分布密度は資源豊度と相関することが知られている（岩手県水産技術センター 2021）。これらのことから、岩手県のサケ資源において、その豊度はサケが放流されてから間もない海洋生活期初期の減耗の影響を大きく受ける可能性が高いと考えられている（川島ほか 2018）。

岩手県のサケ単純回帰率は 2016 年春季に放流された 2015 年級群（2019 年に主群の 4 年魚として回帰）以降、急激に低下している（序論 Fig. 4）。岩手県沿岸で実施されている表層トロール調査においてもサケ稚魚の分布密度が 2016 年に急激に低下して以降、2021 年まで低水準が続いている（岩手県水産技術センター 2021）。近年の岩手県沿岸の

海洋環境とサケ回帰率との関係を扱った最近の研究では、暖水比との関係（Wagawa et al. 2016）が報告されており、沿岸の海洋環境とサケの回帰率は関連性を示す。以上のことから、特に 2016 年以降のサケ沿岸帯泳期において、サケ稚魚の生残率低下に大きな影響を与えた海洋環境の存在が疑われた。Wagawa et al. (2016) の暖水比は、三陸沿岸の水質特性の大きな変動を捉えた有用な指標であるが、沿岸域における詳細な水温・塩分データが必要となる。また、分析に用いられたのは 2001 年から 2013 年までのデータであり、2016 年以降も関係性が継続しているのか不明である。このため、サケ回帰率変動の迅速かつ継続的な影響評価のためには、より簡便な海洋環境の指標が必要となる。岩手県のサケ稚魚にとって、春季の親潮の挙動は、沿岸滞泳期である春季の水温変化をもたらす（Wagawa et al. 2015）のみならず、餌料動物プランクトンの供給量に影響を与えるため、重要であると考えられている（Yamada et al. 2019）。しかし、これまでに岩手県のサケ回帰率の変動と親潮勢力との関連が直接調べられた例はない。

本研究では、簡便かつ 2016 年に特徴的な変化を示した親潮勢力の指標として、日本東方海域の春季（3-5 月）の平均親潮南限緯度（以下、平均親潮南限位置と呼ぶ）に注目した。親潮の南下の指標には南限緯度が用いられることが多く、気象庁は、北緯 43 度以南、東経 141-148 度の範囲の 100m 深水温が 5℃以下の領域を親潮域と定義し、その南限位置（緯度）と面積（占有面積）を親潮挙動の指標として監視しており、情報を公開している（気象庁：<https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaikyou/data/db/hakodate/knowledge/oyashio.html>）。

そこで、本章では、岩手県のサケ回帰数の変動に影響を与える環境要因を明らかにする目的で、親潮勢力の指標として平均親潮南限位置

とサケ回帰数の関係を調べた。

1-2 材料・方法

1-2-1 レジームシフトの検出

本研究では、平均親潮南限位置の変化の傾向を調べるためにレジームの検出を行い、検出された最近のレジームにおけるデータを対象に分析を行った。平均親潮南限位置データは、気象庁からダウンロードしたデータを用いた（気象庁：https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/b_2/oyashio_exp/oyashio_exp.html）。レジームシフトの検出には、アメリカ海洋大気庁（NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration）が公開するレジームシフト検出プログラム（<https://www.beringclimate.noaa.gov/regimes/index.html>）を用いた。このプログラムは自己相関を考慮して時系列を処理することが可能である（Rodionov 2006）。レジームシフト検出の際の条件は、5%の有意確率で、Cut-off Length は 15 年とし、Red noise estimation は IP4 とした。

親潮南限位置と親潮面積の関係を評価するため、検出されたレジームにおいて、平均親潮南限位置と日本東方海域の 3-5 月の平均親潮面積（以下、平均親潮面積と呼ぶ）データ（気象庁：https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/b_2/oyashio_exp/oyashio_exp.html）との相関を調べた。

1-2-2 サケ回帰率を説明する要因の解析

前項 1-2-1 の結果、1980-2019 年の平均親潮南限位置について、2006-2019 年にかけての直近年のレジームを検出した（Fig. 1-1）。そこ

で、当該レジーム年に放流された岩手県の子サケ 2006–2016 年放流群（2005–2015 年級群）を解析対象とした回帰数モデルを構築した。回帰数モデルは、一般化加法モデル（Generalized Additive Models; GAM）を用いた。子サケ回帰数データは時系列データであり、独立性を仮定した解析を用いることは適切ではない。GAM は説明変数と応答変数との間の非線形関係を記述する能力が高く（Guisan et al. 2002）、時系列の変化を平滑化して組み込むことができる（甲斐ほか 2021）。解析には統計解析ソフト R3.5.0（R Development Core Team 2018）を用いた。関数は mgcv パッケージ内の gam 関数と定め、平滑化パラメータとして、自由度上限値 k はオーバーフィッティングを避けるため 3 に設定した。応答変数は岩手県における子サケ 2005–2015 年級群の 4 年魚までの回帰数とした（岩手県 2023）。ただし、2011 年の東北地方太平洋地震（東日本大震災）の影響により、正確な放流数が不明である 2010 年級（小川・清水 2012）は解析から除外した。説明変数の候補として、解析対象の年級群が放流された年の 3–5 月の平均親潮南限位置、4 月の岩手県沿岸の月平均水温（岩手県水産技術センター 定置水温情報：<https://www.suigi.pref.iwate.jp/teichi>）、放流時期の加重平均（以下、平均放流時期、Fig. 1-2）および放流時の平均尾叉長（水産研究・教育機構（編）（2021）Salmon Database（放流 DB（本州子サケ）<https://www.fra.go.jp/shigen/salmon/sdb.html>, 2021 年 3 月 1 日）を用いた。また、放流数（岩手県 2023）をオフセット項として用いた。誤差構造をガンマ分布とし、リンク関数には logit を用い、以下のフルモデルを作成した。

$$\text{Catch} = \alpha + s(\text{Oyashio}) + s(\text{Time}) + s(\text{Temp4}) + s(\text{Size}) + \text{offset}(\log(\text{Release}))$$

(1-1)

ここで、Catch は各年級群における 4 年魚までの回帰数、 α は切片、s はスプライン関数、Oyashio は 3-5 月の平均親潮南限位置、Time は平均放流時期（1 月 1 日からの日数）、Temp4 は 4 月の岩手県沿岸の月平均水温、Size は放流時の平均尾叉長、Release は放流数である。(1-1) 式の説明変数を組み合わせて複数のモデルを作成した。これら複数のモデルの赤池情報量基準（AIC）をそれぞれ求め、AIC が最小となったモデルをベストモデル（第一位モデル）とした。モデル選択には R の MuMIn パッケージを使用した。

1-3 結果

平均親潮南限位置のレジームシフト解析の結果、1980-1986 年、1987-2005 年、2006-2019 年の 3 つのレジームが検出された。平均親潮南限位置の各レジームは年代を経るごとに北偏する傾向を示した（Fig. 1-1）。また、2006-2019 年のレジームでは親潮南限位置が岩手県の沿岸域内で変動する傾向が他のレジームよりも強かった（Fig. 1-1）。

平均親潮南限位置の各レジームにおける平均親潮南限位置と平均親潮面積の関係は、1980-1986 年レジームでは有意な負の相関がみられた（Pearson's test, $r = -0.885$ $p < 0.05$ ）。一方、1987-2005 年レジームでは有意な相関は見られなかった（Pearson's test, $r = -0.235$ $p = 0.333$ ）。その後、2006-2019 年レジームでは再び有意な負の相関がみられた（Pearson's test, $r = -0.850$ $p < 0.05$ ）（Fig. 1-3）。

GAM の結果、Table 1-1 に示す上位 5 モデルが得られた。AIC が最も

小さかった第一位モデルでは、平均親潮南限位置と平均放流時期が説明変数として選択された（Table 1-1）。第一位モデルのサケ回帰数に対する平均親潮南限位置および平均放流時期の効果はいずれも単峰形を示した（Fig. 1-4）。第一位モデルにおいて、平均親潮南限位置では北緯 40 度以北、平均放流時期が 4 月 8 日より早いとサケ回帰数に対する効果がマイナスとなった（Fig. 1-4）。

1-4 考察

本研究で検出された最近年のレジームである 2006–2019 年レジームでは、他のレジームに比べて平均親潮南限位置が北偏する傾向が顕著であった。また、2006–2019 年のレジームでは親潮南限位置が岩手県の沿岸域内で変動する傾向が他のレジームよりも強かった。さらに、2006–2019 年のレジームでは平均親潮南限位置と平均親潮面積との間に負の相関関係が見られるように変化していた（Fig. 1-3）。これらのことは近年の岩手県沿岸域がこれまでとは異なる海洋環境であることを示している。

本研究により、平均親潮南限位置が 2006–2016 年放流群の岩手県のサケ回帰数に負の影響を及ぼしている可能性が示された。本研究で検討したモデルのうち、ベストモデルとして採択したモデルは、平均親潮南限位置、平均放流時期を説明変数としたものであった。このモデルの結果によれば、平均親潮南限位置が北緯 40 度（岩手県普代村）より北偏すると回帰数に負の影響を与えることが示された。岩手県において北緯 40 度（岩手県普代村）よりも南側のサケ放流数は岩手県全体の放流数の 7–8 割を含む（岩手県 2023）。このため、平均親潮南限緯度

の影響で回帰数が減少に転じるポイントが岩手県普代村付近となっているものと推察された。また、平均親潮南限位置が北緯 41.3 度（青森県東村）と最も北偏した 2016 年は、回帰数に顕著な負の影響を及ぼしたことが示唆された。一方、サケ回帰数に対する平均親潮南限位置の効果は単峰形を示し、北緯 39.5 度をピークにそれよりも平均親潮南限位置が南偏すると回帰数への効果は再び低下した (Fig. 1-4)。このことは、親潮勢力が強すぎても回帰数に負の影響を与えることを示唆している。

岩手県沿岸域は黒潮続流の影響を受ける海域であるため、親潮勢力の強弱は黒潮続流の強弱に影響をうけると考えられる。Miyama et al (2021) は北海道・東北沖に広がる親潮域において 2010 年から 2016 年まで海洋熱波と呼ばれる水温上昇が毎年夏に発生していたことを報告しており、一連の海洋熱波は黒潮由来の暖水渦が親潮の南下を妨げたことによるものとしている。また、岩手県沿岸から沖合における暖水（津軽暖流水と黒潮水）の冷水（親潮水と沿岸親潮水）に対する相対勢力を示す指標である暖水比（暖水頻度／冷水頻度）が高いと岩手県のサケ回帰率が低下することが指摘されており、2007 年以降では暖水比が高い傾向にある（Wagawa et al. 2016）。これらのことは、暖水勢力が強いときには、親潮勢力は相対的に弱くなり、その結果、サケの回帰率が低下することを示唆している。したがって親潮勢力の指標である親潮南限位置は降海後のサケ稚魚の生残の良否を予測する簡便な指標として活用できると期待される。

本研究で構築したモデルでは、平均放流時期が 4 月 8 日（1 月 1 日から 97 日後）より早くなると回帰数に負の影響を与えることが示唆された (Fig. 1-4)。岩手県では 2014 年のサケ放流群以降、2 月（1 月 1 日

から 30–60 日後) に放流される割合が高くなる傾向を示しており、平均放流時期がやや早まっている (Fig. 1-2)。2 月の放流は、サケふ化場において飼育池の稚魚密度が過密になった場合に、間引き放流により適正な飼育密度に調整する措置 (調整放流) が行われた結果であると推察される。近年、三陸沿岸域において春季の水温が急上昇することが報告されており (Kuroda et al. 2020)、これを回避するため、放流時期を通常より早めるという対応策が想定される。放流時期を早めることは、飼育池の稚魚密度の過密状態を緩和することにもつながることから、より早い時期での放流が検討される可能性がある。しかし、通常の放流ピークである 4 月よりも早い 2 月の放流割合を増やすことには注意が必要であることをモデルの結果は示唆している。このことは実際に、岩手県織笠川において、放流時の沿岸域の水温の高低に関わらず、親魚の回帰数に対する 2 月放流の効果が一貫して低かったこととも整合的である (第 2 章参照)。

本研究では放流時の体サイズは上位二位までのモデルの説明変数には採択されなかった。これは、解析に用いた 2005–2015 年級群において、放流時の体サイズが大きく変化していなかったためだと考えられる。Saito and Nagasawa 2009 は 1976–1998 年級群においてサケ親魚の回帰数の変動と放流時の体サイズの関係について、北海道オホーツク海区及び根室海区では放流時の体サイズの増加は回帰数に正の効果をもたらしたが、岩手県を含む本州太平洋側では放流時の体サイズとの関係は検出されなかったと報告しており、これは生残率に対する放流時の体サイズ効果が地域によって異なるためであるとしている。岩手県全体で見た場合、現行の平均的な放流時の体サイズの範囲において、体サイズの増加は、回帰数の向上に十分な効果を与えていない可能性

がある。一方、河川毎といったより小さな地域スケールで見た場合、回帰数に対する放流時の体サイズの効果が異なる可能性が考えられる。したがって、放流時期や放流時の体サイズ、あるいはこれらの組み合わせといった基本的な項目について、春季の親潮の南限位置が北偏する傾向にある現在の環境下において、それぞれの効果を再確認する基礎的な試験の継続とデータの蓄積が個々の河川（ふ化場）レベルにおいて必要である。

Table 1-1. Comparison of the Akaike information criterion (AIC) across models. “+” indicates statistically significant explanatory variables. For each variable, “Oyashio” indicates the mean position of the southern limit of the Oyashio Current during March-May, “Size” indicates the mean fork length at the time of release of chum salmon fry/juveniles, “ Time” indicates the weighted average of the release period (i.e., number of days after January 1), “Temp4” indicates the mean monthly sea surface water temperature along the Iwate coast in April, and “Release” indicates the number of chum salmon released by the hatchery.

Model	Explanatory variable					Degree of freedom	log likelihood	AIC
	Oyashio	Size	Temp4	Time	Release			
1	+			+		5	-141.546	294.9
2	+			+	+	5	-141.977	295.6
3	+	+		+		6	-141.569	296.5
4	+		+	+		6	-141.437	296.6
5	+	+				5	-143.203	297.5

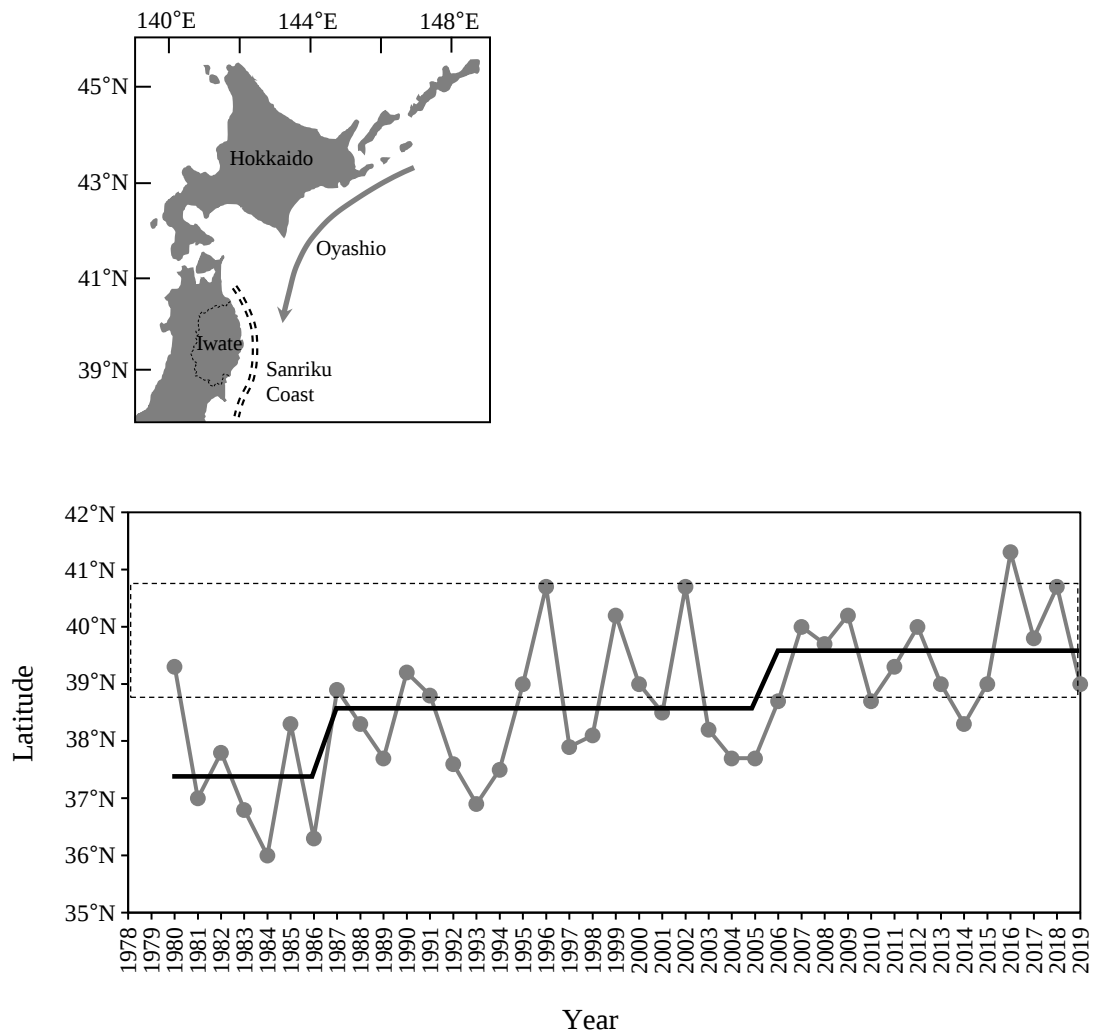


Fig. 1-1. Change in mean Oyashio southern limit latitude from March to May. Black bold line indicates the regimes detected in this study. Dashed square indicates the coastal area of Iwate Prefecture.

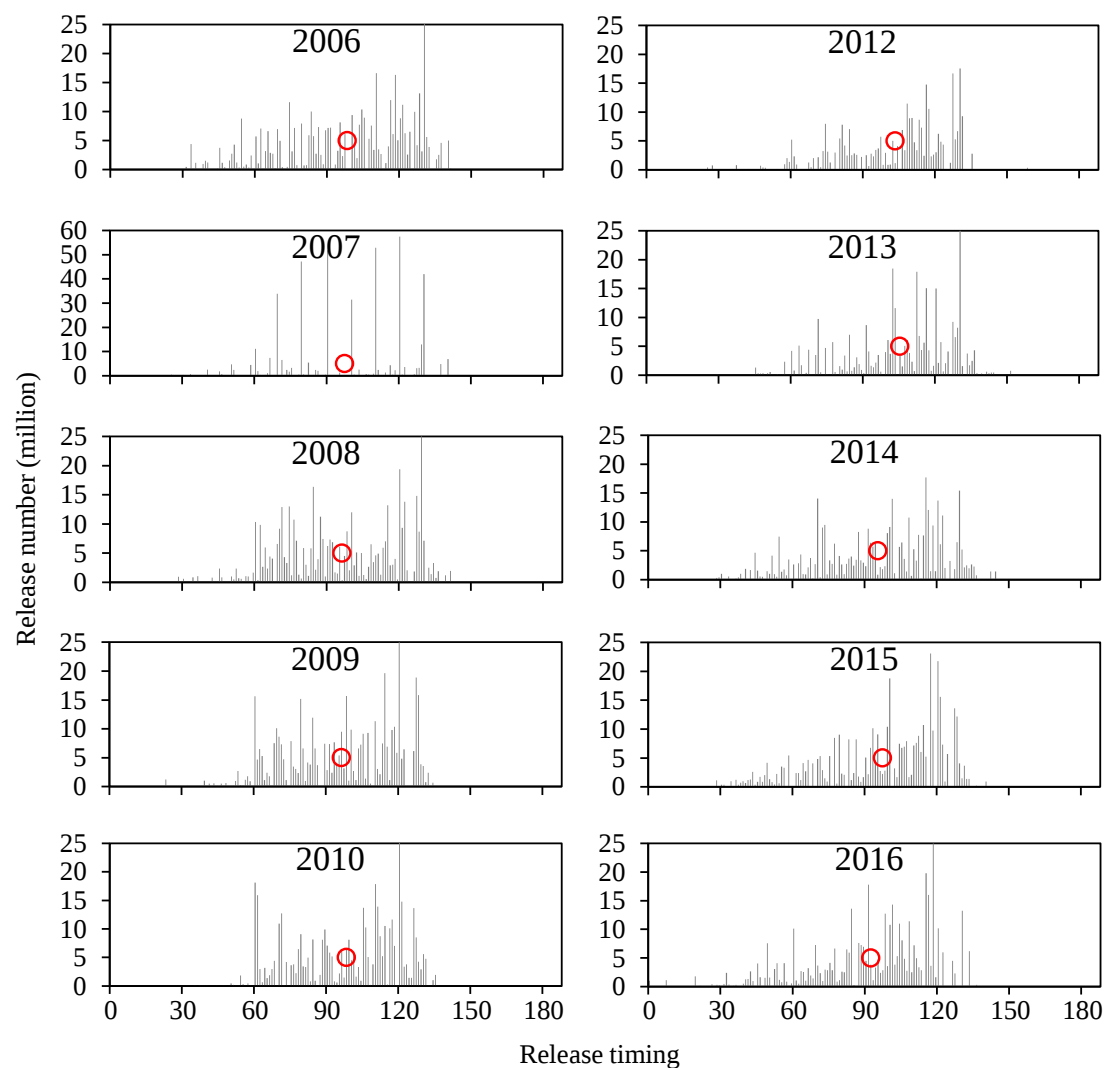


Fig. 1-2. Timing of hatchery release (bars) and the weighted average (red open circles) of chum salmon fry/juveniles by release year in Iwate Prefecture. Timing of release indicates the number of days since January 1 (X-axes).

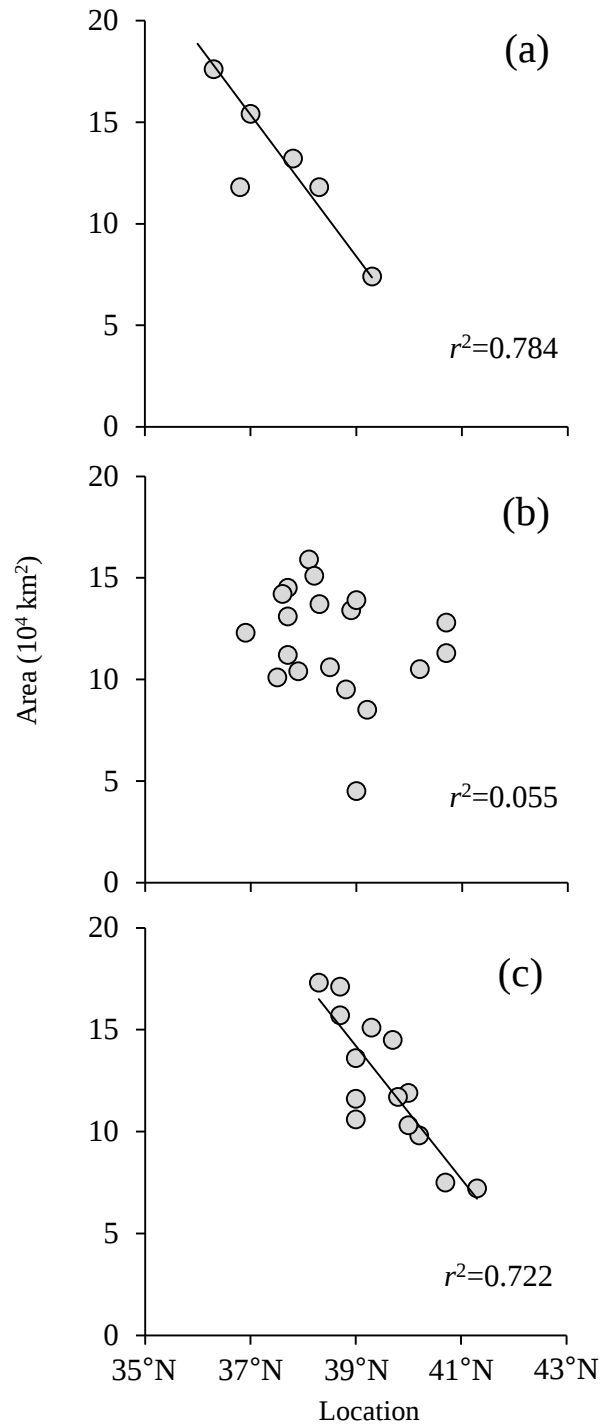


Fig. 1-3. Relationship between the location of the mean southern limit and the mean area of the Oyashio Current during the spring season (March to May) in the eastern seas of Japan (i.e., Oyashio, Kuroshio regions and Transitional domain). a: 1980–1986, b: 1987–2005, c: 2006–2019.

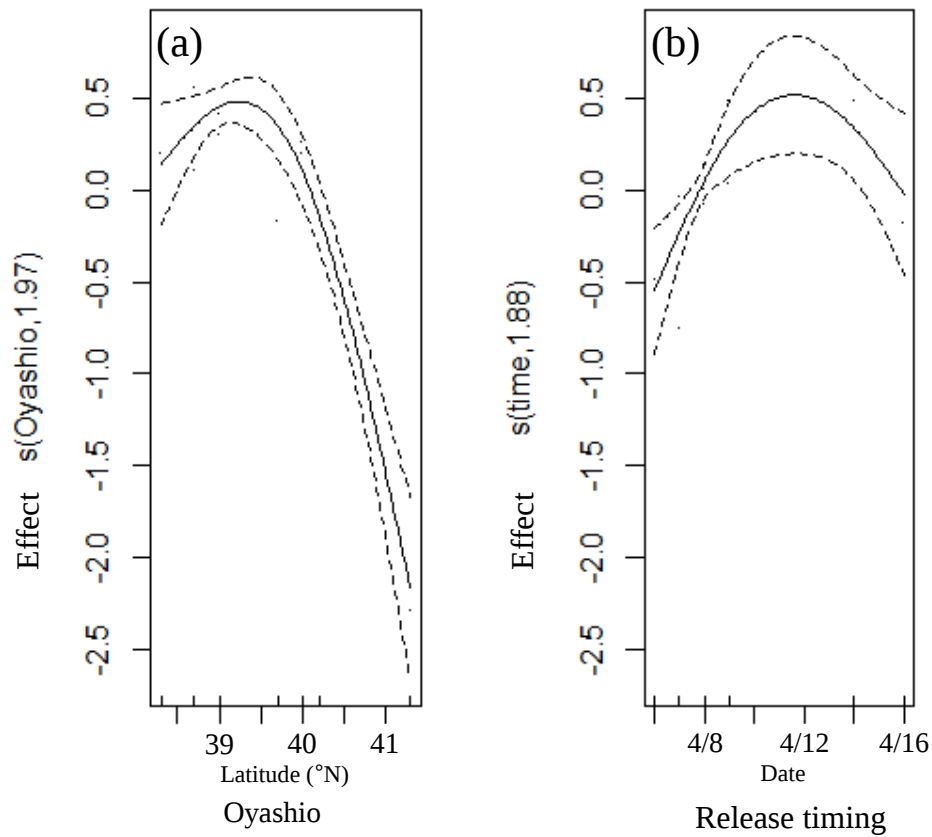


Fig. 1-4. Effects of southern limit latitude of Oyashio Current on adult return number (a), and effects of weighted average of salmon fry/juvenile release timing on adult return rate (b), during 2006–2016. Spline curves and their 95% confidence intervals (dashed curves) are derived from Generalized Additive Models (GAM) results. Estimated degrees of freedom are shown in parentheses on Y-axes.

第 2 章 異なる沿岸環境条件下でのサケ稚魚の成長率と

親魚回帰率の変化

2-1 緒言

日本では、北海道および三陸地域がサケの主要な産地となっている。岩手県は三陸地域においてサケの漁獲量が最も多い地域であり、年間 4 億尾前後のサケ稚魚がふ化場で生産され、このうち約 91%はふ化場がある河川に放流され、残りは海洋に設置された生け簀において数週間給餌飼育された後に放流される海中飼育が行われてきた。このような放流努力にもかかわらず、岩手県の総漁獲量は 2010 年代以降著しく減少している。2010 年代以降の減少要因として、岩手県沖でサケ幼稚魚の沿岸滞泳期間中の暖水塊の存在が生存に負の影響を与えている可能性が指摘されている (Wagawa et al. 2016)。また、近年、三陸沿岸の水温は上昇傾向にあることが報告されている (Kuroda et al. 2020)。加えて、第一章では 2006 年以降、親潮南限位置が北偏し、岩手県のサケ回帰数に負の影響を与えることが示唆された。したがって、現在の環境下における効果的な放流条件はこれまで推奨されてきた放流方法と異なっている可能性がある。沿岸環境の変化に対応するために、既存の放流方法を再考する必要がある。

一般に、サケ科魚類では生活史の初期に大規模な減耗が起これと考えられている (Bax 1983; Healey 1982)。岩手県沿岸域においても生活史初期に大規模な減耗が生じていることが示唆されている (川島ほか 2018)。また、サケ科魚類では幼稚魚の成長速度に依存した減耗があることが指摘されてきた (例えば, Beamish et al. 2004; Moss et al. 2005; Peyronnet et al. 2007; Tomaro et al. 2012)。さらに、幼稚魚の成長速度依

存の減耗は、日本のサケにも存在すると考えられている (Fukuwaka and Suzuki 2002, Honda et al. 2017, Honda et al. 2021)。岩手県から放流されたサケ稚魚は沿岸域を北上し、北海道太平洋側沿岸を通過してオホーツク海へと向かう経路が考えられている (入江 1990)。岩手沿岸からおおよそ 400 km 北上した北海道太平洋側の昆布森で採捕された岩手県由来のサケ幼魚からは、海洋生活期初期に高成長を遂げた履歴を持つ個体のみしか観察されていない (Honda et al. 2017)。このことは岩手県由来の幼稚魚の成長速度依存の減耗が昆布森到達以前に生じていることを示唆している (Honda et al. 2017)。したがって、環境変動下において、サケ幼稚魚の初期の成長速度が生残に与える影響がどのように変化するかについて明らかにすることが重要である。

そこで、本章では降海直後のサケ幼稚魚の成長速度に注目し、成長速度と回帰率の関係が環境変動下でどのように異なるかを調べるとともに、異なる放流方法が回帰率に与える影響を調べた。

2-2 材料・方法

2-2-1 耳石温度標識魚の放流と再捕

1) 標識魚の放流

本研究では、成長速度の異なる群の回帰率を比較するため、2013 年から 2016 年にかけて岩手県山田湾 (Fig. 2-1) で放流された 10 群の耳石標識グループ (2012-2015 年級) を解析に用いた。これらの標識グループの放流試験は、ふ化放流魚の回帰率向上のために実施され、海中飼育の期間と河川放流のタイミングについて現行の方法を改良することに焦点を当てて実施された (Yatsuya et al. 2018)。放流試験群は、岩

手県において一般的な放流方法である 4 月に河川に放流する群(RR), および海中での飼育期間が 1 カ月間の海中飼育群 (4WNP) の 2 群を対照群として, 岩手県の放流適期とされる 3 月中旬–5 月上旬 (岩手県内水面水産技術センター 2009) よりも早い時期に放流した 2 月河川放流群 (RR-E), 海中での飼育期間を通常の 1/4 (1 週間) に短縮した 1 週間海中飼育群 (1WNP), 10%塩化ナトリウム添加餌料で飼育された塩餌給餌群 (RR-S) の 5 パターンを設定した (Table 2-1)。全ての河川放流群 (RR, RR-E, RR-S) は, 山田湾に流入する織笠川の河口から約 2 km 上流に位置する織笠ふ化場から直接放流し, 海中飼育群 (1WNP, 4WNP) は織笠川の河口から約 300 m 沖の地点に設置された生け簀 (Fig. 2-1) において 1WNP は 1 週間, 4WNP は 4 週間の給餌飼育の後に生簀の網を開放し海中へと放流した。

2) 幼稚魚の採捕

各標識グループの放流を行った 2013–2016 年に, 山田湾に設定した 14 箇所の定点で小型巻網 (長さ 60 m, 網丈 5 m, 網目 3–10 mm) およびタモ網 (口径 60 cm) を用いてサケ幼稚魚を採捕した (Fig. 2-1, Fig. 2-2)。2013 年と 2014 年は 4–5 月, 2 月放流を実施した 2015 年と 2016 年は 2–5 月において 7–10 日間隔で採捕を行った。採捕した幼稚魚は実験室に運び, 分析まで–20℃で保管した。解凍後, 標本の尾叉長を 0.1 mm 単位で測定し, 耳石を取り出した。左右一対の耳石のうち, 一方は耳石温度標識の確認による放流群の判別に, もう一方は日間成長速度を推定するために使用した。

3) 親魚の採捕

2012–2015 年級の標識グループが 3–5 年魚の主群として回帰する 2015–2020 年に、織笠川において親魚を採捕した。毎年の調査期間は親魚が河川を遡上する期間である 10 月上旬から 12 月下旬までとした。織笠川の河口から約 300 m 上流に位置する捕獲施設 (Fig. 2-1) において捕獲された親魚から 10 日間毎 (旬毎) に雌雄各 50 尾をランダムに抽出し、個体毎に耳石および鱗を採取した。採取した耳石を研磨し、耳石温度標識から各標識グループを特定した (Fig. 2-3)。採取した鱗から年齢を決定した。年齢の判定は、LaLanee and Safsten (1969) および伊藤・石田 (1998) に従った。

2-2-2 標識稚魚の成長速度分析

標識魚は湾内において放流後 1–43 日後に採捕された。採捕されたサケ稚魚の成長速度の分析は、各標識グループから降海後 1 週間以上の成長履歴を持つ個体を選定して実施した。耳石日周輪による稚魚の成長速度分析は Saito et al. (2007) の方法に従った。耳石温度標識により特定された各標識グループの耳石を研磨し、耳石中心部から耳石縁辺部までの耳石半径と海水移行チェックから耳石縁辺部までの日周輪数および輪紋間隔を耳石日輪計測システム (ARP/W version 6.39, ラトック社製) で計測した。耳石径を尾叉長に換算するために、サケ幼稚魚の耳石半径と尾叉長の関係を以下の式と仮定した。

$$FL = a \times OT^b \quad (2-1)$$

ここで、FL は尾叉長、OT は耳石半径、a および b はパラメータである。2-1 式で表される曲線が孵化時の (OT_h, FL_h) と沿岸での採捕時の

(OT_c, FL_c) の 2 点を通過するように表計算ソフトの MS-Excel ((株) マイクロソフト社) のアドインソフト Solver を用いて, FL_h および FL_c の観測値と予測値の残差平方和を最小化することにより a および b を個体ごとに推定した。本研究では全ての個体について, OT_h を $111.11 \mu m$, FL_h を $20.4 mm$ とした (Saito et al. 2009)。得られた個体ごとの 2-1 式に, 降海時に形成される海水移行チェックまでの耳石径, 各耳石輪紋までの耳石径を代入することで, それぞれ降海時の尾叉長 (FL_s), 降海から採捕までの日毎の尾叉長を算出した。海洋生活期初期のサケ稚魚の成長は直線的であるため (Vega et al. 2017), 得られた日毎の尾叉長から, 以下の式により降海後の日間成長速度 (GR: mm/日) を算出した。

$$GR=(FL_c-FL_s)/t \quad (2-2)$$

ここで, t は降海から採捕までの日数を示す。

2-2-3 標識親魚の回帰率の推定

一般にサケを海中飼育した場合, 河川から放流した場合よりも河川遡上率が低下することが指摘されている (宮腰ほか 2016; Kasugai et al. 2018)。しかし, 本研究では海中飼育を織笠川の河川水の影響を受ける河口付近で実施したこと, 河川に遡上した親魚の捕獲を河口から近い場所で実施したことから, 海中飼育群の河川遡上率の低下は生じにくいと仮定し, 各標識グループの回帰率を河川回帰率で評価した。2011-2015 年級群の各標識グループの河川回帰率 $RR_{e,t}$ は Morita and Nakashima (2015) に従い, 以下の式により求めた。

$$RR_{e,t} = (\sum_i \sum_j PM_{e,i,j,t+i} CM_{j,t+i} + \sum_i \sum_j PF_{e,i,j,t+i} CF_{j,t+i}) FR_{e,t}^{-1} \quad (2-3)$$

ここで、 $PM_{e,i,j,t}$ および $PF_{e,i,j,t}$ は、年級群 t ($t=2012, 2013, 2014, 2015$) の年齢 i ($i=3,4,5$) と旬 j ($j=10$ 月上旬–12 月下旬) における各標識グループ e の雌、雄親魚の出現割合を示す。 $CM_{j,t}$ および $CF_{j,t}$ は年級群 t の旬 j に河川で捕獲された雌、雄親魚の河川捕獲数を示す。 $FR_{e,t}$ は年級群 t における各標識グループ e の稚魚放流数を示す。

稚魚の成長速度の違いが親魚の回帰率に与える影響を分析するため、一般化線形混合モデル (GLMM) を構築した。確率分布を二項分布、リンク関数に“logit”を用いた。応答変数を各標識グループの親魚の回帰率、説明変数を各標識グループの稚魚の成長速度とし、年級をランダム効果とした。作成したモデルの説明変数の有意性は、構築したモデルから説明変数を取り除いた際のモデルの逸脱度の変化を解析する尤度比検定により検定した。有意水準は 0.05 とした。統計解析には R. version 3.5.0 (www.r-project.org) を使用し、GLMM のパラメータ推定には lme4 パッケージ (Bates et al. 2014; Bates et al. 2015) の glmer 関数を用いた。

稚魚の降海時の海面水温と回帰率の関係を比較するため、2012–2015 年級の織笠川全体の河川回帰率について、各年級の 2–5 年魚までの河川捕獲数を同一年級の放流数で除することで算出し、サケ稚魚が山田湾に滞泳していたと考えられる 2–5 月の海面水温と比較した。山田湾の表面海水温データは、岩手県水産技術センターのデータベース (<http://www.suigi.pref.iwate.jp/teichi/>) から取得したデータを用いた。

2-3 結果

2-3-1 標識稚魚の成長速度と親魚の回帰率

各年級の標識稚魚の日間成長速度の範囲は、2012 年級が 0.59–0.77 mm/日、2013 年級が 0.37–0.46 mm/日、2014 年が 0.47–0.81mm/日、2015 年級が 0.48–0.85mm/日であった (Table 2-2)。同一年級内の標識グループ間の比較では、いずれの年級においても 4 月河川放流群 (RR) の日間成長速度が他の群よりも高かった。一方、2 月河川放流群 (RR-E) の日間成長速度は顕著に低かった。海中飼育群の比較では、1 週間海中飼育群 (1WNP) の方が 4 週間海中飼育群 (4WNP) よりも日間成長速度が高かった (Table 2-2)。

親魚の回帰率は、いずれの年級においても 4 月河川放流群 (RR) の回帰率が他の群よりも高かった。一方 2014 年級および 2015 年級の 2 月河川放流群 (RR-E) では (それぞれ 0.016%と 0.006%)、1 週間海中飼育群 (1WNP) (それぞれ 0.304%と 0.010%) よりも低い回帰率を示した。2012 年級および 2013 年級の 1 週間海中飼育群 (1WNP) の回帰率 (それぞれ 0.085%と 0.066%) は、4 週間海中飼育群 (4WNP) の回帰率 (それぞれ 0.055%と 0.036%) の 1.6 倍または 1.75 倍であり、いずれの年級でも 1 週間海中飼育群 (1WNP) の回帰率のほうが高かった。(Fig. 2-4)。

GLMM の結果、成長率と成魚回帰率の間には統計的に有意な関係が見られた ($df=1$, $\chi^2=5336$, $p<0.05$) (Table 2-3)。推定された各年級の曲線の傾きは、年級群間で異なっていた。2012–2013 年級において、親魚の回帰率は稚魚の成長速度の増加とともに大きくなる傾向であったが、2015 年級ではこの傾向は不明瞭であった (Fig. 2-5)。

2-3-2 春季の海面水温と河川回帰率

山田湾の2月1日から5月30日までの日平均表層水温は、2013年が5.3–9.9°C、2014年が3.5–11.5°C、2015年が3.3–14.8°C、2016年が7.3–14.4°Cとなり、2014年は水温が低く推移し、2016年は高く推移した年であった（Fig. 2-6a）。織笠川全体の親魚回帰率は、2012年級が0.06%、2013年級が0.02%、2014年級が0.10%、2015年級が0.01%であった。調査年のうち、水温が最も高く推移した2016年に放流された2015年級の回帰率が最も低く、水温が最も低く推移した2014年に放流された2013年級が2番目に低い回帰率を示した（Fig. 2-6b）。

2-4 考察

本研究において、湾内に生息するサケ幼稚魚の成長速度は、親魚の回帰率に正の効果を与えることがわかった（Fig. 2-5）。そして、わずかな数週間の湾内滞泳期間という小さな時空間スケールにおける成長速度が将来の資源サイズに影響を及ぼし得ることが明らかとなった。東屋ほか（2018）は、粒子モデルを用いたサケ稚魚回遊シミュレーションを用いて、岩手沿岸から放流された稚魚のうち、遊泳速度が高いほど北上移動先である北海道日高湾に到達できる個体数が増えることを指摘した。サケ稚魚の持続的遊泳速度は体サイズに依存する（Ohkuma 2007）。これらのことは、降海初期の湾内滞泳期間中の稚魚の成長速度が高いことが、体サイズの増大による高い遊泳速度の獲得を通じて生残に有利に働くことを示唆している。一方、GLMMモデルでは幼稚魚の成長率と親魚の回帰率の関係の傾きは年級間で大きく異なり、湾内

での成長が回帰率に与える影響は年によって大きく異なることが示された。特に調査年間で水温が最も高く推移した 2016 年に放流された 2015 年級では湾内での成長速度が回帰率に及ぼす効果が不明瞭であった。また、2015 年級の幼稚魚の成長速度は高かったにもかかわらず、親魚の回帰率は他の年級よりも著しく低かった (Fig. 2-5)。この理由として、2015 年級が放流された 2016 年は親潮弱勢であり、幼稚魚が湾外へと移動した後に餌が不足したため、回帰率が低下した可能性が考えられる。三陸沿岸の水温は、親潮勢力の大きさと関係しており、親潮勢力が強い（弱い）ほどこの地域の沿岸水温は低く（高く）なる傾向がある (Wagawa et al. 2015)。親潮によって運ばれる冷水性動物プランクトンである *Themisto japonica* や *Neocalanus plumchrus* は、三陸沿岸のサケ稚魚の主要な餌料生物であり、親潮流入量とこれらの動物プランクトン種のバイオマスには正の相関関係がある (Yamada et al. 2019)。そのため親潮の流入はサケ稚魚の餌の供給という観点から重要であると考えられる。Yamada et al. (2019) は、2016 年の春季の山田湾は、冷水性動物プランクトンのバイオマスが非常に少ない特徴的な年であったと報告している。また、Yamada et al. (2019) は本研究で採捕したサケ幼稚魚の胃内容物を調べており、2015 年級は 2012–2014 年級において優占したタンキヤク類の *Themisto japonica* やカイアシ類の *Neocalanus plumchrus* がほとんど確認されず、代わりに栄養価が低いとされる十脚類幼生が胃内容物に優占していたことを報告している。これらのことから、餌料の少なかった 2016 年の沿岸環境はサケ幼稚魚にとってエネルギー不足に陥りやすい状況だったと推察された。このため、2016 年に放流された稚魚は、降海直後の湾内で十脚類幼生を捕食し、一時的に成長できたものの、湾外へと移動した後に餌が不足する

環境にさらされ、成長に負の影響があった可能性がある。一方、親潮流入が強く、4月の平均水温が6℃以下だった2014年は、調査年では冷水性動物プランクトンが最も豊富であった（Yamada et al. 2019）。しかし、この年に放流された2013年級の幼稚魚の成長速度や親魚の回帰率は2012年級や2014年級に比べて低くなっていた。サケ幼稚魚では低水温時に成長が低下することが知られており（Torao 2022）、親潮が強勢だった2014年は、餌が豊富でも低水温のために幼稚魚の成長速度が低下したと考えられる。

このように、岩手県沿岸における親潮の流入による水温変動とサケ幼稚魚の餌供給量の間にはトレードオフの関係が存在し、サケ稚魚の成長速度は、この2つの要因の相互作用に影響されると考えられる。餌料制限下において、サケ科魚類の成長率のピークは低水温側にシフトすることが知られている（Brett et al. 1969）。このことは、餌料が十分にある状況下でも低水温であれば成長率は低下し、餌料制限下では、高水温であっても成長率が低下することを意味している。Iino et al. (2020) は岩手県のサケ稚魚について、高水温下（14℃）において、低餌料（体重の1%）で飼育されたサケ稚魚は、高餌料（体重の4%）で飼育された稚魚に比べて成長へのエネルギー配分が半分以下になったと報告している。これらのことから、親潮が強勢で通常よりも低水温だった2014年、および弱勢で通常よりも高水温だった2016年に放流されたサケ幼稚魚はいずれも湾内、あるいは湾外移出後の成長速度の低下を通じて回帰率が低下したと推察された。

本研究では、サケ幼稚魚の湾外移出後の成長速度は明らかにできなかった。このため、実際に2016年に放流されたサケ幼稚魚の成長が湾外出後に低下したかは不明である。また、成長速度の低下したサケ幼

稚魚が具体的にどの段階で、こういったプロセスで死亡しているかは依然として不明である。これらを明らかにするためには、湾外移出後のサケ幼稚魚が北海道の昆布森に到達するまでの北上移動途中の集団を捕らえ、どの段階で低成長の個体が集団から出現しなくなるのかを突き止めることが必要である。本研究では、耳石の日周輪から過去の一定期間における成長速度を推定したが、本手法では野外で採集した個体の成長をリアルタイムで調べるのが難しい。この問題を解決する方法として、サケ科魚類の血中に含まれるインスリン様成長因子（IGF-I）と IGF 結合タンパク（IGFBP-1b）を指標として用いることでサケ稚魚の成長良否を評価できることが報告されている（Kaneko et al. 2015; Kaneko et al. 2019）。今後、このような生理学的な指標を用いることで、北上移動途中のサケ幼稚魚の成長状態の段階的な変化をより詳細に評価できるものと期待される。

海中飼育は陸上の孵化施設での稚魚飼育を補完する技術として位置付けられており（関 2013）、陸上施設では目的とする放流体サイズまで飼育できない場合、海中に設置された生け簀において給餌を継続しながら稚魚を育成し、目的とする時期に放流できるよう調整する方法である。本研究ではいずれの年級群においても海中飼育群の方が 4 月河川放流群（RR）よりも成長速度と回帰率が低下する傾向が観察された。さらに飼育期間に注目すると 1 週間海中飼育群（1WNP）よりも 4 週間海中飼育群（4WNP）の成長速度が遅かった（Table 2-2）。この理由として湾内の海中飼育では、長期間の飼育により生け簀の網地に珪藻類の繁茂が生じ、このことが生け簀内の通水性の低下による溶存酸素の低下や老廃物の蓄積を通じて飼育稚魚の成長を抑制した可能性が考えられる。また、サケ稚魚の成長に伴う生け簀内の単位体積あたり

の収容密度の増加が成長抑制を助長している可能性が考えられる。実際に 1 カ月以上の海中飼育期間の途中で生簀網の目合いを大きなものに切り替えることにより、生け簀内通水性を確保した結果、目合いを切り替えない対照群と比べて稚魚の成長と遊泳力が向上することが山田湾において確認されている（長坂ほか 2023）。そのため、網の目合いの切り替えが困難な場合には、網に付着した珪藻類等の定期的なメンテナンスによる通水性の確保や成長に応じた生け簀内の密度増加を緩和する目的での間引き放流などを再考する必要がある。また、2 月河川放流群（RR-E）では、2014 年級および 2015 年級のいずれも河川への 4 月放流群と比べて成長速度が低く、回帰率も著しく低かった（Table 2-2, Fig. 2-4）。このことは、放流時の沿岸部の水温の高低に関わらず、2 月の放流の効果は一貫して低くかったことを示している。本調査を行った 2013–2016 年において、岩手県大船渡市沿岸に最初に親潮が接岸した時期は、親潮が接岸しなかった 2016 年を除き、2 月下旬頃～3 月中旬頃であった（片寄ほか 2020）。このため、早期放流試験を実施した 2015 年および 2016 年の 2 月中旬は親潮系動物プランクトンが出現していなかったと推察される。実際に 2 月の放流試験を実施した 2015 年および 2016 年において、山田湾では 2 月は親潮系動物プランクトンの密度が低かったことが観察されている（黒田ほか 2018）。このことから、餌量動物プランクトンが少なかったことが稚魚の成長速度の低下を生じさせ、回帰率の低下へとつながったと考えられた。2014 年級の塩餌給餌群（RR-S）の成長速度および回帰率は、2 月放流群よりも高かったが、通常餌を用いた 4 月河川放流群（RR）よりも低く、本研究結果からは回帰率向上への効果は期待できないと思われた。ただし、試験は 2014 年級のみの実施であるため、環境が変化した場合に

効果が異なるかは不明である。以上から，近年の沿岸環境下では，河川への 4 月の放流を基本とし，海中飼育を行う場合は，飼育期間を 4 週間ではなく 1 週間程度に短縮することが好ましいと考えられた。

Table 2-1. Number of chum salmon fry released and date of release.

Brood year	Otolith-marked fish group	Number of marked fish released (×1000)	Release date
2012	River release (RR)	496	16 April 2013
	1-week net-pen (1WNP)	498	17 April 2013
	4-week net-pen (4WNP)	497	1 May 2013
2013	River release (RR)	377	14 April 2014
	1-week net-pen (1WNP)	408	15 April 2014
	4week-net pen (4WNP)	344	15 April 2014
2014	River-release-early (RR-E)	400	6 February 2015
	River-release (RR)	400	13 April 2015
	River-release-sc* (RR-S)	400	13 April 2015
	1-week net-pen (1WNP)	400	13 April 2015
2015	River-release-early (RR-E)	336	6 February 2016
	River-release (RR)	255	13 April 2016
	1-week net-pen (1WNP)	276	13 April 2016

*River-release-sc was reared on a diet supplemented with 10% sodium chloride.

Table 2-2. Summary of recaptured marked-juvenile chum salmon in Yamada Bay.

Brood year	Otolith-marked fish group		Number of juveniles captured	Fork length at capture (mm)	Days from release to recapture	Number of individuals for growth analysis	Growth rate (mm day ⁻¹)
2012	River release	(RR)	226	60.0 ± 7.0	3–36	16	0.77 ± 0.09
	1-week net-pen	(1WNP)	203	59.2 ± 6.6	2–35	15	0.70 ± 0.08
	4-week net-pen	(4WNP)	328	65.1 ± 7.1	1–21	18	0.59 ± 0.05
2013	River release	(RR)	118	59.2 ± 3.9	3–43	29	0.46 ± 0.02
	1-week net-pen	(1WNP)	146	55.5 ± 4.6	2–35	31	0.45 ± 0.04
	4-week-net pen	(4WNP)	85	61.3 ± 4.9	2–9	23	0.37 ± 0.02
2014	River-release-early	(RR-E)	19	53.0 ± 3.6	1–23	12	0.47 ± 0.14
	River-release	(RR)	87	58.4 ± 5.7	2–28	24	0.81 ± 0.12
	River-release-sc	(RR-S)	94	58.2 ± 5.9	2–28	23	0.74 ± 0.07
	1-week net-pen	(1WNP)	108	57.9 ± 4.3	2–28	9	0.72 ± 0.09
2015	River-release-early	(RR-E)	42	53.3 ± 6.7	1–66	34	0.48 ± 0.11
	River-release	(RR)	96	55.3 ± 6.8	5–33	22	0.85 ± 0.14
	1-week net-pen	(1WNP)	211	55.7 ± 5.7	5–33	28	0.84 ± 0.13

Values of fork length and growth rate are mean ± standard deviation.

Table 2-3. Result of the generalized linear mixed model (binomial family and logit-link function) for the adult return rate of chum salmon.

Fixed effects				
Parameter	Coefficient	S. E.	Z-value	<i>P</i> -value
Intercept	-10.884	0.530	-20.537	<0.001
growth	5.992	1.792	3.344	<0.001

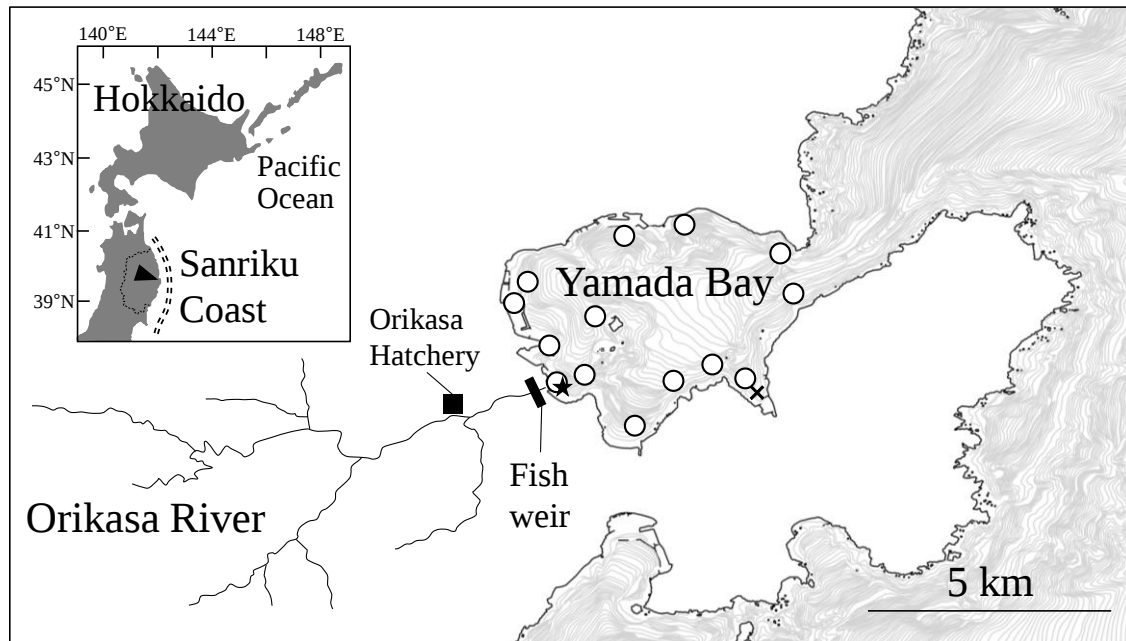


Fig. 2-1. Location of Yamada Bay (►) on the Sanriku coast (inset) and locations of the Orikasa Hatchery on the Orikasa River, net-pen sites (★), juvenile *Oncorhynchus keta* sampling sites (○), and surface water temperature observation site (×) .



Fig. 2-2. Collecting juvenile chum salmon with a purse seine net (a) and captured juveniles (b).
Scale bar: 5 cm.



Fig. 2-3. Adult chum salmon collected at a fish weir on the Orikasa River (a), and a representative example of an otolith showing thermal marks indicating the test groups (b; between the white arrows). Scale bar: 25 μm .

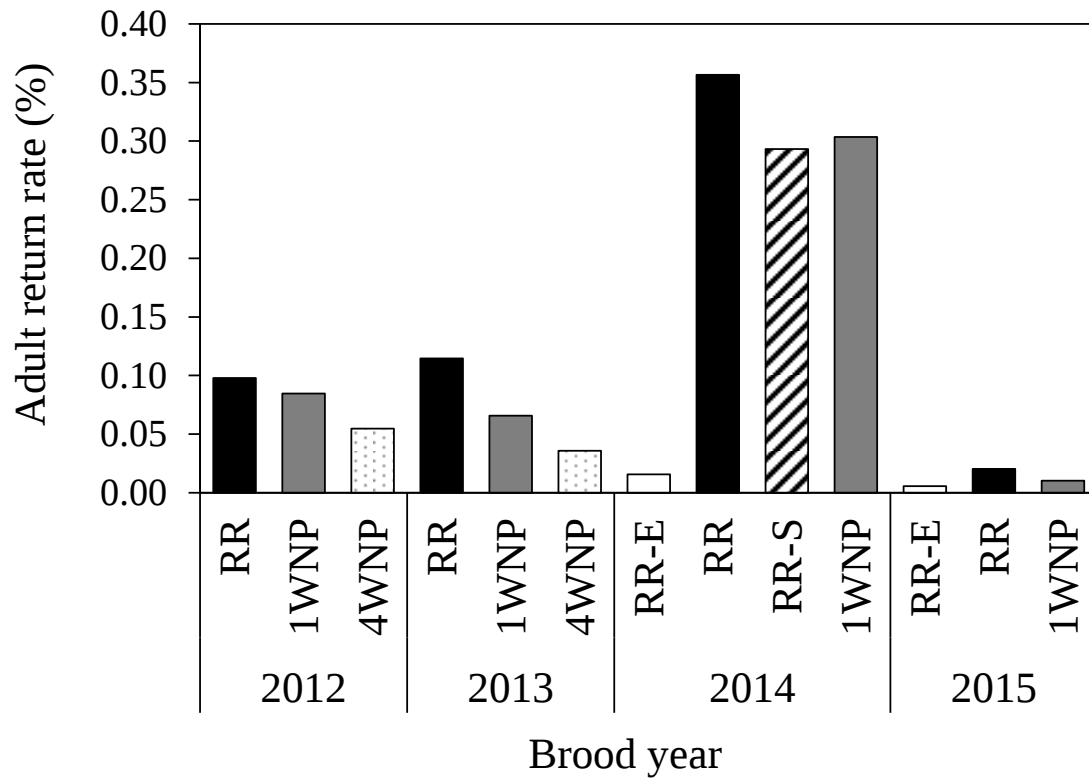


Fig. 2-4. Adult return rate for each release group (abbreviations of treatment groups are shown in Table 2-1) by brood year.

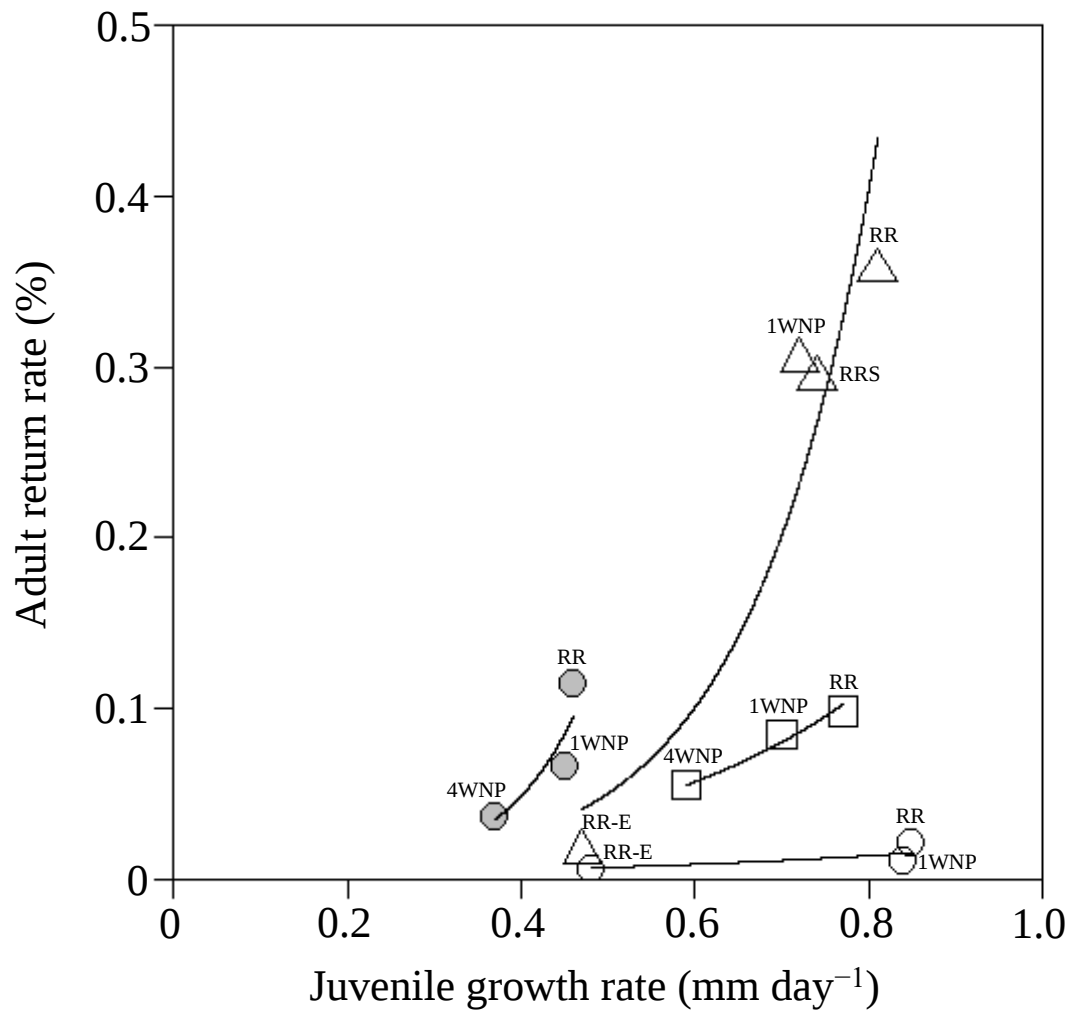


Fig. 2-5. Relationship between juvenile growth rate and adult return rate in each brood year: 2012 (□), 2013 (●), 2014 (△) and 2015 (○).

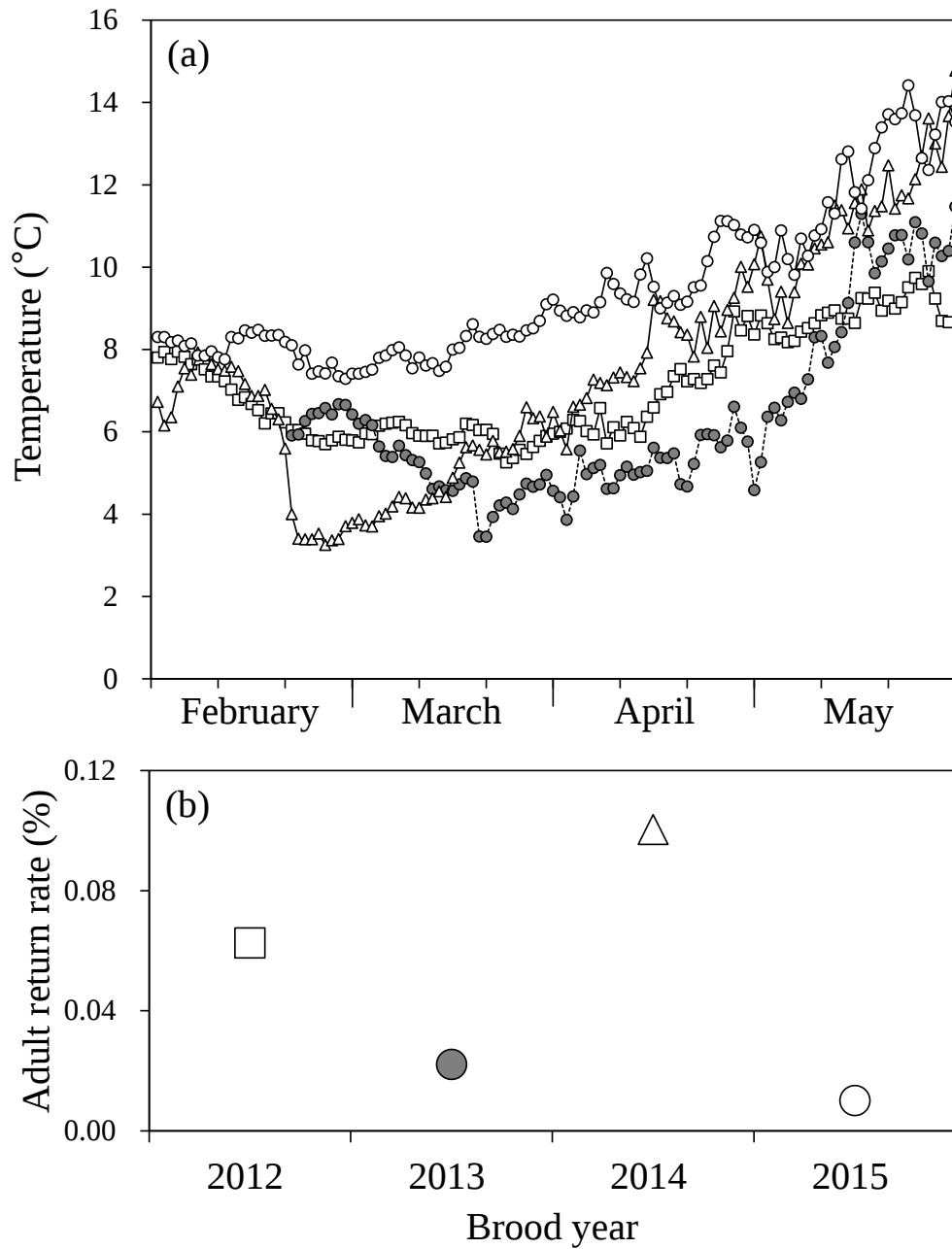


Fig. 2-6. Water temperature in Yamada Bay in 2013 (open squares), 2014 (shaded circles), 2015 (open triangles) and 2016 (open circles) when *Oncorhynchus keta* fry from brood years 2012, 2013, 2014, and 2015, respectively, were released (a). Total adult return rate to the Orikasa River (symbol matched to water temperature experienced in the year of release) (b).

第3章 サバ類による降海直後のサケ幼稚魚の捕食

3-1 緒言

岩手県の河川に放流されたサケ稚魚は降海後、沿岸を北上し、北海道の昆布森沖を通過してオホーツク海へ移動すると考えられている（入江 1990; Honda et al. 2017）。一般にサケ科魚類は生活史の初期に高い死亡率を経験すると考えられており（Healy 1982; Bax 1983）、捕食は降海直後の高い死亡率の主要な要因の一つと考えられている（Beamish and Mahnken 2001; Collis et al. 2002）。日本では、サケ稚魚の魚類捕食者として明確な記載があるのは、ホッケ *Pleurogrammus azonus*, ヒラメ *Paralichthys olivaceus*, ウグイ *Pseudaspius hakonensis*, マルタ *Pseudaspius brandtii*, アブラツノザメ *Squalus acanthias*, スズキ *Lateolabrax japonicus*, カラフトマス *Oncorhynchus gorbuscha*, サクラマス *O. masou*, アメマス *Salvelinus leucomaenis*（Nagasawa 1998）、ソウハチ *Cleisthenes pinetorum*, クロソイ *Sebastes schlegelii*, コマイ *Eleginus gracilis*（宮腰ほか 2013）の計 12 種である。いずれも岩手県で漁獲される種であるが、これらの種について、岩手県でのサケ稚魚の捕食状況に関する報告はなく、典型的な捕食者も不明である。

近年、三陸沿岸全域において、マサバ *Scomber japonicus* の漁期開始時期の早期化が生じており（横内ほか 2023）、岩手県では 2015 年以降、4-5 月に、定置網においてマサバ及びゴマサバ *Scomber australasicus*（以下、総称して「サバ類」という）が多く漁獲されるようになった。その結果、主に 4-5 月に放流されるサケ稚魚の沿岸滞留期間と重なり、サケとサバ類が沿岸において遭遇する機会が増大している可能性がある（Fig. 3-1）。岩手県沿岸に分布するサバ類は、マサバ太平洋系群とゴ

マサバ太平洋系群である。サバ類は様々な生物を餌として利用するが、魚食性魚類である。北東太平洋では、マサバはカタクチイワシ *Engraulis japonicus* をはじめ、カイアシ類やオキアミ類などの小型甲殻類を大量に捕食する（佐藤ほか 1968）。カタクチイワシはゴマサバの胃内容物からも確認されている（中東ほか 2010）。このため、サバ類は北上移動中のサケ稚魚の潜在的な捕食者になりうると考えられる。捕食性魚類の回遊と摂餌パターンは餌となる魚類の資源に影響を及ぼすことが知られている（Bax 1998; Tsou and Collie 2001; Worm and Myers 2003）。サバ類はこれまでサケの捕食者として報告されている魚類と比べて資源量が多いため、サバ類によるサケ稚魚の捕食は沿岸域での稚魚の死亡を通じたサケ資源減少の一因となる可能性がある。

そこで、本研究では、サバ類によるサケ稚魚の捕食の有無を明らかにするため、岩手県宮古湾において、サケ稚魚の沿岸滞泳期に釣獲により採取したサバ類の胃内容物を調査した。

3-2 材料・方法

3-2-1 胃内容物試料の採取

岩手県宮古湾において、サバ類を対象に釣獲による採取調査を行った（Fig. 3-2）。調査範囲はサケ稚魚が降海後に最初にサバ類と遭遇すると想定された宮古湾中央部から湾口部とした。調査はサケ稚魚の沿岸滞泳時期と考えられる 2021 年 4 月 9 日、20 日、5 月 19 日、26 日、6 月 1 日の計 5 回実施した。マサバは夜間に摂餌しないこと（中東ほか 2010）や同属の大西洋サバ *S. scombrus* でも夕方から翌日の日の出までに胃内容物が減少すること（Darbyson et al. 2003）が報告されているこ

とから、いずれの調査も日の出後に行い、概ね午前 7 時から開始し、正午に終了した。釣り船に搭載された魚群探知機（FCV-1100L, 古野電機社製）を使用して、魚群を探索し、反応が見られたポイントにおいて、疑似餌を用いた竿釣りによりサバ類を採取した。採取した標本は直ちに海水氷を張ったクーラーボックスへと収容した。得られた標本を海水氷に浸けた状態で実験室へと移送し、当日のうちにサンプル処理を行った。採取したサバ類は、第 1 背鰭第 1-9 棘基底長と尾叉長の比率によりマサバとゴマサバを区別した（花井 1999）。尾叉長（FL; 1mm 単位）、体重（BW; 1g 単位）を測定した後、胃を解剖挟で切開し、胃内容物をピンセットで滅菌シャーレ上に取り出し、胃内容物重量（0.01g 単位）を測定した。その後、目視観察により判別が可能なものについては、生物種を種または属レベルで記録した。使用するピンセット、解剖挟は解剖個体ごとに RNase AWAY（Thermo Fisher Scientific 社製、USA）を用いて十分に洗浄し、サンプル間の汚染を防ぐよう努めた。

3-2-2 DNA 分析による胃内容物の種特定

1) DNA 抽出用標本の作製

サケ稚魚を捕食していたサバ類の個体数を明らかにするために、胃内容物の目視観察において、表皮の色や頭部などの外見的特徴からサケ稚魚である可能性が高いと考えられた 27 検体（Fig. 3-4）に加え、種不明の魚類の筋肉断片 3 検体の合計 30 検体を分析対象とし、重量を 0.01 単位で個別に測定した。各検体から約 100mg の筋肉を切り出し、滅菌蒸留水でよく洗浄して DNA 抽出標本とした（筋肉サンプル）。

サバ類の食性を明らかにするために、DNA 抽出標本以外の全ての胃内容物を釣獲日毎にプールし、氷冷しながらホモジナイザー（T25

Digital, IKA 社製, Germany) により均質化し, DNA 抽出標本とした (胃内容物サンプル)。筋肉組織とホモジナイズした胃内容物は DNA 抽出まで-80℃で保存した。

2) DNA の抽出

筋肉サンプルの DNA は, PCR lysis butter (タカラバイオ社製) を用いて抽出した。胃内容物サンプルについては, 凍結乾燥機 (VD-250R, TAITEC 社製) とマルチビーズショッカー (安井機械社製) により凍結乾燥・粉砕を行った。得られたサンプルに Lysis Solution F (ニッポンジーン社製) を添加し, 分取した上清から MPure Bacterial DNA Extraction Kit (MP Biomedicals 社製, USA) を用いて DNA を抽出した。DNA 濃度は QuantiFluor dsDNA System (Promega 社製, USA) とマイクロプレートリーダー (Synergy H1, Agilent Technologies 社製, USA) を用いて測定した。

3) DNA ライブラリーの作製と MiSeq シーケンシング

ミトコンドリア DNA のシトクローム C オキシダーゼ・サブユニット 1 (CO1) の遺伝子領域を DNA メタバーコーディング解析に使用した。MiSeq プラットフォーム用の DNA ライブラリーは, DNA バーコーディングプライマー配列とインデックス配列を組み合わせた 2-step tailed PCR 法により作製した。筋肉サンプルの最初の PCR 反応は, 0.4 μ L の Gflex DNA polymerase (タカラバイオ社製), 10 μ L の 2 $\times$ Gflex PCR buffer, 0.5 μ L の forward および reverse プライマー (各 10 μ M), 7.6 μ L の滅菌蒸留水, 1.0 μ L のテンプレート DNA を含む 20 μ L 容量で実施した。CO1 遺伝子の forward プライマーには一般に使われている配列

(Leray et al. 2013),

5'-ACACTCTTTCCCTACGACGCTTCCGATCT-GGWACWGWGTGAACW
GTWTAYCCYCC-3'

を用い, reverse プライマーには CO1-HCO に縮重塩基を組み込んだ配列 (Fujiwara et al. 2021),

5'-GTGACTGAGTTCAGACGTGCTTCCGATCT-TAHACTTCNGGTGKC
CRAARAATCA-3'

を用いた。PCR の反応条件は, 94°C 1 分の初期変性の後, 98°C 10 秒, 55°C 15 秒, 68°C 1 分を 35 サイクル行い, 最終伸長ステップを 68°C 5 分とした。胃内容物サンプルの最初の PCR 反応は, 0.08 μ L の Ex Taq HS (TaKaRa Bio 社製), 1.0 μ L の 10 $\times$ Ex Taq Buffer, 0.8 μ L の dNTP (各 2.5mM), 0.5 μ L の forward および reverse プライマー (各 10 μ M), 4.0 μ L のブロッキングプライマー (10 μ M), 1.12 μ L の滅菌蒸留水および 2.0 μ L のテンプレート DNA を含む 10 μ L 容量で実施した。ブロッキングプライマー (5'-AAACCCCTGTTCGTCTGAGCAGTCC/3SPC3/-3') はサバ自身の DNA に由来するリード数を減らすために使用した。PCR の反応条件は, 94°C 2 分の初期変性の後, 94°C 30 秒, 61°C 15 秒, 52°C 30 秒, 72°C 30 秒を 35 サイクル行い, 最終伸長ステップを 72°C 5 分とした。筋肉および胃内容物サンプルの最初の PCR 産物を AMPure XP bead-based DNA purification (Beckman Coulter 社製, USA) を用いて精製した。

筋肉および胃内容物サンプルの 2 回目の PCR 反応は, 0.1 μ L の ExTaq HS (TaKaRa Bio), 1.0 μ L の 10 $\times$ Ex Taq Buffer, 0.8 μ L の dNTPs (各 2.5 mM), 0.5 μ L の forward および reverse プライマー (各 10 μ M), 5.1 μ L の無菌蒸留水及び 2.0 μ L のテンプレート DNA を含む 10 μ L 容量で実

施した。forward および reverse プライマーの配列は、

5'-AATGATACGGCACCGAGATCTAC-Index2-ACACTTTCCTACGACGC
-3'

および、

5'-CAAGCAGAAGACGGCATACTGAGAT-Index1-GTGACTGGAGTTCAGA
CGTGTG-3'

を用いた。PCR の反応条件は、94°C 2 分の初期変性の後、94°C 30 秒、60°C 15 秒、72°C 30 秒を 10 または 12 サイクル行い、最終伸長ステップを 72°C 5 分とした。PCR 産物は AMPure XP bead-based DNA purification (Beckman Coulter 社製, USA) により精製した。QuantiFluor dsDNA System (Promega 社製) およびマイクロプレートリーダー (Synergy H1 Agilent 社製) を用いて、作成された DNA ライブラリーの濃度を測定した。ライブラリーの品質は、フラグメントアナライザーと dsDNA 915 Reagent Kit (Agilent 社製) を用いて確認した。MiSeq v3 Reagent Kit (Illumina 社製) を用いて、2 × 300 bp の条件でシーケンシングを行った。

4)塩基配列の処理

FASTX-Toolkit ver. 0.0.14 (Gordon and Hannon 2010) に実装されている fastq barcode splitter を用いてプライマー配列を削除し、配列の読み始めが使用したプライマーと完全に一致するリード配列のみを抽出した。その後、Sickle Tools (ver. 1.33, Joshi and Fass 2011) を用いてクオリティー値が 20 未満の配列を取り除き、40 塩基以下の長さとなった配列とそのペア配列を廃棄した。次に、ペアエンドリード結合スクリプト FLASH ver. 1.2.11 (Magoc and Salzberg 2011) を用いて、高品

質のリード同士を結合した。結合の条件は、結合後の配列長 310 塩基、リードの配列長 225 塩基、最低の重なりを 10 塩基とした。筋肉サンプルの結合配列について、BLASTN (ver. 2.9.0) を用いて相同性検索を行った。胃内容物サンプルについては、得られた DNA 配列群を QIIME 2.0 (Bolyen et al. 2019) を用いてデフォルト設定で代表配列 (Operational Taxonomic Unit; 以下 OTU 配列と呼ぶ) にグループ化した。作成された OTU 配列を NCBI (National Center for Biotechnology Information) nt データベースに対して BLAST 検索を行い、系統推定を行った。このとき、OTU 配列のリード数が 100 以上の分類群を種とみなした。得られた配列データは DDBJ (DNA Data Bank of Japan) に BioProject アクセッション番号 DRR353432–DRR353435 として登録した。

3-2-3 胃内容物中のサケ尾叉長の推定および耳石温度標識有無の確認

DNA 分析によりサケ稚魚と判定された個体において、1 個体を除き全ての個体で吻端部が消化され、尾叉長を直接計測することができなかった。そのため、頭部が残っている個体について耳石を摘出し、耳石半径を 1 μ 単位で計測した。Saito et al. (2009) のサケ稚魚の耳石半径と尾叉長の関係式に基づき、胃内容物から出現したサケ稚魚の尾叉長を第 2 章 2-2-2 項と同様の方法で推定した。推定されたサケ稚魚の尾叉長とサケ稚魚を捕食したサバ類の尾叉長を比較し、捕食者と被食者のサイズ関係を検討した。

調査を実施した 2021 年において、岩手県ではふ化場から放流されたサケ (総放流数 2 億 3200 万尾) のうち全体の 12% に相当する 2800 万

尾について、耳石温度標識を施して放流されている (Hida et al. 2022)。そこで、耳石が摘出された個体がふ化場由来かどうかを調べるために、耳石温度標識の有無を確認した。

3-3 結果

3-3-1 釣獲されたサバ類の特性

4月20日を除き、いずれの調査においてもサバ類が採取され、合計166個体の標本が得られた (Fig. 3-3)。採取された場所はいずれも宮古湾口周辺のみであり (Fig. 3-2)、水深は29.0–74.0 m、海面水温は9.7–14.7℃であった。(Table 3-1)。採取されたサバ類のうちマサバの占める割合は全体で91.3%であった。マサバおよびゴマサバの平均尾叉長±標準偏差 (範囲) はそれぞれ 324 ± 26 mm (185–432 mm), 323 ± 30 mm (256–360 mm) であった (Table 3-1)。また、尾叉長が280 mm以上の成魚とみなせる個体 (川島ほか2017) の割合はマサバ、ゴマサバそれぞれ92.2%, 92.3%であった。

3-3-2 サバ類の食性とサケ幼稚魚の有無

胃内容物中の魚類筋肉組織のDNA解析では、各個体の総リード数の範囲は10686–18888であり、最も多く取得された結合配列の相同性検索の結果、30個体中29個体が99%以上の類似度でサケと同定された (DDBJ/EMBL/GenBank データベース, アクセション番号 LC094478.1 LC09471.1 LC094479.1)。5月19日はマサバ97尾中4尾の胃からサケ稚魚が検出された。ゴマサバ3尾からは検出されなかった。5月26日はマサバ30尾中5尾、ゴマサバ7尾中1尾の胃からサ

ケ稚魚が検出された (Table 3-1, Table 3-2)。4 月 9 日と 6 月 1 日に採取されたマサバとゴマサバの胃からは、サケの稚魚は検出されなかった。5 月 19 日及び 5 月 26 日に採捕されたサバ類の胃内容物総重量に占めるサケ稚魚の重量の割合はそれぞれ 2.5%, 29.0%であった。サバ類以外の魚類では、アイナメ *Hexagrammos otakii*, ムシガレイ *Eopsetta grigorjewi*, エゾメバル *Sebastes taczanowskii*, キツネメバル *Sebastes vulpes*, ナガヅカ *Stichaeus grigorjewi* が採取されたが、目視観察においていずれの胃内容物にもサケ稚魚は認められなかった。

釣獲日毎にプールされたサバ類の胃内容物の DNA 解析の結果, 97% 以上の相同性を持つ OTU リード総数は 40230–57113 であった。このうち宿主であるマサバの OTU リードには 1286–9421 リードが含まれており, それぞれ全体の 2.4 から 23.4%を占めていた (Table 3-3)。サバ類以外の魚類ではマイワシ *Sardinops melanostictus*, カタクチイワシ, サケ, スケトウダラ *Gadus chalcogrammus*, マアナゴ *Conger Myriaster* などが検出された。カタクチイワシとマサバは全ての釣獲日において検出された。無脊椎動物ではカマキリヨコエビ類 *Jassa* spp.やワレカラ類 *Caprella* spp.などの端脚目, ツノナシオキアミ *Euphausia pacifica*, クラゲ類が検出された (Table 3-3)。実際に, 目視観察で確認された種または分類群は, マイワシ, カタクチイワシ, サケ, マアナゴ (レプトケファルス幼生), イカ類, 十脚類 (メガロパ), オキアミ類, カマキリヨコエビ類, ワレカラ類であり, いずれも DNA 分析で検出された分類群に含まれていた (Table 3-3)。なお, マサバは全てのサンプルから検出されたにもかかわらず, 目視観察では一度も確認されなかった。

サバ類の胃内容物から出現したサケ稚魚のうち, 耳石が摘出できた個体は 29 尾中 16 尾であった。耳石から推定されたサケ稚魚の平均尾

又長±標準偏差（範囲）は 66.4 ± 10.0 (54.3–86.9) mm であった（Table 3-2）。サケ稚魚を捕食していたサバ類の平均尾又長±標準偏差（範囲）は 331 ± 17 (302–350) mm であり（Table 3-2）、標本全体の平均尾又長と比べて差があるとはいえなかった（t-test, $p=0.372$ ）。サケ稚魚を捕食していたサバ類の尾又長とサケ稚魚の尾又長の間には、統計的に有意な相関は見られなかった（Pearson's test, $r = 0.063$, $p=0.809$ ）（Fig. 3-5）。

耳石温度標識確認の結果、16 個体中 3 個体（18.8%）について、標識が確認された（Table 3-2）。

3-4 考察

本研究により、サバ類によるサケ稚魚の被食が野外において生じていることが明らかとなった。これまで、日本沿岸におけるサケ幼稚魚の魚類捕食者として、Nagasawa (1998) により 9 種、宮腰ほか (2013) により 3 種が報告されているが、これらにはマサバ及びゴマサバは含まれていないことから、これら 2 種についてはサケ稚魚の捕食者として新たな記載となる。

本研究では、サバ類に捕食されたサケのうち、3 個体について耳石温度標識が確認されたことから、捕食されたサケにふ化場由来の個体が含まれることが明らかとなった。ただし、放流魚のすべてに標識が施されたわけではなく、標識のない個体については、ふ化場由来か自然産卵由来かが不明であるため、両者の割合は不明である。

本研究で採取されたサバ類はマサバが主体であった。日本の南太平洋沿岸から千島列島沖に広く分布するマサバ太平洋系群の資源は 1990 年代から 2000 年代前半にかけて増加傾向にある（由上ほか 2021a）。

マサバ太平洋系群の成魚は 4 月から 6 月にかけて伊豆諸島近海で産卵し、産卵後は北上して夏から秋にかけて三陸沖や北海道沖で索餌する（村山ほか 1995; 渡邊ほか 1999; Watanabe and Nishida 2002）。一方、未成魚は常磐沖や鹿島沖で越冬する（川崎 1968）。本研究で採集されたマサバのうち 92.2%が尾叉長 280 mm 以上であり、成魚主体と考えられたことから、産卵後に沿岸を北上し 4 月から 6 月にかけて岩手県沿岸に来遊していたものと推察される。一方、ゴマサバ太平洋系群は、マサバよりも暖かい海域の沖合に分布し（落合・田中 1998）、成魚の主な分布域は黒潮周辺と考えられている（由上ほか 2021b）。しかし、東北から北海道地方の海面水温の上昇と資源量の増加に伴い、2001 年以降、夏から秋にかけて 1 齢魚と 2 齢魚が三陸北部や北海道東部に移動している（川端・中神 2008）。

サケ稚魚を捕食していたサバ類は宮古湾口部で釣獲され、釣獲場所の水深は 34.0–68.3 m であった。胃から採取されたサケ稚魚は、表皮や表皮下の筋肉組織が残っている個体が多く（Fig. 3-4）、消化が進んでいなかったことから、釣獲場所周辺海域で被食された可能性が高いと考えられた。このため宮古湾内に流入する河川から放流されたサケ稚魚が湾外へと移動する際、あるいは他地域由来のサケ稚魚が沿岸を北上移動中に湾口付近でサバ類と遭遇した結果、捕食されたと推察された。サケ幼稚魚の主な遊泳層は海表面付近と考えられている（Moulton 1997）。マサバでは日中は深場が中心だが、昼夜で水深 0–130 m を鉛直移動することが報告されている（Yasuda et al. 2018）。ゴマサバでも時期によっては水深 0–50 m までを頻繁に鉛直移動する事例が観察されている（梨田・三谷 2006）。これらのことから、サケ稚魚の被食は表層付近で生じていたと推察される。

本研究で得られた標本において、サケ稚魚を捕食していた個体の割合は、調査日ごとに見た場合、マサバで最大 16.7% (30 尾中 5 尾)、ゴマサバで最大 14.3% (7 尾中 1 尾) であった。多くのサバ類がサケ稚魚以外の生物を捕食しており (Table 3-3)、サバ類による大規模なサケ稚魚の被食が生じていたという証拠は得られなかった。また、本研究で得られたデータを用いて、宮古湾におけるサケ稚魚の被食量について、以下の大まかな試算を試みた。2021 年の津軽石川のサケの放流は、4-5 月の放流数が全体の 81% を占め (宮古漁業協同組合、私信)、放流後のサケ稚魚は宮古湾内に 1 カ月程度帯泳するとされていること (岩手県 1983) から、4-6 月に水揚げされたサバ類の漁獲量からサケ稚魚の被食量を推定した。2021 年の宮古湾内および湾口周辺の定置網および磯縦網により、4-6 月に漁獲されたサバの量は 281 トンであった (岩手県水産技術センター水産情報配信システム調べ : <https://www.suigi.pref.iwate.jp/shikyosearch>)。サバ類 1 尾当たりの平均体重は、本研究で得られた標本の平均値 331g とした。サバ類漁獲量の合計値 281 トンをサバ類 1 尾当たりの平均体重 331g で除して、宮古湾における 4-6 月中のサバ分布数と仮定した場合、84.9 万尾と計算される。本研究の結果から、サバ類集団中のうちサケ稚魚を捕食する個体の割合を 16.7% (最大値)、1 日当たりサバ類が捕食するサケ稚魚の数を 7 尾 (最大値) とした場合、これらの値を宮古湾における推定サバ分布数 84.9 万尾に乗じて算出した 4-6 月中のサケ稚魚の総捕食数は、約 99 万尾と計算された。この数は、2021 年の津軽石ふ化場からのサケ稚魚放流総数約 2500 万尾の 4.0% に相当した。

一方、サバ類の胃から採取されたサケ稚魚の推定尾叉長は 57.2-86.9 mm と幅広く、捕食個体の尾叉長とサケ稚魚の尾叉長の間には有意な

相関関係は見られなかった (Fig. 3-5)。2021 年に宮古湾に流入する津軽石川から放流されたサケ稚魚約 2500 万尾のうち、99.6%がサバ類の胃内容物から観察されたサケの最大尾叉長 86.9 mm 以下のサイズで放流されている (宮古漁業協同組合, 私信)。このことから、サバ類の捕食能力が高いため、サケ稚魚の体サイズとは無関係に捕食できたと推察された。また、時期によっては、サバ類の胃内容物に占めるサケ稚魚の重量割合が 29.0%と高い割合にのぼるケースがあることが明らかとなった。これらの事実は、今後、海水温の上昇に伴いサバ類の岩手県沿岸への来遊数が増加した場合、沿岸滞泳中のサケ稚魚の生残によってサバ類による被食は脅威となりうることを示唆している。

三陸地域におけるサバ類とサケ稚魚の時空間的な分布の重複とその結果としてのサケ稚魚の被食は、サバ類成魚の三陸沿岸域での分布の早期化により生じており、近年の海洋温暖化の影響をうけている可能性がある。奥西ほか (2020) は東北近海のマサバにおいて、春季に親潮前線が北編した場合、春季の三陸南部は高水温になり、この影響を受けて春季から秋季にかけて三陸における漁場は相対的に北部に形成されるとしている。近年の春季の三陸沿岸は、親潮弱勢のため、親潮南限が北編し、水温が上昇する傾向にある (Kuroda et al. 2020)。大西洋サバでは温暖化に伴う分布の拡大が観察されている (Overholtz et al. 2011)。さらに、ノルウェー海では海洋温暖化の影響を受けて大西洋サバが分布域と沿岸域に滞在する時間の両方を拡大し、その結果、それ以前には見られなかった春産卵ニシン幼生の大規模な被食が生じ、資源豊度に影響を及ぼしたとしている (Utone et al. 2012; Skaret et al. 2015)。一方、索餌回遊中のサバ属の分布域は、分布域の水温のみならず、自身の資源の大きさや構造、餌料生物の分布、他の魚類との相互作用な

どいくつかの要因によって決定され则认为られている（佐藤ほか 1975; Asthorsson et al. 2012; Sveegaard et al. 2012; Utne et al. 2012; Nøttestad et al. 2016）。加えて，Kamimura et al. (2021) は，種内，種間密度の増加が分布水温の変化に影響を及ぼすことを指摘しており，実際に我が国周辺のマサバの分布水温が近年のマサバ自身の資源増加やマイワシの資源増加の影響を受けて低水温帯にシフトしていることを報告している。こうしたことから，三陸沖の春季の親潮前線の北偏がもたらす海水温の上昇とマサバ資源量増加に伴う分布水温の低温化の両要因が岩手県におけるサバ類成魚の分布の早期化を生じさせていると推察される。

本研究ではシーズンを通じた正確なサケ稚魚被食量は明らかにできなかった。被食量を見積もるためには，対象地域におけるサケ稚魚とサバ類の現存数に加え，両種の分布の重複度を評価する必要があるが，本研究ではこれらの情報を得られていない。また，サバ類は魚類や動物プランクトンなど幅広い生物種を摂餌することが知られ（中東ほか 2010），本研究結果もそのことを支持していた。サバ類の餌生物の多寡は，サケ稚魚の捕食圧に影響を及ぼすと考えられる。沿岸域でサケ稚魚を捕食する鳥類の例では，他の餌生物が少ない（多い）状況下ではサケ稚魚への捕食圧は相対的に増加（低下）することが知られている（Wells et al. 2017; Phillips et al. 2021）。したがって，シーズン中の被食量を明らかにするためには，サバ類とサケ稚魚の現存数および分布の接点の形成機構解明に加え，サバ類をとりまく生物的環境の変化がどのようにサケ稚魚の摂食率に影響を及ぼすかについてのより詳細な情報を取得する必要がある。

Table 3-1. Date of sampling, sea surface water temperature at the sampling location, fork length and body weight of chub and spotted mackerels.

Sampling date	Water temperature (°C)	Mackerel species	Number of fish examined	Mean ± standard deviation (range) of fork length (mm)	Mean ± standard deviation (range) of body weight (g)
9 April	9.8	chub	17	285 ± 20 (255–320)	236 ± 60 (147–374)
		spotted	0	—	—
20 April	9.7	chub	0	—	—
		spotted	0	—	—
19 May	12.5	chub	97	326 ± 25 (185–363)	343 ± 79 (54–534)
		spotted	3	331 ± 20 (313–359)	403 ± 80 (330–514)
26 May	13.5	chub	30	318 ± 23 (264–352)	303 ± 67 (184–421)
		spotted	7	329 ± 20 (292–350)	392 ± 85 (270–504)
1 June	14.7	chub	9	332 ± 41 (270–432)	394 ± 205 (215–948)
		spotted	3	300 ± 44 (256–360)	365 ± 177 (203–611)

Table 3-2 Body size of chub and spotted mackerels that preyed upon juvenile chum salmon, and body size and presence of otolith thermal marking of chum salmon preyed upon by the mackerels.

Sampling date	Mackerels				Ratio of chum salmon weight to mackerel stomach content weight (%)	Chum salmon			
	No.	species	Fork length (mm)	Body weight (g)		No.	Fork length (mm)	Sample weight (g)	Otolith-marked
May 19	1	Chub	312	296	13.3	1	57.2 a	2.3	No
	2	Chub	335	342	34.3	2	74.1 a	4.6	No
	3	Chub	345	369	50.0	3	ND	2.4	
	4	Chub	334	387	31.2	4	59.5 a	2.4	No
May 26						5	58.5 a	2.3	No
						6	54.3 a	2.8	No
	5	Chub	332	375	52.4	7	66.7 a	2.4	No
						8	72.5 a	2.7	No
						9	57.8 a	1.6	Yes
	6	Chub	302	275	25.4	10	ND	1.5	
						11	ND	1.4	
						12	ND	1.9	
						13	ND	1.4	
	7	Chub	342	393	92.1	14	ND	1.3	
						15	ND	2.1	
						16	ND	1.5	
						17	ND	2.0	
						18	54.3 a	0.6	No
						19	70.1 a	2.4	No
	8	Chub	348	392	94.8	20	ND	1.8	
						21	ND	0.8	
						22	ND	1.3	
						23	ND	2.3	
						24	75.8 a	3.0	Yes
						25	71.3 a	2.1	Yes
	9	Spotted	350	499	82.9	26	66.3 a	1.9	No
						27	57.5 a	1.0	No
						28	86.9 a	2.7	No
	10	Chub	310	269	81.8	29	82.8 a	3.6	No

a fork length estimated from otolith radius; ND: no data.

Table 3-3. Prey species in stomach contents of mackerels on each collection day estimated by DNA metabarcoding.

Species	Common name	9 April	19 May	26 May	1 June
Fishes					
<i>Oncorhynchus keta</i>	Chum salmon	0	4679 v	11734 v	0
<i>Engraulis japonicus</i>	Japanese anchovy	14378 v	18709 v	4023 v	6660 v
<i>Sardinops melanostictus</i>	Japanese sardine	474	12841 v	<100	10803 v
<i>Scomber japonicus</i>	Chub mackerel	9421	1351	1286	2644
<i>Gadus chalcogrammus</i>	Walleye pollock	1060	<100	<100	0
<i>Leuroglossus schmidtii</i>	Northern smooth tongue	831	0	0	0
<i>Conger myriaster</i>	Whitespotted conger	0	0	686 v	272 v
<i>Pterogobius zacalles</i>	Beauty goby	0	0	0	1428
<i>Physiculus japonicus</i>	Japanese codling	0	0	200	0
<i>Gadus macrocephalus</i>	Pacific cod	230	0	0	0
<i>Diaphus theta</i>	California hedlightfish	0	444	0	0
<i>Microstomus achne</i>	Slime flounder	130	0	0	0
Molluscs					
Squid					
<i>Todarodes pacificus</i>	Japanese flying squid	0	5480 v	<100	111
Crustaceans					
Decapoda					
<i>Telmessus cheiragonus</i>	Helmet crab	0	<100	136 v	<100
Euphausiidae					
<i>Euphausia pacifica</i>	Pacific krill	11890 v	308 v	<100	0
Copepoda					
<i>Acartia</i> sp.	–	0	0	0	197 v
Podonidae					
<i>Evadne nordmanni</i>	–	0	<100	218	<100
Amphipoda					
<i>Jassa</i> spp.	–	0	2637 v	13662 v	8250 v
<i>Caprella</i> spp.	–	0	738 v	4715 v	10168 v
Polychaetes					
<i>Nicolea</i> sp.	–	0	0	0	1609
Echinodermata					
<i>Sclerodactyla multipes</i>	–	0	0	0	434
Cnidarians					
<i>Eutonina indicans</i>	Umbrella jellyfish	787	6757	0	0
<i>Agalma elegans</i>	–	407	<100	0	0
<i>Sarsia tubulosa</i>	Clapper hydroid	0	101	0	<100
<i>Aequorea</i> sp.	–	0	1949	0	0
Algae					
<i>Gloiopeltis</i> sp.	–	0	0	1197	0
<i>Analipus japonicus</i>	Far needle	0	<100	655	<100
<i>Stephanocystis geminata</i>	Chain bladder	0	0	138	<100
<i>Chloroparvula</i> sp.	–	113	0	0	0
Others					
		509	1119	1644	1087
Total		40230	57113	40294	43663

Values indicate the read counts of operational taxonomic units (OTU), and “v” indicates taxa that were confirmed at the species or genus level by visual observation. Taxa with read counts less than 100 or taxa with no “hits” in the NCBI nt database were grouped as “Others”

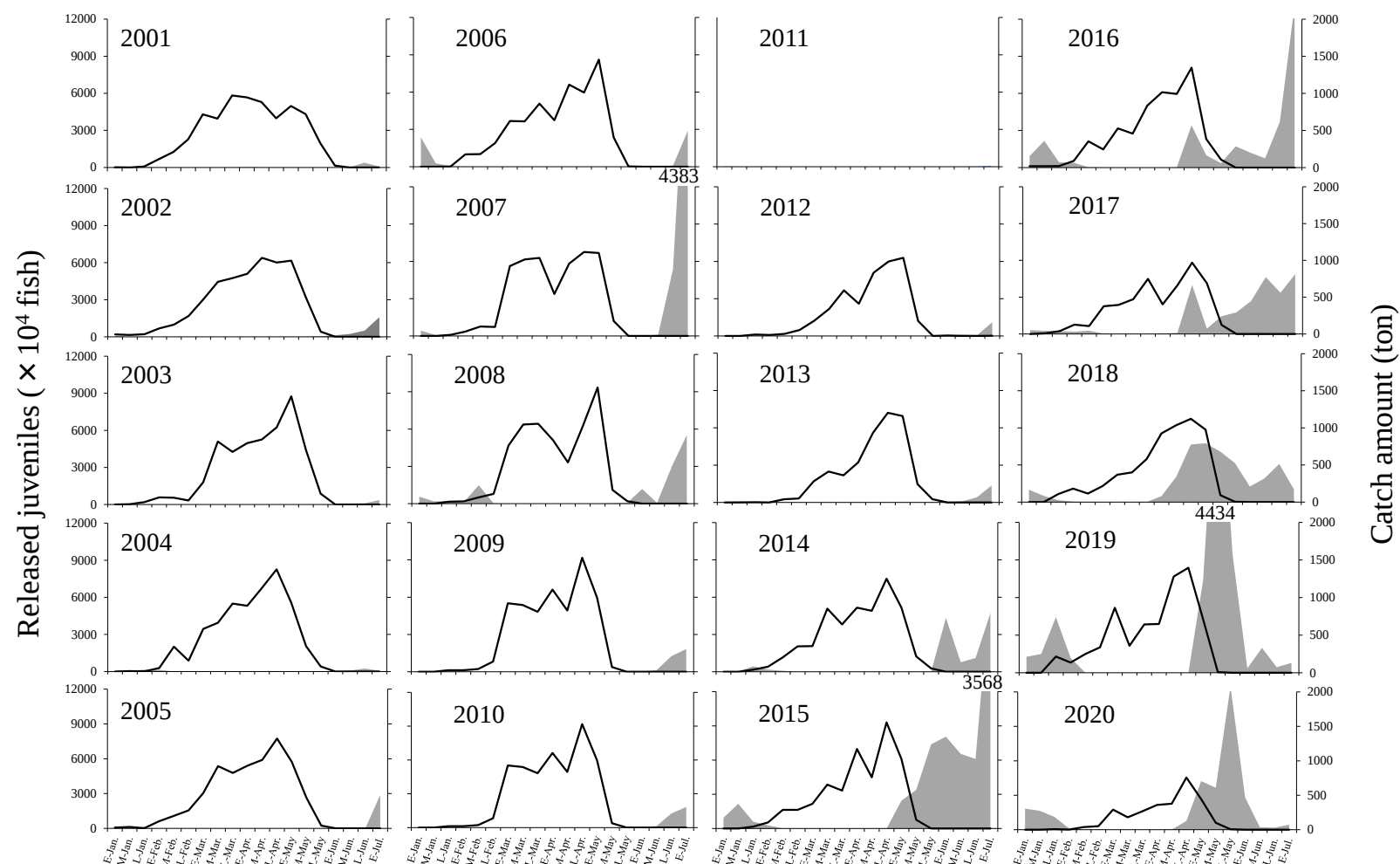


Fig. 3-1. Changes in release number of chum salmon (solid line) and catch amount of mackerels by set nets (gray area) in Iwate Prefecture. (Data from web site of "Iwate Tairyo-Navi" by Iwate Prefectural Fisheries Technology, <https://www.suigi.pref.iwate.jp/shikyosearch>)

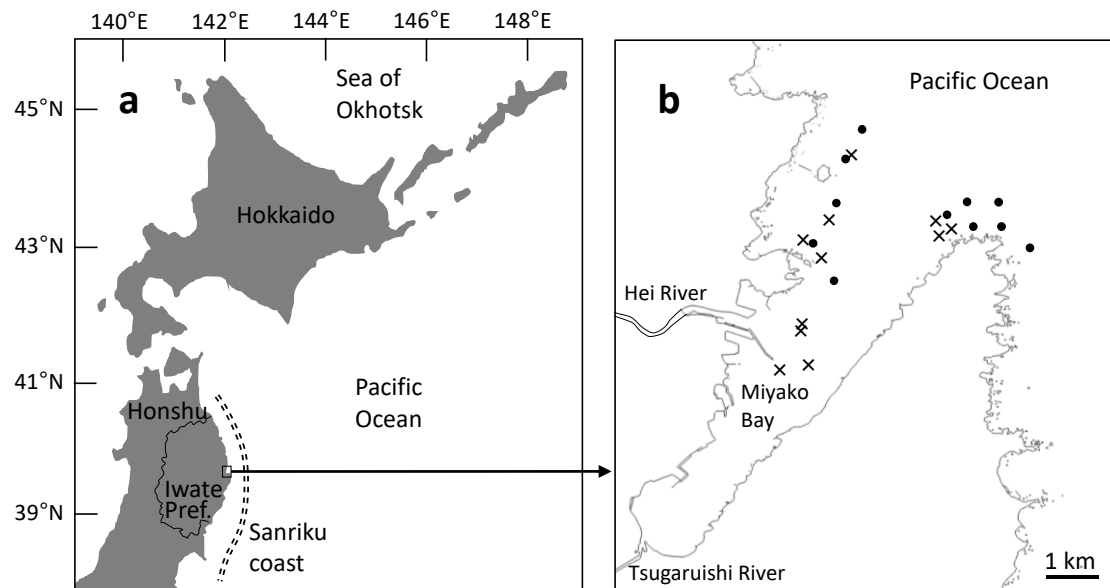


Fig. 3-2. Maps showing location of the (a) Sanriku region in northern Japan and (b) the sampling area in Miyako Bay (inset). Locations of pooled survey points where mackerels were either captured (solid circles) or not captured (crosses) during the survey period.



Fig. 3-3. Representative example of chub mackerel caught in Miyako Bay (Fork length 33.2 cm). Scale bar: 10 cm.

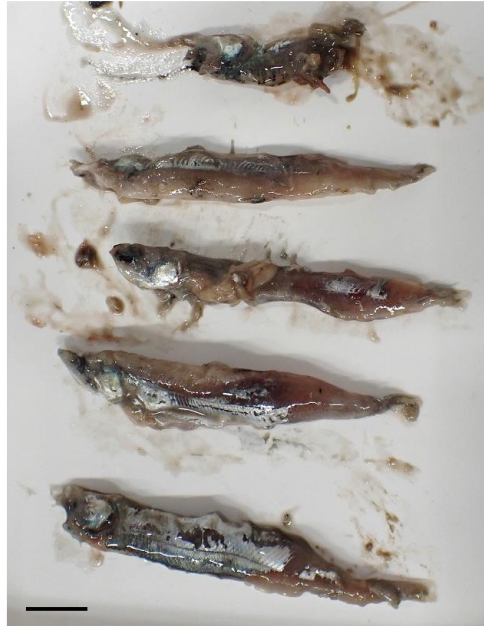


Fig. 3-4. Representative example of mackerel stomach contents comprising juvenile chum salmon identified based on visual observation. Scale bar: 10 mm.

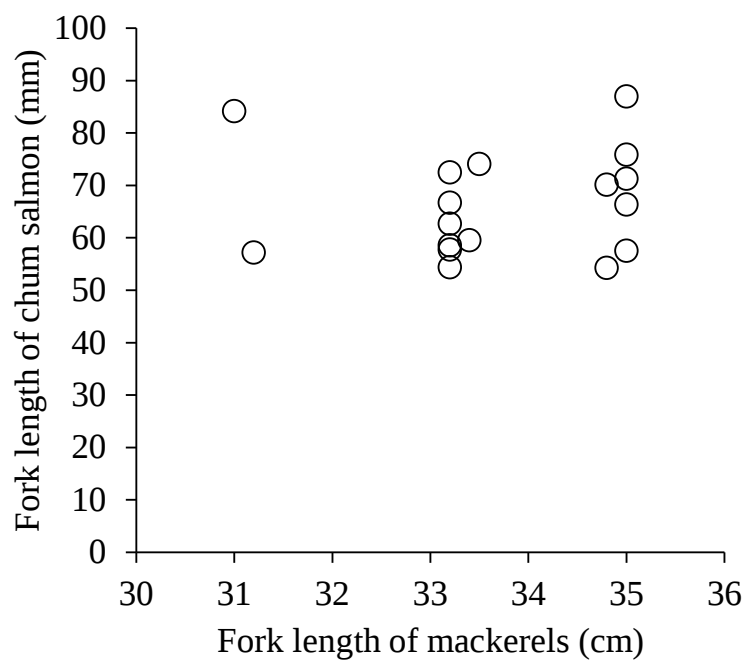


Fig. 3-5. Relationships between mackerel length and the length of chum salmon preyed on by mackerel.

第4章 サケ非放流河川における野生サケ遡上数の変動

4-1 緒言

近年、北海道の河川において、従来から考えられていたよりも広い範囲で、多くのサケ自然産卵が確認されている（宮腰ほか 2011，森田ほか 2013a）。また，自然産卵由来の野生サケが漁業資源にも寄与することが明らかになりつつある（森田ほか 2013b）。このことから，野生サケの保全の機運が高まっている。本州域においても日本海側（Iida et al. 2018），太平洋側（Aoyama 2017，玉手ほか 2019，峰岸・青山 2019）において自然産卵および自然産卵由来の野生サケ稚魚の存在が報告されるようになり，情報が蓄積されつつある。しかし，これまで本州太平洋側のサケ非放流河川において，自然産卵を行うサケ遡上数や産卵床数の経年変動が詳細にモニタリングされた例は少ない。特に，近年の環境変動下でサケの漁獲量減少が特に著しい岩手県では，自然産卵河川のサケ個体群の減少が懸念されるが，その動態は不明である。持続的なサケ資源管理方策を検討するうえで，自然再生産を行うサケは，遺伝資源としての重要性（佐藤・森田 2019）のみならず，経費がかからずに漁業資源に貢献するという点からもその存在意義は大きい。自然産卵を行うサケの資源状態や産卵生態に関する情報は，それらを保全していくうえで欠かせない情報となる。森田（2015）は，ふ化放流魚が人工的な飼育環境に適応することによる家魚化（domestication）が生じ，放流魚の適応度が低下していると指摘している。さらに，近年の地球温暖化により，このことがより顕在化しているとの指摘もあり（Kitada and Kishino 2021），家魚化の影響を受けにくいと考えられる自然産卵で生まれた個体群の資源は放流魚とは異なる変動パター

ンを示す可能性もある。一方で、環境変動下で放流魚同様に資源が減少しているのであれば、早急に何らかの保全策を講じる必要がある。

そこで、本章では、自然産卵河川のサケの資源状態を明らかにするため、岩手県沿岸のサケ非放流河川において、サケ親魚の遡上数および産卵床数の年変動を調べた。また、保全の際に必要な情報となる流域スケールにおける産卵床の造成場所を評価した。

4-2 材料・方法

4-2-1 河川の踏査調査

本研究ではサケの放流が行われていない河川である松前川および音部川を調査対象河川とした。松前川は流路延長約 14 km，河口付近の平均川幅 8 m，音部川は流路延長約 5 km，河口付近の平均川幅 5 m の小河川である (Fig. 4-1)。松前川には河口から上流 4.6 km 地点に砂防堰堤，音部川には河口から上流 2.0 km 地点に小滝があり，それぞれサケ親魚の遡上限界となっている (Fig. 4-1, Fig. 4-2)。そこで，両河川の河口から遡上限界までを調査区間とし，2016 年から 2021 年の 9 月から翌年 1 月までの期間において 7-10 日の頻度で調査を実施した。調査区間において，河川を踏査し，サケ親魚の生魚およびサケ産卵床を目視で計数し，確認された位置を携帯型 GPS (GARMIN 社製, USA) に登録した。各回の調査において，親魚および産卵床は重複を許してカウントした。なお，松前川および音部川にはサケ産卵床と外観がよく似た産卵床を造成するサクラマス *Oncorhynchus masou* が生息している。両河川のサクラマスの産卵時期は 9 月から 10 月，ピークは 10 月上旬から中旬で，一部サケの産卵時期と重複している (佐々木未発

表)。また、両種の産卵床のサイズは重複することから（斎藤 2000）、一般に産卵床の大きさや外観から種を判別することは難しい。ただし、本研究では産卵期間中に定期的な観察を行ったため、サケまたはサクラマス親魚と産卵床がセットで観察されることが多かった（Fig. 4-3）。そのため、サケ親魚と同一場所で観察された産卵床をサケ産卵床と見なし、マーキングを施し、次の調査以降は親魚が不在であっても珪藻類の付着により目視判別が困難になるまでサケ産卵床のカウントに含めた。親魚の確認ができなかった産卵床は種不明産卵床としてサケ産卵床に含めなかった。いずれの調査年も種不明産卵床数はサケ産卵床と判断された数の 5%以下であった。

4-2-2 親魚遡上数および産卵床数の推定

本研究では、サケ親魚数と産卵床数について重複を許してカウントした。そこで、その影響を考慮した推定方法である AUC (Area-under-the-curve) 法（Hilborn et al. 1999）によりサケ親魚遡上数および産卵床総数（E）を推定した。

$$AUC = \sum_{i=2}^n (t_i - t_{i-1}) \times \frac{(x_i - x_{i-1})}{2} \quad (4-1)$$

$$E = \frac{AUC}{s} v \quad (4-2)$$

ここで、 t_i は i 番目の調査月日、 x_i は i 番目の調査において確認した親魚または産卵床数、 s は親魚の河川滞在日数または産卵床寿命、 v は目視効率を示す。親魚の河川滞在日数は、河川進入後から死亡するまでの期間とし、文献値（斎藤 2000）を参考に 15 日と仮定した。産卵床

寿命は、2016年に松前川において、任意のサケ産卵床10個を選定し、産卵床が造成された日から珪藻類の付着により目視判別が困難になるまでの日数の平均値を求め、他の調査年についてもこの値を用いた。また、調査河川は小規模河川であるため、踏査により全体をくまなく観察できること、調査は河川の増水時を避け、河床が鮮明に見える平水時にのみ行ったことから、 v を100%と仮定した。

推定された松前川および音部川のサケ親魚数の経年変化について、近隣のサケ人工ふ化放流河川と比較するため、明戸川および重茂川（Fig. 4-1）のサケ親魚捕獲数（一般社団法人岩手県さけ・ます増殖協会捕獲採卵速報：<http://www.echna.ne.jp/~isz/sokuhou/sokuhou.html>）との相関分析を行った。

産卵床の造成場所と河川勾配との対応を評価するため、調査区間における標高および河川勾配をカシミール3D地形図（ver.9.3.3.23881（9.3.3），<http://www.kashimir3d.com/>）および国土地理院発行の5 mメッシュ標高データ（<https://www.gsi.go.jp/kiban/>）を用いて求めた。

4-3 結果

4-3-1 親魚遡上数の年変動

2016-2021年に推定された親魚数の範囲は松前川で35-1014尾、音部川で5-366尾であり、年により親魚数は大きく異なった。経年変動のパターンは、松前川および音部川ともに類似し、2018年をピークに2019年以降は年々減少しており、2021年は調査年の中で最も少ないというパターンであった（Table 4-1）。松前川および音部川の親魚数を近隣ふ化放流河川の明戸川および重茂川の河川捕獲数と比較した結果、

いずれの河川においても 2016 年から 2018 年のピークにかけて増加した後、2019 年以降は 2018 年の 50%以下に急減し、2021 年に最低数となる類似した年変動パターンを示した (Fig. 4-4)。松前川の遡上数と明戸川の河川捕獲数、音部川の遡上数と重茂川の河川捕獲数にはそれぞれ有意な正の相関が認められた (Spearman's rank correlation, 松前川 vs 明戸川 : $\rho=0.89$, $p<0.05$, 音部川 vs 重茂川 : $\rho=1$, $p<0.05$)。

4-3-2 産卵床数と産卵場所

平均産卵床寿命は 15 日 (範囲 10-28 日) であり、この値を産卵床寿命の代表値として AUC 法による産卵床数の推定計算に用いた。2016-2021 年に推定された産卵床数の範囲は松前川で 29-432 床、音部川で 5-182 床であり、年により大きく異なった。年変動のパターンは、親魚数と同様のパターンを示し、両河川とも 2018 年が最も多く、2021 年が最も少なかった (Table 4-1)。産卵床が確認された時期は、松前川では 9 月中旬から 1 月中旬、音部川では 10 月上旬から 1 月上旬の範囲であった。調査区間の河床勾配は、松前川では河口から約 1.6 km 地点、音部川では 1.1 km 地点に極大点が見られた (Fig. 4-5)。産卵床は河口から 1km 付近よりも下流側に多く、いずれの河川、年においてもサケ親魚の遡上限界地点付近に形成されることはなかった (Fig. 4-6, Fig. 4-7)。河床勾配の極大点より下流側に占める産卵床の割合は、松前川において 9-10 月は他の月よりも割合が低くなる傾向があり、2016-2017 年は 40.0-60.6%であった。一方、11 月以降は、2017 年の 84.4%を除き、いずれの調査年、月においても 90%以上であった。音部川では、2016-2018 年では 10 月に 89.4-97.0%であったが、それ以外は全て 100%であった (Table 4-2)。

4-4 考察

本研究結果から、岩手県のサケ非放流河川において自然産卵を行うサケは、近年急激にその数を減らしており、産卵床造成場所は、産卵床数の増減にかかわらず、河口から 1-1.5km 付近までの下流域に多く造成されることが明らかとなった。

親魚遡上数の年変動パターンは、近隣のふ化放流河川の河川捕獲数と類似のパターンを示した。松前川および音部川いずれの河川においても 2018 年のピーク時に比べて 2020 年ではそれぞれ 13.1%, 7.1%, 2021 年では 3.5%, 1.4%にまで減少しており、ふ化放流河川同様に自然産卵河川における親魚の遡上数も大きく減少していることが明らかとなった。

本研究では河川滞在日数を 15 日として遡上数を推定した。Nobata et al. (2022) は、岩手県沿岸のサケ放流河川である大槌川において、産卵遡上したサケ親魚の成熟状態や河川内の移動について詳細に調べた結果、三陸のサケ親魚は成熟した段階で遡上し、河川進入後は直ちに産卵場へと向かい産卵行動を行うため、河川滞在日数は 7 日程度と推定している。本研究において、新規に造成されたサケ産卵床の初回発見時には、親魚が産卵床を造成中か産卵後の雌が産卵床を保護しているというケースが多かった (Fig. 4-3)。調査は 7-10 日間隔で実施したので、松前川および音部川においてもサケは河川進入後、数日から 10 日間程度のうちに産卵行動を開始または終えていたものと思われる。したがって、本研究で設定した 15 日の河川滞在日数は過大である可能性があり、その場合は推定した遡上数は実際よりも過小評価に

なる。しかし、仮に親魚の河川滞在日数を 7 日と仮定した場合、例えば音部川の親魚数は最大値を示した 2018 年が 784 尾、最小値を示した 2021 年が 10 尾と推定されることから、遡上数が急激に少なくなっていることは確実であろう。

松前川および音部川の産卵床数は、いずれも親魚数と同じ変動パターンを示し、2021 年に急激に減少していることが明らかとなった (Table 4-1)。本研究で推定された産卵床寿命は 15 日であり、北海道豊平川における先行研究結果 (高山 1997) と同様の値であった。流域スケールにおけるサケ産卵床の造成場所は、松前川、音部川ともに毎年の産卵床数の多寡によらず、調査区間における河床勾配の極大点より下流側に多く分布することが明らかとなった (Table 4-2)。河床勾配の極大点は松前川で河口から 1.6 km、音部川で 1.1 km に存在することから、いずれも河川の下流域で産卵が多く行われていることを示している。このことは、サケ親魚が河川に進入するときの成熟状態が深く関わっていると考えられる。三陸のサケは成熟した状態で河川に進入する (Nobata et al. 2022) ため、未成熟状態で河川進入する個体に比べて遡上のための時間やエネルギーを費やせない。松前川および音部川の調査区において、河床勾配の極大点より上流側は、標高がわずか 20 m 程で山地溪流の様相を呈し、勾配が急になる (Fig. 4-5) ため、河川の流速も早くなる。したがって、河川に遡上した多くのサケはそうした場所まで遡上することなく、河床勾配が緩やかな場所で産卵すると考えられる。三陸沿岸河川は急峻な地形をもち、距離が短い河川が多い (堺ほか 2019) ため、勾配が緩やかな区間の距離が短いことや親魚の河川進入時の成熟状態が制限要因となり、サケの産卵場所が下流域に集中していると考えられる。

一方、両河川において産卵床の分布には時期的な変化が見られ、9月や10月といった産卵期の初期には、河床勾配の極大点よりも上流側の中流域で産卵する個体も確認された。中流域で産卵する個体の数はいずれの河川でも2016年が多く、他の年でも数は少ないものの、同様の傾向が見られた。しかし、2019年以降は、親魚遡上数の減少に伴い、中流域の産卵床の割合が低下し、松前川では2021年、音部川では2020年以降では見られなくなった(Fig. 4-6, Fig. 4-7)。北海道のサケでは、早期に遡上した親魚は上流域の河川水に水温が近い場所(冬季に水温が低下)に産卵し、後期に遡上した親魚は下流域の湧水が湧出する場所(冬季に水温が低下しない)を産卵場所として利用する(鈴木 2008)。このことにより、孵化から浮上までに要する日数が上流域では遅く、下流域で早まり、幅広い産卵期に対して、稚魚の浮上時期を収斂させ、短い降海適期に降海できるよう調節されていると考えられている(鈴木 2008; Lisi et al. 2013)。松前川では、冬季の河川水温が0℃近くになるため、そうした調節が行われている可能性もあるが、詳細は不明である。一方、峰岸・青山(2019)は、岩手県沿岸のサケ非放流河川である小槌川において、産卵場所の時期的な変化があることを報告しているが、河川水温と地下水が湧出する場所との温度差が北海道ほど大きくなく、水温に応じた産み分けはさほど重要でない可能性があるとしている。いずれにしても、早期に遡上し、中流域で産卵する個体は河川進入時点では最終成熟に達していない可能性があり、数は少ないものの、こうした個体群の存在を認識し、保全の対象として検討することも重要である。

以上より、松前川および音部川では、産卵時期の初期に一部中流域に造成される産卵床があるが、地理的特徴および親魚の生理的特徴に

より下流域に産卵床が集中して造成されることが明らかとなった。三陸沿岸の河川の下流域は河川環境が改変されることが多いため、産卵環境の保全に向けたより一層の配慮が必要である。一方、早期に中流域に遡上し、産卵する個体群もいることや、サケの産卵に必要な砂礫の供給は上流部の開発や河川横断工作物の有無等の影響を受けるため（中村 1999; 辻本 1999; 石山ほか 2009）、産卵環境の保全のためには下流域のみの保全を考えれば良いわけではなく、流域全体を通して必要な保全策を検討することが重要である。

Table 4-1. Estimated number of adult fish and spawning redds in the Matsumae and Otobe rivers.

River	Year	Adult fish	Spawning redds
Matsumae	2016	219	179
	2017	556	194
	2018	1014	432
	2019	222	117
	2020	133	75
	2021	35	29
Otobe	2016	88	57
	2017	299	102
	2018	366	182
	2019	157	79
	2020	26	22
	2021	5	5

Table 4-2. Percentage of spawning redds on the downstream side of the local maximum point of the riverbed gradient within the study section. “ – ” indicates that no spawning redds were observed.

Year	Month	Matsumae River	Otobe River
2016	September	40.0	-
	October	60.6	89.4
	November	98.1	100.0
	December	100.0	-
	January	100.0	-
2017	September	-	-
	October	42.9	93.2
	November	84.4	100.0
	December	99.3	100.0
	January	100.0	-
2018	September	-	-
	October	80.3	97.0
	November	96.4	100.0
	December	100.0	100.0
	January	100.0	-
2019	September	80.0	-
	October	90.1	100.0
	November	94.7	100.0
	December	100.0	100.0
	January	100.0	-
2020	September	-	-
	October	90.7	100.0
	November	98.2	100.0
	December	100.0	100.0
	January	100.0	-
2021	September	-	-
	October	100.0	100.0
	November	100.0	-
	December	100.0	100.0
	January	100.0	100.0

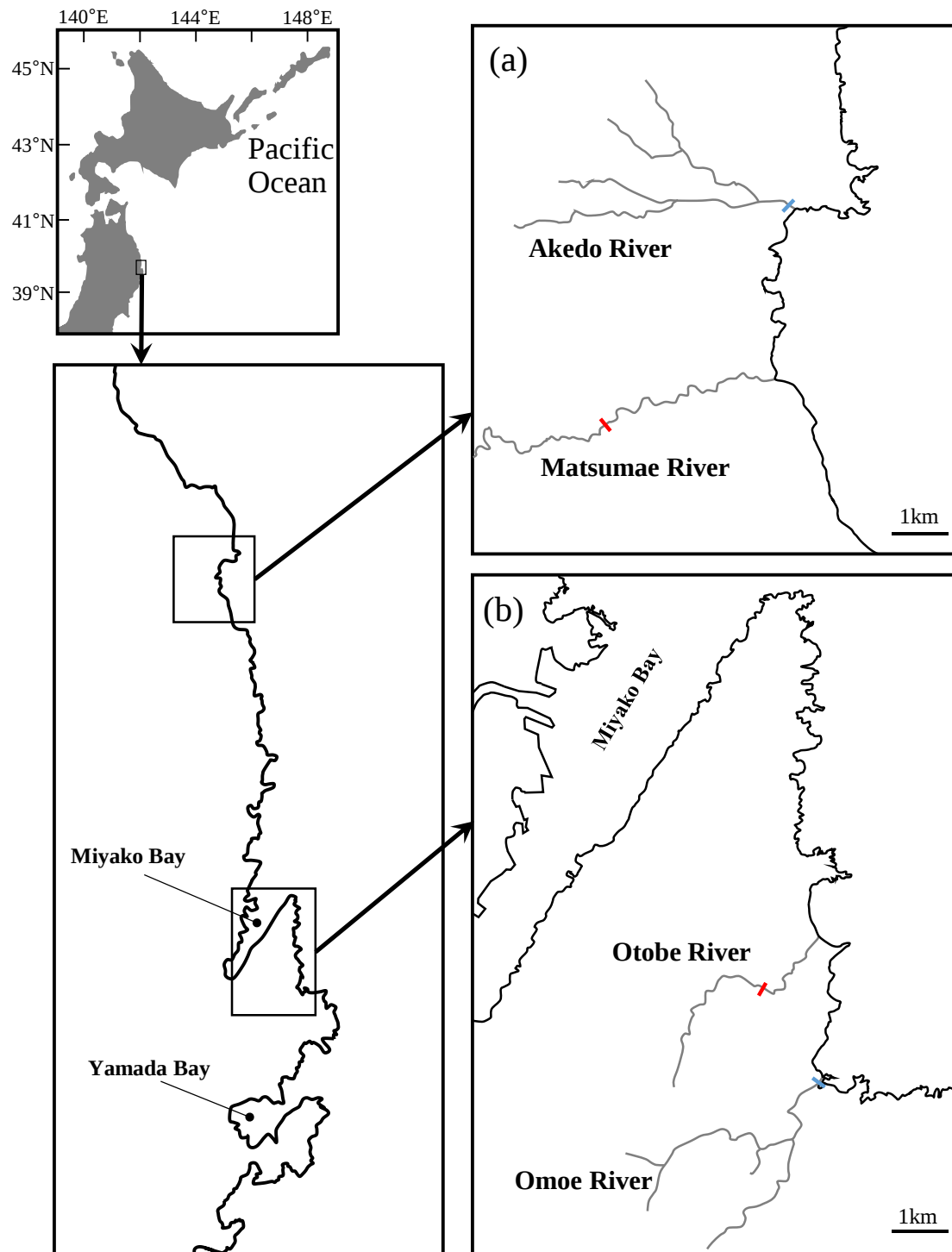


Fig. 4-1. Map shows the location of the Matsumae River (a) and the Otohe River (b) that were surveyed in this study. The Akedo River and the Omoe River are neighboring rivers where artificial hatchery releases are conducted. Blue bars indicate hatchery capture facilities. Red bars indicate the upriver distribution limit of the adult chum salmon, corresponding to (a) and (b) in Fig. 4-2, respectively.

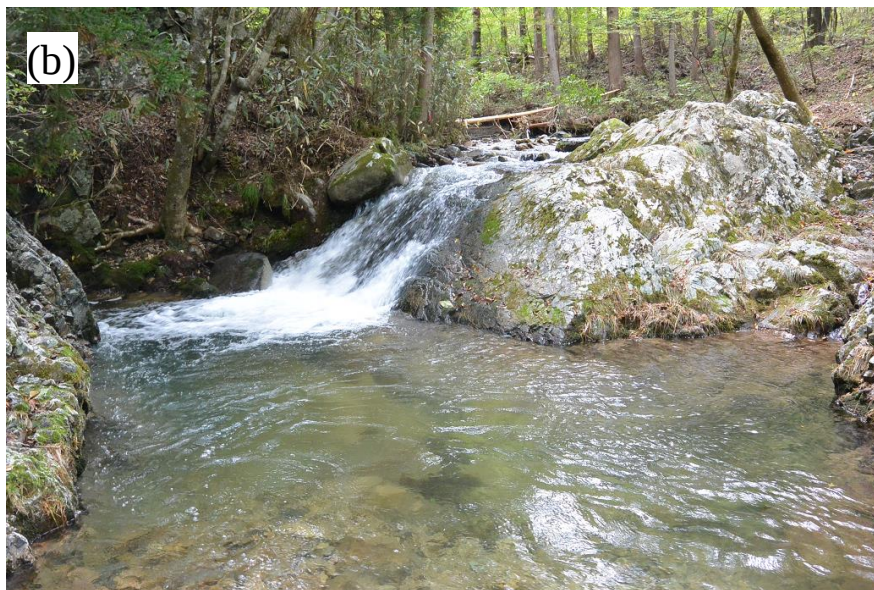


Fig. 4-2. A weir on the Matsumae River (a) and small cascade on the Otohe River (b). Both features represent the upriver distribution limit of adult chum salmon.



Fig. 4-3. Photos of survey river and adult chum salmon. a: Matsumae River, b: Ootobe River.

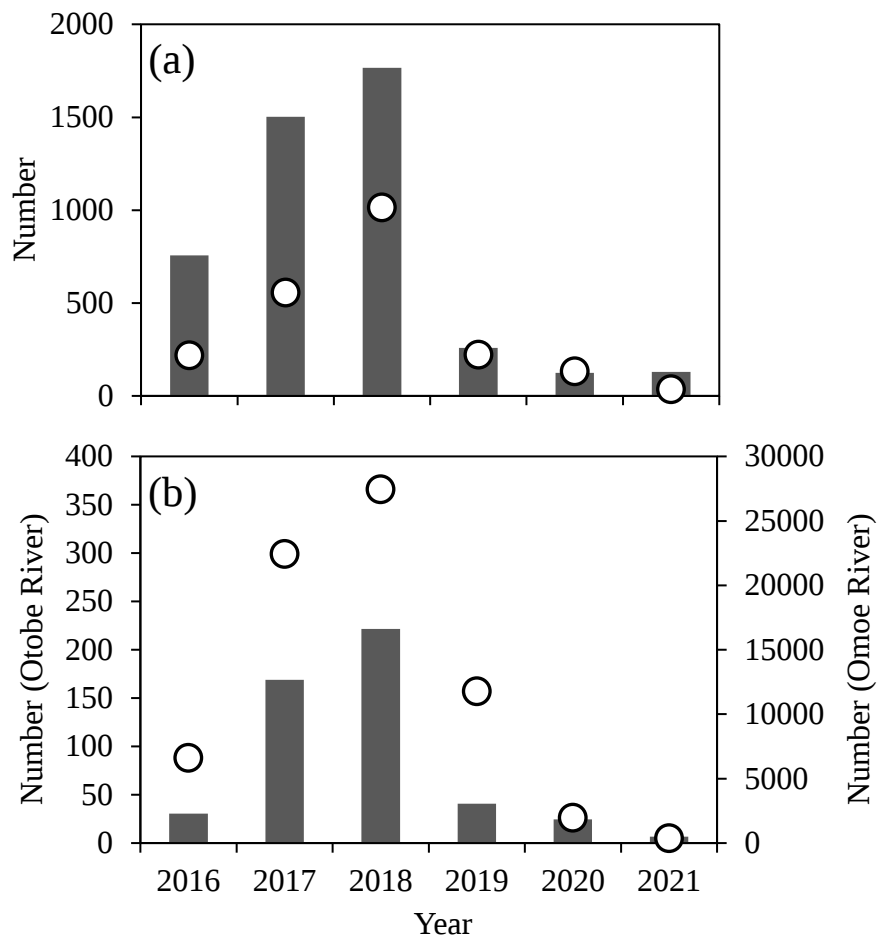


Fig. 4-4. Estimated number of adult chum salmon that migrated to survey rivers (open circles, a: Matsumae River, b: Otohe River). Bars indicate number of adult chum salmon caught in neighboring hatchery rivers (a: Akedo River, b: Omoe River).

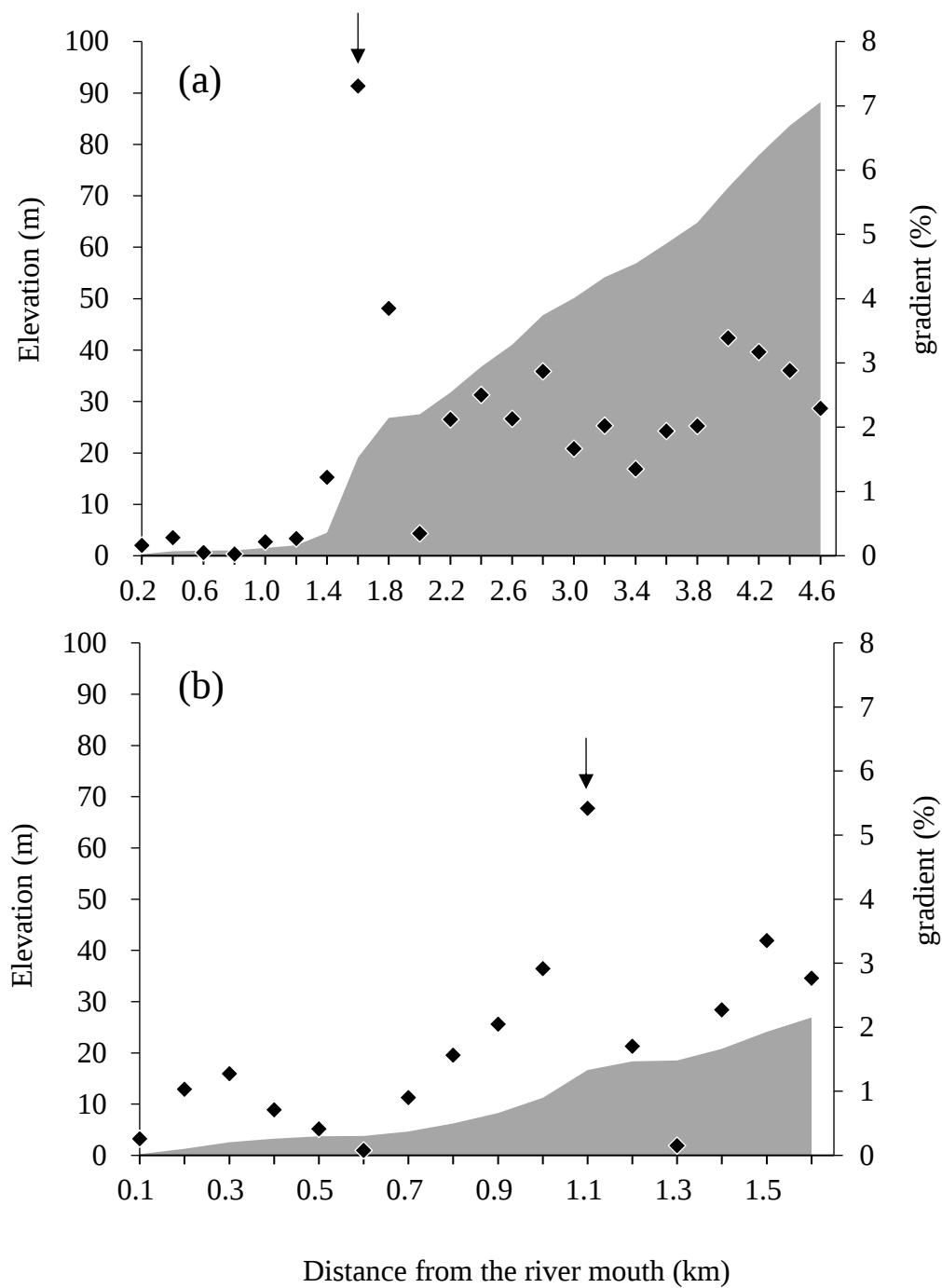


Fig. 4-5. Elevation (gray area) and riverbed gradient (solid diamond) of the Matsumae River (a) and the Otohe River (b). Arrows indicate the local maximum point of riverbed gradient in the studied section.

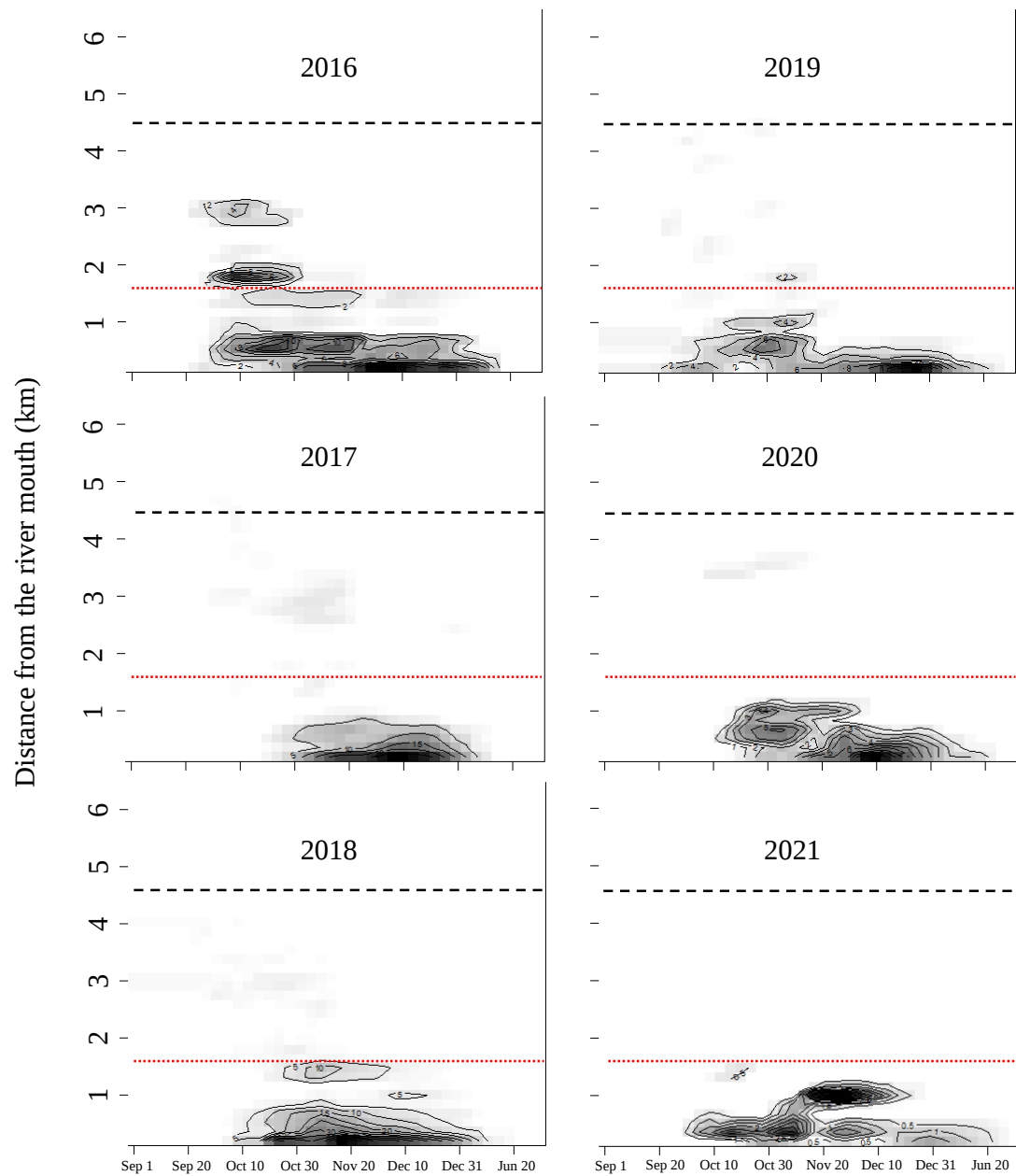


Fig. 4-6. Spatiotemporal distribution of chum salmon spawning redds during 2016–2021 in the Matsumae River. Contours indicate the observed numbers of spawning redds in each 200-m stream section. Dashed and red dotted lines indicate the upriver distribution limit of the adult chum salmon and the local maximum riverbed gradient in the study section, respectively.

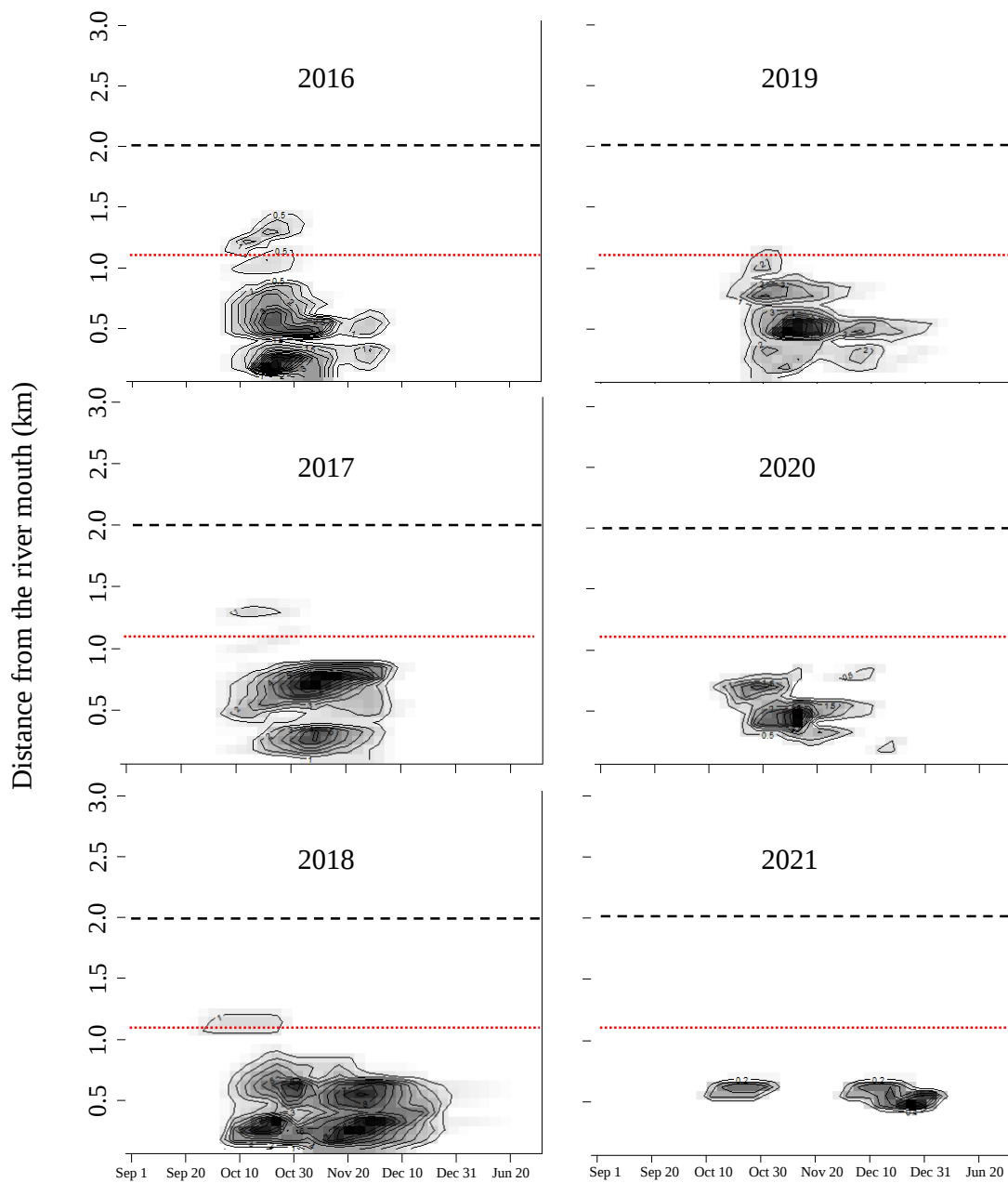


Fig. 4-7. Spatiotemporal distribution of chum salmon spawning redds during 2016–2021 in the Otohe River. Contours indicate the observed numbers of spawning redds in each 100-m stream section. Dashed and red dotted lines indicate upriver distribution limit of the adult chum salmon and the local maximum riverbed gradient in the study section, respectively.

第 5 章 総合考察

5-1 環境変動下における岩手県のサケの現状

第 1 章では、近年（2006-2019 年）は親潮南限が北偏傾向にあり、岩手県沿岸域で南限が変動していること、その結果 3-5 月の平均親潮南限位置とサケ稚魚の平均放流時期が 2006-2016 年放流群の岩手県のサケ回帰数に影響をおよぼすことを示した。第 2 章では、岩手県沿岸において春季に親潮が到達する年の降海群では、サケ稚魚の降海後の湾内での成長速度が高いほど親魚の河川回帰率が高くなり、沿岸水温が高い年に降海した年級群ほど河川回帰率が高くなる傾向が確認された。一方、沿岸に親潮が到達しない年の降海群では、湾内での成長速度が河川回帰率へ及ぼす正の効果は不明瞭になり、沿岸水温が高い年に降海した年級群であっても河川回帰率が低くなることが明らかとなった。また、このような親潮挙動の変動が大きい状況下において、4 月の河川放流群は海中飼育群よりも河川回帰率が一貫して高く、海中飼育では 4 週間飼育群よりも 1 週間飼育群の河川回帰率が高いことが明らかとなった。さらに、河川放流群では、2 月放流群の河川回帰率は 4 月放流群よりも一貫して低いことが明らかとなった。第 3 章では、サバ類の資源量増加と近年の親潮弱勢とともに生じている沿岸海水温上昇の影響により、サバ類の来遊の早期化に伴うサケ幼稚魚の被食が生じていることが初めて明らかとなった。第 4 章では、岩手県沿岸の非放流河川で自然産卵を行う野生サケの資源もふ化放流魚と同様の変動パターンで減少していることが明らかとなった。

以上から、岩手県の人工ふ化放流魚や野生サケの生残には沿岸滞泳期の親潮の挙動が深く関わっているものと推察され、近年は親潮が北

偏することで、サケ稚魚の沿岸域での餌不足、新たな捕食者の出現などを通じて生残への負の影響が顕在化しているものと考えられた。本研究は、分布南限地域におけるサケが最初に受ける影響を多面的に明らかにした最初の知見といえるだろう。今後、海洋温暖化がさらに進行した場合、本研究で観察されたことと類似する現象が我が国のサケの主産地である北海道にも波及する可能性がある。その際の対応を予め検討する際に、本研究の成果は重要な知見を提供すると期待される。

5-2 持続的な資源利用へむけた検討

岩手県では、2011年の東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）の際に、津波によるサケふ化場施設の被災を免れ、ふ化放流を実施した河川では、ふ化放流が実施できなかった河川よりも2011年降海群の親魚が多く回帰したことが確認されている（北川ほか2017）。このことは、資源造成に対するふ化放流事業の重要性をあらためて示すものである。第4章の結果から、現状では自然産卵を行うサケの個体数は非常に少なくなっていること、急峻な河川が多い岩手県沿岸域では、産卵適地が上流まで存在する河川であっても下流域での産卵が中心になるケースが多いと予想されることから、岩手県のサケ資源に占める自然産卵を行う親魚の数は人工ふ化放流魚と比べて少ないことが示唆される。したがって、岩手県においては自然産卵だけで漁獲量を維持することは困難であろう。これらのことから、岩手県において、サケの回帰効果を上げ、資源を持続的に利用するためには、人工ふ化放流による増殖努力の継続が必要であると考えられる。また、ふ化放流魚とは異なる遺伝的特性を持つ可能性がある野生魚の保全は、遺伝的多

様性を維持する観点からも必要である。これらの観点から以下では、本研究で明らかとなった知見を基にして、持続的な資源利用に向けた検討を行う。

5-2-1 放流方法の検討

第2章の結果より、サケ稚魚降海後のわずか数週間の湾内滞泳期間という小さな時空間スケールにおけるサケ稚魚の成長速度が将来の資源サイズに影響を及ぼし得ることが明らかとなった。このことは、人工ふ化放流において、人的な工夫の余地が残されていることを意味している。一方で、春季に親潮が沿岸に到達しない2016年のような環境では、降海初期の成長速度が高いだけでは、回帰率向上への効果を得るのが難しい場合があることが示唆された。その要因の一つとして、サケ稚魚の主要な餌料となっている親潮系動物プランクトンの減少が考えられた。このような餌料が少ない環境へ放流を行う場合、餌をめぐる同種間の競合を避けるために適正な放流数を見積もり、それに応じて放流数を減じること今後必要な検討事項である。

海中飼育を行う際には、現状の4週間海中飼育方法では1週間の海中飼育に比べて成長速度が低下し、回帰率が低下することが示唆された。したがって、回帰率を低下させないために飼育期間を1週間程度の短期間とするか、飼育が4週間に及ぶ場合には生け簀の網の定期的なメンテナンスや飼育密度が過密にならないように管理方法を改善するか、長坂ほか（2023）のように、生簀の網を生簀網の目合いを飼育の途中で大きなものに切り替えるなどの工夫が必要であろう。一連の結果は一部の湾を対象にした結果にすぎないが、同様の湾を多く有する岩手県においては、適用できるケースは複数あると期待される。

第3章の結果より、捕食者であるサバ類の捕食能力が高く、現状のサケの放流体サイズは、サバ類の捕食可能範囲に含まれることが示唆された。Beamish (2022) は、将来的に生き残り、産卵回帰する可能性のある個体の捕食と、初期に十分なエネルギーの貯蔵ができず、捕食によらず将来死亡する運命である個体の捕食とは区別されるべきだとしている。つまり、後者の捕食は最終的には捕食が死亡の要因であるが、本質的には資源量を調節する要因ではないというものである。本研究では大規模な被食は確認されていないことや、岩手県ではサバ類の沿岸への来遊が早期化した 2015 年以前から回帰率は低下し続けていること (Fig. 1) から、サバ類によるサケ稚魚の被食減耗が現在の回帰率低下の要因の大部分を説明するとは考え難い。しかし、サバ類のように資源量が多く、捕食能力に長けている捕食者との遭遇は、本来であればエネルギーを十分に蓄え生残できたはずの個体も被食されてしまう可能性があるという点に注意すべきである。岩手県沿岸へのサバ類の来遊早期化は、海洋温暖化の影響で生じていることが示唆され、今後、海洋温暖化の進行にともない、サケ稚魚の沿岸滞泳期により多くのサバ類が来遊する可能性がある。そのような場合、現在よりもサケ稚魚への捕食圧が高まる可能性があることに留意し、今後も動向を注視していく必要がある。今後、定量的な被食量を見積もり、サケ稚魚の生残に与える影響が無視できないと判断される場合には、例えばサケ稚魚の体サイズがどの程度であればサバ類の被食回避に有効であるかといった情報を取得し、放流時の体サイズに反映させるなど、被食回避策の検討が必要であろう。被食量を正確に見積もるためには両種の分布と個体数および両種の接点の形成機構に関する情報が不可欠である。本研ではこれらいずれも明らかにすることができなかったた

め、サバ類によるサケ稚魚の被食量は不十分にしか見積もられていない。今後は、野外におけるサケ稚魚の検出、定量化へ向けた技術開発が進んでいる環境 DNA (Minegishi et al. 2019) や計量魚群探知機 (Minami et al. 2022; Sawada et al. 2022) などの手法を用いることにより、両種の分布量と接点の形成機構を広範囲に把握することができる期待される。第 3 章の結果から、サバ類の宮古湾沿岸への出現は海水温が 10℃以上になる頃が目安になると推察された。近年の岩手県沿岸では、海水温が 10℃になる時期が 4 月中旬から 5 月下旬であることが多いが、年によっては 1 カ月以上異なることがある (第 2 章 Fig. 2-6 も参照)。したがって、沿岸水温予測情報 (例えば, FRA-ROMS II 改良版我が国周辺の海況予測システム: <https://fra-roms.fra.go.jp/fra-roms/>) 等を活用し、水温が 10℃以上に上昇する前に放流時期を調節することは被食予防の観点から有効であると考えられる。ただし、第 1 章、第 2 章で見たように 2 月の放流は回帰率を向上させる効果が期待できないので、放流時期を早めすぎないように注意が必要である。

5-2-2 野生サケの保全に向けた検討

第 4 章では、岩手県の非放流河川で自然産卵するサケの数が激減していることが明らかとなった。遺伝的多様性を守ることは、それ自体に価値があるだけでなく、漁獲量の安定化にも貢献すると考えられている。例えば、アラスカのベニザケ資源は複数の個体群で構成されており、それぞれの個体群は成熟年齢や回帰時期が異なるという種内の多様性が存在する。そのため、環境変動に対する資源変動の応答は個々の個体群により異なり、そのことが経済学におけるポートフォリオ効果 (分散投資によるリスク低減) に似た役割を果たし、漁獲量全体の

安定性に大きく貢献しているという指摘がある（Schindler et al. 2010）。また、野生魚の遺伝子を人工ふ化放流魚に導入することで回帰率の低下を防止できる可能性があるという指摘もある（Sahashi and Morita 2022）。このような観点から、野生サケを保全していくことは、ふ化放流事業を継続する上でも潜在的に重要な役割を担うと期待される。しかし、個体数が非常に少なくなっている現状では、直ちにこれらの役割を期待するのは難しく、ある程度の数まで回復させることが先決であろう。

近年、ふ化放流事業だけで資源を維持させるのではなく、人工繁殖で生まれた放流魚も自然産卵に加われば子孫を残せるように環境を整え、自然産卵で生まれた野生魚も人工ふ化放流に利用することで家漁化リスクを減らしながら資源管理を行っていく方策（融和方策）が北米では主流となっており、日本でも Morita (2014) によって紹介され、導入が推奨されている。森田（2020）は、日本における融和方策において家魚化リスクを軽減するために目標とすべき数値（PNI）を定め、望ましい値にするために必要な 2 つの行動指針を挙げている。具体的には、「①河川捕獲はふ化事業の種卵確保に必要な親魚数（＝人工ふ化放流計画数）に留める②野生魚への漁獲率を低くし、放流魚への漁獲率を高める。そのための手法としては、回帰した放流魚が沿岸で漁獲されやすいように海中放流を基本とする」というものである。岩手県において、①について、現状では種卵確保数が計画の半分以下の水準に留まっており、捕獲親魚の余剰分を算定するふ化放流計画の策定を直ちに実行するのが難しいと考えられる。しかし、必要な親魚数（すなわち必要な放流数）の見直しは行うべきである。岩手県では 2019 年漁期の河川捕獲数が不振を極めたことにより、人工ふ化放流に供する

種卵の数が減少し、2020年の放流数が平年の半分以下の1.8億尾に半減した（序論参照）。その結果、ふ化場では通常よりも長い期間の飼育が可能となり、平年よりも大型のサケが放流された。その魚が2023年秋に主群の4年魚で回帰する予定である。これらの放流群がどのような回帰率を示すのか注目される。今後、従来よりも放流数が少ない年の放流効果についても情報を蓄積し、経済的に最も効率的な放流数（計画）について精査すべきである。そのうえで、種卵確保に必要な親魚数について、再放流する親魚を一定数確保するという視点を持って見直していく必要がある。②の海中放流についても河川捕獲数が極端に減少している現状では、種卵確保の観点から直ちに実践するのは難しいと考えられるが、実施を検討する際には、第2章で得られた海中飼育の期間に関する知見が役立つと期待される。一方、第2章の結果より、湾内に注ぐ河川の河口付近で実施した1週間海中飼育の河川回帰率は、河川放流群の河川回帰率よりもやや低かったものの、大きく低下しなかった。このことから、湾内の河口付近で実施されることが多い現状の海中飼育では「沿岸で漁獲されやすくする」といった効果を得にくい可能性があるため、海中飼育場所の違いによる河川回帰率の比較検討も必要であろう。

これらに対して、サケが自然産卵できる環境の整備は現状でできることであり、急務である。なぜなら、自然産卵を行うサケが減少するなか、産卵場における河川改修工事が急速に進められているケースが散見されるからである。第4章の結果より、三陸沿岸の非放流河川におけるサケの産卵場所は流域スケールで見た場合、下流域が中心となることが明らかとなった。

。このことは近隣のふ化放流河川である大槌川での自然産卵

(Nobata et al. 2022) とも一致しており、三陸河川の多くに共通するものと推察される。しかし、下流域は河川環境が改変されることが多いため、産卵環境の保全に向けた特段の配慮が必要である。近年、岩手県沿岸河川の下流域では、2011 年の震災時の津波や近年頻発する豪雨による河川の増水により破壊された河岸や周辺道路の復旧のため、水門設置にともなう河岸改修や川幅を拡張する工事が多く実施されている。本研究の対象河川である音部川も例外ではなく、2022 年（本研究は 2021 年まで）から川幅拡張工事が本格化した結果、河川の水深が均一化され、全体的に浅くなった（Fig. 5-1）。その水深は産卵遡上期のサケ親魚の体高（20–25 cm）の半分以下となっているため、遡上に悪影響をもたらすことが心配される。サケの遡上の観点から見れば、適正な水深を確保するように配慮した整備が必要である。また、本研究では河床の礫の大きさや通水性といった微生息環境スケールでの産卵場所の評価を行っていないが、サケの産卵床内の卵の生残は河床の礫サイズを通じた通水性に大きく依存する（鈴木 2008; Iida et al. 2017）。このことから、サケ産卵場所の保全を考えた場合、河川横断工作物の設置等により上流側からの礫の供給を阻害しない、あるいは開発工事等により粒子の細かい土砂を下流側の産卵場所に堆積させないなどの注意も必要であろう。しかし、岩手県の沿岸域の工事では、これらに配慮されたものは皆無といってよい状況であり、サケ稚魚の河川内での生残率低下が心配される。なお、松前川および音部川にはサケ、サクラマス、アメマス（イワナ）、アユ *Plecoglossus altivelis*, ニホンウナギ *Anguilla japonica*, ウグイ, ウキゴリ類 *Gymnogobius* sp., カンキョウカジカ *Cottus hangiongensis*, ミミズハゼ *Luciogobius guttatus*, シマヨシノボリ *Rhinogobius nagoyae*, シロウオ

Leucopsarion petersi などが生息している。これらの種のうち、下流域に優占するウキゴリ類、カンキョウカジカについては、音部川において 2022 年以降本格化した河川改修工事後に生息数が減少していることが確認されている（佐々木未発表）。サケの産卵環境の保全を考えると、サケのみを考慮したものではなく、常にサケ以外の魚類を含めた生態系全体への配慮がなされるべきである。種もしくは生態系の保全に取り組む際に、保全の対象に優占順位をつけ、目標種を定めて保全活動を進めることで限られた時間や資金、労力の下で効率的に保全活動を展開できることが期待される（Muhlenberg et al. 1991; 江戸 2002）。南限のサケは多様な価値を有しているため（峰岸・青山 2019）、保護をアピールする象徴としての魅力を十分に備える。サケの自然産卵環境の保護を基軸として河川生態系を保全・整備していくことが望まれる。同時に、岩手県においても野生魚の必要性を再認識し、ふ化放流事業と一体となって自然産卵河川の資源を復元し、管理していく機運を高めていくことが重要である。そのためには、先ず、本研究を実施した松前川や音部川などの非増殖対象河川の環境を整えていくことが端緒になると期待される。



Fig. 5-1. View of the lowest reach of the Otohe River. Before (a: May 19, 2014) and after (b: March 7, 2022) river alteration.

謝辞

本研究を進めるにあたり，北海道大学北方生物圏フィールド科学センター生態系変動解析分野 宮下和士教授には，終始懇切なるご指導ご鞭撻を賜り，本論文の主査を務めて頂きました。研究を進めるにあたり，困難に直面し立ち止まることもありましたが，その度に親身になりご相談に乗って頂いたからこそ，研究を継続することができました。心より厚く御礼申し上げます。同センター厚岸臨界実験研究所長 仲岡雅裕教授，同センター 清水宗敬教授には本論文の副査を務めて頂き，貴重なご助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。また，同センター生態系変動解析分野 南 憲吏准教授には本論文の副査を務めて頂くとともに，懇切丁寧なご指導と多くの励ましの言葉で背中を押して頂きました。心より厚く御礼申し上げます。

水産研究・教育機構水産資源研究所 八谷三和博士には，研究遂行に際して終始有益なご助言を頂くとともにサンプル採集に多大なるご協力を頂きました。また，本論文執筆に当たり有益なご助言を頂きました。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

旧東北区水産研究所 長倉義智氏には山田湾で採集したサケ稚魚および親魚の耳石温度標識の確認に多大なるご協力を頂きました。心よりお礼申し上げます。岩手県水産技術センター 清水勇一上席専門研究員には，織笠川の回帰親魚の年齢データを提供していただくとともに，山田湾における各種サンプリング採集に多大なるご協力をいただきました。心よりお礼申し上げます。また，岩手県水産技術センター 漁業資源部の皆様，平澤英樹氏をはじめとする三陸やまだ漁業協同組合織笠川サケ人工ふ化場の皆様には，山田湾でのサケ幼稚魚採集や親

魚の耳石、鱗の採集において多大なるご協力を頂きました。ここに記してお礼申し上げます。

水産研究・教育機構水産技術研究所 清水大輔氏，小島大輔博士にはサバ類の採集や胃内容物分析にご協力頂くとともに，有益なご助言を賜りました。深く感謝いたします。小松信治氏をはじめとする，同機構水産資源研究所宮古庁舎の歴代さけます技術職員の方々には，サケ幼稚魚やサバ類の採集および胃内容物分析に際し，多大なるご協力を頂きました。心より厚くお礼申し上げます。同機構水産技術研究所宮古庁舎亜寒帯浅海域グループの村岡大祐博士，八谷光介博士，および同機構水産技術研究所 白藤徳夫博士には，社会人博士課程進学へのご理解と研究へのご助言を賜り，いつも励ましの言葉をかけて頂きました。また，東京海洋大学水圏科学フィールド教育研究センター 松本有記雄准教授には，統計モデルについて有益なご助言を頂きました。各位に深く感謝いたします。

水産研究・教育機構水産資源研究所 斎藤寿彦博士には，岩手県においてサケ研究を始めるきっかけを与えていただきました。深く感謝いたします。また，博士課程進学へのきっかけを与えてくださった同機構水産資源研究所 堀井豊充博士には，学位取得にあたり便宜を図って頂き，激励のお言葉を頂きました。深く感謝いたします。

株式会社生物技研の皆様には，サバ類の胃内容物の DNA 分析においてご協力を頂きました。この場を借りてお礼申し上げます。

最後に，常に温かく見守り続けてくれた父 正史，母 久代に心から御礼申し上げます。そして，長きに渡る社会人博士課程への理解と協力をいただいた妻 千恵，応援してくれた長女 優希に心から感謝します。

本研究は，農林水産技術会議委託事業「食料生産地域再生のための先端技術展開事業」で得られたデータの一部を使用しました。

文献

- Aoyama (2017) Natural spawning of chum salmon *Oncorhynchus keta* within a hatchery stock enhancement program-a case in the Otsuchi River at the Sanriku Coast-. *Coastal Marine Science* 40(1): 1–6.
- Astthorsson OS, Valdimarsson H, Gudmundsdottir A, Óskarsson GJ (2012) Climate-related variations in the occurrence and distribution of mackerel (*Scomber scombrus*) in Icelandic waters. *ICES Journal of Marine Science* 69: 1289–1297.
- 東屋知範・黒田 寛・高橋大介・鵜沼辰哉・横田高士・浦和茂彦 (2018) 流体モデルによるサケ稚魚の回遊シミュレーション. 海洋と生物 40(5): 453–458.
- Bates D, Maechler M, Bolker B, Walker S (2014) *lme4*: Linear mixed-effect models using Eigen and S4. R package version 1.1–23. <http://CRAN.R-project.org/package=lme4>.
- Bates D, Mächler M, Bolker BM, Walker SC (2015) Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software* 67(1): 1–48.
- Bax NJ (1983) Early marine mortality of marked juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) released into Hood Canal, Puget Sound, Washington, in 1980. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 40: 426–435.
- Bax NJ (1998) The significance and prediction of predation in marine fisheries. *ICES Journal of Marine Science* 55: 997–1030.
- Beamish RJ (2004) Evidence that reduced early marine growth is associated

with lower marine survival of Coho salmon. *Transactions of the American Fisheries Society* 133: 26–33.

Beamish RJ, Mahnken C (2001) A critical size and period hypothesis to explain natural regulation of salmon abundance and the linkage to climate and climate change. *Progress in Oceanography* 49: 423–437.

Beamish R (2022) The need to see a bigger picture to understand the ups and downs of Pacific salmon abundances. *ICES Journal of Marine Science* 79: 1005–1014.

Bolyen E, Rideout JR, Dillon MR, Bokulich NA, Abnet CC, Al-Ghalith GA, Alexander H, Alm EJ, Arumugam M, Asnicar F, Bai Y, Bisanz JE, Bittinger K, Brejnrod A, Brislawn CJ, Brown CT, Callahan BJ, Caraballo-Rodríguez AM, Chase J, Cope EK, Silva RD, Diener C, Dorrestein PC, Douglas GM, Durall DM, Duvallet C, Edwardson CF, Ernst M, Estaki M, Fouquier J, Gauglitz JM, Gibbons SM, Gibson DL, Gonzalez A, Gorlick K, Guo J, Hillmann B, Holmes S, Holste H, Huttenhower C, Huttley GA, Janssen S, Jarmusch AK, Jiang L, Kaehler BD, Kang KB, Keefe CR, Keim P, Kelley ST, Knights D, Koester I, Kosciulek T, Kreps J, Langille MGI, Lee J, Ley R, Liu YX, Loftfield E, Lozupone C, Maher M, Marotz C, Martin BD, McDonald D, McIver LJ, Melnik AV, Metcalf JL, Morgan SC, Morton JT, Naimey AT, Navas-Molina JA, Nothias LF, Orchanian SB, Pearson T, Peoples SL, Petras D, Preuss ML, Priesse E, Rasmussen LB, Rivers A, Robeson MS, Rosenthal P, Segata N, Shaffer M, Shiffer A, Sinha R, Song SJ, Spear JR, Swafford AD, Thompson LR, Torres PJ, Trinh P, Tripathi A, Turnbaugh PJ, Ul-

- Hasan S, Hooft JJJ, Vargas F, Vázquez-Baeza Y, Vogtmann E, Hippel M, Walters W, Wan Y, Wang M, Warren J, Weber KC, Williamson CHD, Willis AD, Xu ZZ, Zaneveld JR, Zhang Y, Zhu Q, Knight R, Caporaso JG (2019) Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2. *Nature Biotechnology* 37: 852–857.
- Brett JR, Shelbourn JE, Shoop CT (1969) Growth Rate and Body Composition of Fingerling Sockeye Salmon, *Oncorhynchus nerka*, in relation to temperature and ration size. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 26(9): 2363–2394.
- Collis K, Roby DD, Craig DP, Adamany S, Adkins JY, Lyons DE (2002) Colony size and diet composition of piscivorous waterbirds on the lower Columbia River: Implications for losses of juvenile salmonids to avian predation. *Transactions of the American Fisheries Society* 131: 537–550.
- Darbyson E, Swain DP, Chabot D, Castonguay M (2003) Diel variation in feeding rate and prey composition of herring and mackerel in the southern Gulf of St. Lawrence. *Journal of Fish Biology* 63: 1235–1257.
- Dunmall KM, McNicholl DG, Zimmerman CE, Gilk-Baumer SE, Burril S, VonBiela VR (2022). First juvenile chum salmon confirms successful reproduction for Pacific salmon in the North American Arctic. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 79: 703–707.
- 江戸謙顕（2002）希少種保全のための調査研究ーイトウを例としてー.

- (多賀光彦 監修) 生物と環境. 三共出版, 東京, pp67–117.
- Fujiwara Y, Kawato M, Poulsen JY, Ida H, Chikaraishi Y, Ohkouchi N, Oguri K, Gotoh S, Ozawa G, Tanaka S, Miya M, Sado T, Kimoto K, Toyofuku T, Tsuchida S (2021) Discovery of a colossal slickhead (Alepocephaliformes: Alepocephalidae): an active-swimming top predator in the deep waters of Suruga Bay, Japan. *Scientific Reports* 11:2490.
- Fukuwaka M Suzuki T (2002) Early sea mortality of mark–recaptured juvenile chum salmon in open coastal waters. *Journal of Fish Biology* 60: 3–12.
- Gordon A, Hannon GJ (2010) Fastx-toolkit. FASTQ/A short-reads preprocessing tools. https://hannonlab.cshl.edu/fastx_toolkit/
- Guisan A, Edwards TC, Hastie JT (2002) Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological Modelling* 157: 89–100.
- 花井孝之 (1999) II 尾叉長と第 1 背鰭基底長による判別指数. (中央水産研究所 編集) マサバ・ゴマサバ判別マニュアル. 神奈川, pp 10-15.
- Hanawa K, Mitsudera H (1987) Variation of water system distribution in the Sanriku Coastal Area. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*. 42: 435–446.
- Healey MC (1982) Timing and relative intensity of size–selective mortality of juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) during early sea life. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 39: 952–957.
- Hida Y, Ohmoto K, Yatsuya M, Sato S (2022) Releases of otolith marked

- salmon from Japan between summer of 2020 and spring of 2021. NPAFC Documents 2028: 1–22.
- Hilborn R, Bue BG, Sharr S (1999) Estimating spawning escapements from periodic counts: a comparison of methods. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 56: 888–896.
- Hiyama Y, Nose Y, Shimizu M, Ishihara T, Abe H, Sato R, Maiwa T, Kajihara T (1972). Predation of chum salmon fry during the course of its seaward migration- II . Otsuchi River investigation 1964 and 1965. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries* 38(3): 223–229.
- Honda K, Kawakami T, Suzuki K, Watanabe K, Saito T (2017) Growth rate characteristics of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* originating from the Pacific coast of Japan and reaching Konbumori, eastern Hokkaido. *Fisheries Science* 83: 987–996.
- Honda K, Sato T, Kuroda H, Saito T (2021) Initial growth characteristics of poor-return stocks of chum salmon *Oncorhynchus keta* originating from the Okhotsk and Nemuro regions in Hokkaido on the basis of scale analysis. *Fisheries Science* 87: 653–663.
- Iida M, Imai S, Katayama S (2017) Effect of riverbed conditions on survival of planted eyed eggs in chum salmon *Oncorhynchus keta*. *Fisheries Science* 83: 291–300.
- Iida M, Yoshino K, Katayama S (2018) Current status of natural spawning of chum salmon *Oncorhynchus keta* in rivers with or without hatchery stocking on the Japan Sea side of northern Honshu, Japan. *Fisheries Science* (2018) 84: 453–459

Iino Y, Kitagawa T, Abe T, Nagasaka T, Shimizu Y, Ota K, Kawashima T, Kawamura T (2022) Effect of food amount and temperature on growth rate and aerobic scope of juvenile chum salmon. *Fisheries Science* 88: 397–409.

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.

石山信雄・渡辺恵三・永山滋也・中村太士・劔持浩高・高橋浩揮・丸岡昇・岩瀬晴夫 (2009) 河床の岩盤化が河川性魚類の生息環境に及ぼす影響と礫河床の復元に向けた現地実験の評価. 応用生態工学 12(1): 57–66.

伊藤外夫・石田行正 (1998) 鱗相によるさけ・ます類の種の同定と年齢査定. 遠洋水産研究所研究報告 35: 131–153.

Iwata M, Komatsu S (1984) Importance of estuarine residence for adaptation of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) fry to seawater. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 41: 744–749.

岩手県 (1983) I 既利用河川調査. 昭和 56 年度さけます資源増大対策調査報告書 pp 1–38.

岩手県 (2023) 2 回帰率の動向. 令和元年度岩手県のさけ・ますに関する資料. pp 1–38.

岩手県内水面水産技術センター (2009) サケふ化飼育管理の手引き平成 20 年度改訂版. pp 1–33.

岩手県水産技術センター (2021) (1) 秋サケ増殖に関する研究. 令和 2 年度岩手県水産技術センター年報. pp 2–5.

Joshi NA, Fass JN (2011) Sicklet: A sliding-window, adaptive, quality-based trimming tool for FastQ files (Version 1.33) [Software].

<https://github.com/najoshi/sickle>

Kaeriyama M (2022) Warming climate impacts on production dynamics of southern populations of Pacific salmon in the North Pacific Ocean. *Fisheries Oceanography* doi: 10.1111/fog.12598.

Kaeriyama M, Seo H, Kudo H (2009) Trends in run size and carrying capacity of Pacific salmon in the North Pacific Ocean. *North Pacific Anadromous Fish Commission Bulletin* 5: 293–302.

帰山雅秀・泰 玉雪 (2015) 三陸沿岸のシロザケ個体群の回復に向けて.
(上田宏編) 三陸のサケ―復興のシンボル―北海道大学出版会,
札幌, pp85–99.

帰山雅秀 (2005) 水辺生態系の物質輸送に果たす遡河回遊魚の役割.
日本生態学会誌 55: 51–59.

甲斐幹彦・塚原洋平・橋本 緑 (2021) 時空間統計モデルおよび R パッケージ VAST の概要と国際水産資源への適用事例. 日本水産学会誌 87(4): 334–337.

Kamimura Y, Taga M, Yukami R, Watanabe C, Furuichi S (2021) Intra-and inter-specific density dependence of body condition, growth, and habitat temperature in chub mackerel (*Scomber japonicus*). *ICES Journal of Marine Science* 78(9): 3254–3264.

Kaneko N, Taniyama N, Inatani Y, Nagano Y, Fujiwara M, Torao M, Miyakoshi Y, Shimizu M (2015) Circulating insulin-like growth factor I in juvenile chum salmon: relationship with growth rate and changes during downstream and coastal migration in northeastern Hokkaido, Japan. *Fish Physiology and Biochemistry* 41: 991–1003.

Kaneko N, Torao M, Koshino Y, Fujiwara M, Miyakoshi Y, Shimizu M (2019)

Evaluation of growth status using endocrine growth indices, insulin-like growth factor (IGF)-I and IGF-binding protein-1b, in out-migrating juvenile chum salmon. *General and Comparative Endocrinology* 274: 50–59.

Kasugai K, Sakamoto H, Miyakoshi Y, Nagata M (2018) Returns of chum salmon released from net-pens and rivers in Eastern Hokkaido, Japan. *North American Journal of Fisheries Management* 38: 24–38.

片寄 剛・佐藤直司・森 俊彰・難波信由・後藤友明・朝日田 卓 (2020) 岩手県南部の砂浜域砕波帯におけるチカ *Hypomesus Japonicus* 仔稚魚の出現動態とその変動要因. 日本水産学会誌 86(6): 450–459.

川端 淳・中神正康 (2008) 北西太平洋における近年のゴマサバ資源の増加と1歳魚以上の分布, 回遊. 黒潮の資源海洋研究 9: 61–66.

川崎 健 (1968) マサバ太平洋系群未成魚の生態について. 東海区水産研究所研究報告 55: 59–114.

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 40(4): 342–345.

川島時英・石井光廣・片山知史 (2017) 耳石横断薄片法を用いたマサバの年齢査定の有効性. 水産技術 9(2): 45–51.

Keleher CJ, Rahel FJ (1996) Thermal limits to salmonid distribution in the Rocky Mountain region and potential habitat loss due to global warming: a geographic information system (GIS) approach. *Transactions of the American Fisheries Society* 125: 1–13.

Kitada S, Kishino (2021) Population structure of chum salmon and selection

on the markers collected for stock identification. *Ecology and evolution* 11(20): 13972–13985.

北川貴士・川上達也・野畑重教・峰岸有記・伊藤元裕・大竹二雄・青山潤・兵藤 晋（2017）通し回遊魚に対する震災の影響．日本水産学会誌 83(4): 681–684.

北野文明・中野 繁・前川光司・小野有五（1995）河川型オショロコマの流程分布に対する水温の影響および地球温暖化による生息空間の縮小予測．野生生物保護 1(1): 1–11.

Koshino Y, Kudo H, Kaeriyama M (2013) Stable isotope evidence indicates the incorporation into Japanese catchments of marine-derived nutrients transported by spawning Pacific Salmon. *Freshwater Biology* 58: 1864–1877.

Kruse GH (1998) Salmon run failures in 1997–1998: A link to anomalous ocean conditions? *Alaska Fishery Research Bulletin* 5(1): 55–63.

黒田 寛・戸谷夕子・和川 拓・児玉琢哉・澤田浩一・松浦知彦・安部幸樹・長谷川浩平・向井 徹・山田雄一郎・八谷三和（2018）第1章 生残率向上のための放流方法の開発．（二階堂英城・堀井豊光編）三陸サケ回帰率向上のための放流技術の高度化実証研究総括報告書，国立研究開発法人水産研究・教育機構，神奈川，pp3–51.

Kuroda H, Saito T, Kaga T, Takasuka A, Kamimura Y, Furuichi S, Nakanowatari T (2020) Unconventional sea surface temperature regime around Japan in the 2000s–2010s: Potential influences on major fisheries resources (2020) *Frontiers in Marine Science* 7: 574904.

- Kuroda H, Toya Y, Kakehi S, Setou (2020) Interdecadal variations of the Oyashio and extreme cold water events near the Japanese coast from the 1960s to the 2010s. *In*: Chen C-TA, Guo X (eds) Changing Asia-Pacific marginal seas. Springer, pp217–244.
- LaLanne JJ, Safsten G (1969) Age determination from scales of chum salmon (*Oncorhynchus keta*). *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 26(3): 671–681.
- Leray M, Yang JY, Meyer CP, Mills SC, Agudelo N, Ranwez V, Boehm JT, Machida RJ (2013) A new versatile primer set targeting a short fragment of the mitochondrial COI region for metabarcoding metazoan diversity: application for characterizing coral reef fish gut contents. *Frontiers in Zoology* 10: 34. doi: 10.1186/1742-9994-10-34.
- Lisi PJ, Schindler DE, Bentley KT, Pess GR (2013) Association between geomorphic attributes of watersheds, water temperature, and salmon spawn timing in Alaskan streams. *Geomorphology* 185: 78–86.
- Magoc T, Salzberg SL (2011) FLASH: Fast length adjustment of short reads to improve genome assemblies. *Bioinformatics* 27: 2957–2963.
- 真山 紘・関 二郎・清水幾太郎 (1983) 石狩川産サケの生態調査II. 1980年及び 1981 年春放流稚魚の降海移動と沿岸帯での分布回遊. 北海道さけ・ますふ化場研究報告 37: 1–22.
- Minami K, Shirakawa H, Kawauchi Y, Shao H, Tomiyasu M, Iwahara Y, Tsuda Y, Takahara H, Zhu Y, Miyashita K (2022) Estimating target strength of young chum salmon (*Oncorhynchus keta*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 79: 195–199.

- Minegishi Y, Wong MKS, Kanbe T, Araki H, Kashiwabara T, Ijichi M, Kogure K, Hyodo S (2019) Spatiotemporal distribution of juvenile chum salmon in Otsuchi Bay, Iwate, Japan, inferred from environmental DNA. *PLOS ONE* 14(9): e0222052.
- 峰岸有紀・青山 潤 (2019) 三陸におけるサケ資源像の再構築. 日本生態学会誌 69:201–207.
- 宮腰靖之・永田光博・安藤大成・藤原 真・青山智哉 (2013) 北海道東部網走沿岸におけるサケおよびカラフトマス幼稚魚の魚類捕食者. 北海道水産試験場研究報告 83: 41–44.
- 宮腰靖之・藤原 真・安藤大成・永田光博 (2016) 北海道東部の河川と海中に放流したサケの回帰と河川遡上率. 北海道水産試験場研究報告 89: 9–15.
- 宮腰靖之・卜部浩一・安藤大成・實吉隼人・青山智哉・坂本博幸・春日 潔・永田光博 (2011) 北海道におけるサケ自然産卵個体群の分布 (資料). 北海道水産試験場研究報告 80: 51–64.
- Miyama T, Minobe S, Goto H (2021) Marine heatwave of sea surface temperature of the Oyashio region in summer in 2010–2016. *Frontiers in Marine Science* 7: 576240.
- Morita K (2014) Japanese wild salmon research: toward a reconciliation between hatchery and wild salmon management. *NPAFC newsletter*, 35: 4–14.
- Morita K, Nakashima A (2015) Temperature seasonality during fry out-migration influences the survival of hatchery-reared chum salmon *Oncorhynchus keta*. *Journal of Fish Biology* 87: 1111–1117.
- 森田健太郎・平間美信・宮内康行・高橋 悟・大貫 努・大熊一正 (2013a)

- 北海道千歳川におけるサケの自然再生産効率. 日本水産学会誌 79(4): 718–7203.
- 森田健太郎・高橋 悟・大熊一正・永沢 亨 (2013b) 人工ふ化放流河川におけるサケ野生魚の割合推定. 日本水産学会誌 79(2): 206–213.
- 森田健太郎 (2015) 漁業の特性と生物の適応. (日本生態学会編) 人間活動と生態系. 共立出版, 東京, pp149–166.
- 森田健太郎 (2016) 人間活動の歴史と漁獲量変動. (日本生態学会編) 海洋生態学, 東京, pp206–208.
- 森田健太郎 (2020) サケを食べながら守り続けるために. 日本水産学会誌 86(3): 180–183.
- Moss JH, Beauchamp DA, Cross AD, Myers KW, Farley EV, Murphy JJM, Helle JH (2005) Evidence for size-selective mortality after the first summer of ocean growth by pink salmon. *Transactions of the American Fisheries Society* 134: 1313–1322.
- Moulton LL (1997) Early marine residence, growth, and feeding by juvenile salmon in northern Cook Inlet, Alaska. *Alaska Fishery Research Bulletin* 4(2): 154–177.
- 村山 司・三谷 勇・青木一郎 (1995) 卵巣成熟度及び卵巣組織像に基づくマサバ太平洋系群の産卵期の推定. 水産海洋研究 59(1): 11–17.
- Mühlenberg M, Hovestadt T, Röser J (1991) Are there minimal area for animal populations? In: Seitz A, Loeschcke V (eds) *Species Conservation*. Birkhäuser Verlag, Basel, pp 227–264.
- 長坂剛志・岡部聖・清水勇一 (2023) 岩手県山田湾におけるサケ稚魚

の海中飼育方法の改良試験．岩手県水産技術センター研究報告
10: 7–10.

Nagasawa K (1998) Fish and seabird predation on juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) in Japanese coastal waters, and an evaluation of the impact. *North Pacific Anadromous Fish Commission Bulletin* 1: 480–495.

中村太士 (1999) ダム構造物が水辺林の更新動態に与える影響．応用生態工学 2(2): 125–139.

中東明佳・川端 淳・高須賀明典・久保田洋・岡村 寛・大関芳沖 (2010) 黒潮親潮移行域および親潮域におけるマサバおよびゴマサバの胃排出速度と日間摂餌量の推定．水産海洋研究 74(2): 105–117.

梨田一也・三谷卓美 (2006) 足摺岬周辺海域のゴマサバの成熟と水温．水産総合研究センター研究報告 4: 9–124.

Neave F, Yonemori T, Bakkala RG (1976) Distribution and origin of chum salmon in offshore waters of the North Pacific Ocean. *International North Pacific Fisheries Commission Bulletin* 35: 1–79.

Nobata S, Sato K, Houki S, Ito M, Aoki Y, Kitagawa T, Hyoudo S (2022) Straightforward upriver migration to spawning sites by chum salmon *Oncorhynchus keta* homing to coastal short rivers in the Sanriku region. *Journal of Fish Biology* 100: 748–757.

Nøttestad L, Diaz J, Penã H, Søliland H, Huse G, Fernø A (2016) Feeding strategy of mackerel in the Norwegian Sea relative to currents, temperature, and prey. *ICES Journal of Marine Science* 73(4): 1127–1137.

- 落合 明・田中 克 (1998) ゴマサバ. 新版魚類学 (下) 改訂版 (落合 明・田中 克編). 厚生社厚生閣, 東京, pp 844–855.
- 小川 元・清水勇一 (2012) 東日本大震災からの岩手県さけ増殖事業の復興と資源回復の課題. 日本水産学会誌 78(5): 1040–1043.
- Ohkuma K (2007) Coastal migration and survival of juvenile chum salmon estimated from laboratory analysis their maximum sustainable swimming speed. *North Pacific Anadromous Fish Commission Technical Report 7*: 64–65.
- 奥西 武・横内克己・長谷川大介・田中雄大・瀬藤 聡・由上龍嗣・黒田 寛・渡邊一功・高須賀明典 (2020) 東北近海におけるマサバ漁場形成と水温変動の関係. 水産海洋研究 84(4): 271–284.
- Overholtz WJ, Hare JA, Keith CM (2011) Impacts of interannual environmental forcing and climate change on the distribution of Atlantic mackerel on the US northeast continental shelf. *Marine and Coastal Fisheries* 3: 219–232.
- Peyronnet A, Friedland KD, Maoileidigh NO, Manning M, Poole WR (2007) Links between patterns of marine growth and survival of Atlantic salmon *Salmo salar*. *Journal of Fish Biology* 71: 684–700.
- Phillips EM, Horne JK, Zamon JE (2021) Characterizing juvenile salmon predation risk during early marine residence. *PLOS ONE* 16(2): 30247241.
- Rodionov SN (2009) Use of prewhitening in climate regime shift detection. *Geophysical Research Letters* 33: L12707. doi:10.1029/2006GL025904.
- Sahashi G, Morita K (2022) Wild genes boost the survival of captive-bred

- individuals in the wild. *Frontiers in Ecology and the Environment* 20(4): 217–221.
- Saito T, Kaga T, Seki J, Otake T (2007) Otolith microstructure of chum salmon *Oncorhynchus keta*: formation of sea entry check and daily deposition of otolith increments in seawater conditions. *Fisheries Science* 73: 27–37.
- Saito T, Nagasawa K (2009) Regional synchrony in return rates of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) in Japan in relation to coastal temperature and size at release. *Fisheries Research* 95: 14–27.
- Saito T, Shimizu I, Seki J, Nagasawa K (2009) Relationship between zooplankton abundance and the early marine life history of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* in eastern Hokkaido, Japan. *Fisheries Science* 75: 303–316.
- 斎藤寿彦・岡本康孝・佐々木 系 (2015) 日本系サケの生物学的特性. 水産総合研究センター研究報告 39: 85–120.
- 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 40(4): 319–329.
- 斎藤寿彦 (2000) 幌内川におけるサケの自然繁殖：他のサケ科魚類との産卵床形成の空間的隔離. さけ・ます資源管理センター研究報告 3: 15–24.
- 堺 茂樹・石川清広・笹本 誠・平山健一 (1991) 岩手県中小河川の河口変動特性. 水工学論文集 35: 217–224.
- Salo, EO (1991) Life history of chum salmon (*Oncorhynchus keta*). In: Groot C, Margolis L (eds) Pacific Salmon Life Histories. UBC Press, Vancouver, pp233–309.

- 佐藤俊平，浦和茂彦（2015）日本系サケの遺伝的個体群構造．水産総合研究センター研究報告 39: 21-47.
- 佐藤俊平，森田健太郎（2019）北海道におけるサケ野生魚の遺伝的特徴．日本生態学会誌 69: 209-217.
- 佐藤裕二・飯塚景記・久保田清吾（1975）東北海区沿岸および近海域に分布するマサバをめぐる魚種間関係．東北区水産研究書研究報告 35: 1-13.
- 佐藤裕二・飯塚景記・小滝一三（1968）東北海区におけるマサバ *Pneumatophorus japonicus*（HOUTTUYN）の漁業生物学的特性について．東北区水産研究所研究報告 28: 1-50.
- Sawada K, Matsuura T, Fukuda Y (2022) Target strength of juvenile salmon, *Oncorhynchus keta*, for acoustic monitoring. *Journal of the Marine Acoustics Society of Japan*. 49(2): 46-67.
- Schindler DE, Hilborn R, Chasco B, Boatright CP, Quinn TP, Rogers LA, Webster MS (2010) Population diversity and the portfolio effect in an exploited species. *Nature* 465: 609-612.
- 関 二郎（1978）気仙沼付近におけるサケの生態-II 沿岸域の混獲稚魚の成長と餌料生物．宮城県気仙沼水産試験場研究報告 4: 10-18.
- 関 二郎（2013）さけます類の人工孵化放流に関する技術少史（放流編）．水産技術 6(1): 69-82.
- 清水勇一（2015）岩手県のシロザケ漁業の歴史と現状．（上田宏編）三陸のサケ―復興のシンボル―北海道大学出版会，札幌，pp11-16.
- Skaret G, Bachiller E, Langøy H, Stenevik EK (2015) Mackerel predation on herring larvae during summer feeding in the Norwegian Sea. *ICES Journal of Marine Science* 72(8): 2313-2321.

- Stabeno PJ, Bond NA, Kachel NB, Salo SA, Schumacher JD (2001) On the temporal variability of the physical environment over the south-eastern Bering Sea. *Fisheries Oceanography* 10(1): 81–98.
- 鈴木俊哉（2008）自然再生産を利用したサケ資源保全への取り組み．*SALMON 情報* (2): 3–5.
- Sveegaard S, Nabe-Nielsen J, Stæhr K-J, Jensen TF, Mouritsen KN, Teilmann J (2012) Spatial interactions between marine predators and their prey: herring abundance as a driver for the distributions of mackerel and harbor porpoise. *Marine Ecology Progress Series* 468: 245–253.
- 高山 肇・岡本康寿・小原 聡・佐藤信洋・金田壽夫（1997）豊平川産シロザケの河川回帰数の推定方法についての試案．札幌市豊平川さけ科学館館報 9: 49–57.
- 玉手 剛・大本謙一・佐々木 系・八谷三和（2019）三陸沿岸小河川下流域における野生サケ稚魚の生息密度と体サイズ．*魚類学雑誌* 66(2): 211–216.
- Tomaro LM, Teel DJ, Peterson WT, Miller JA (2012) When is bigger better? Early marine residence of middle and upper Columbia River spring Chinook salmon. *Marine Ecology Progress Series* 452: 237–252.
- 虎尾 充・竹内勝巳・佐々木義隆・春日井 潔・村上豊・永田光博（2010）当幌川におけるカラフトマス放流魚と野生魚の降河生態．北海道立水産孵化場研究報告 64: 7–15.
- Torao M (2022) Effect of water temperature on the feed intake, growth, and feeding efficiency of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* after seawater transfer. *Aquaculture Science* 70(1): 97–106.
- Tsou TS, Collie JS (2001) Predation-mediated recruitment in the Georges

Bank fish community. *ICES Journal of Marine Science* 58: 994–1001.

辻本哲郎 (1999) ダムが河川の物理的環境に与える影響－河川工学及び水理学的視点から－. 応用生態工学 2(2): 103–112.

浦和茂彦 (2000) 日本系サケの回遊経路と今後の研究課題. さけ・ます資源管理センターニュース 5: 3–9.

Utne KR, Huse G, Ottersen G, Holst JC, Zabavnikov V, Jacobsen JA, Oskarsson G J, Nøttestad L (2012) Horizontal distribution and overlap of planktivorous fish stocks in the Norwegian Sea during summers 1995–2006. *Marine Biology Research* 8: 420–441.

Vega SL, Sutton TM, Murphy JM (2017) Marine-entry timing and growth rates of juvenile chum salmon in Alaskan waters of the Chukchi and northern Bering seas. *Deep-Sea Research II* 135:137–144.

Wagawa T, Kuroda H, Ito S, Kakehi S, Yamanome T, Tanaka K, Endoh Y, Kaga S (2015) Variability in water properties and predictability of sea surface temperature along Sanriku coast, Japan. *Continental Shelf Research* 103: 12–22.

Wagawa T, Tamate T, Kuroda H, Ito S, Kakehi S, Yamanome T, Kodama T (2016) Relationship between coastal water properties and adult return of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) along the Sanriku coast, Japan. *Fisheries Oceanography* 25: 598–609.

Watanabe C, Nishida H (2002) Development of assessment techniques for pelagic fish stocks: applications of daily egg production method and pelagic trawl in the Northwestern Pacific Ocean. *Fisheries Science* 68 (suppl 1): 97–100.

- 渡邊千夏子・花井孝之・目黒清美・荻野隆太・木村 量 (1999) 1 日当たり総産卵量によるマサバの資源量推定. 日本水産学会誌 65: 695–702.
- Wells BK, Santora JA, Henderson MJ, Warzybok P, Jahncke J, Bradley RW, Huff DD, Schroeder ID, Nelson P, Field JC, Ainley DG (2017) Environmental conditions and prey-switching by a seabird predator impact juvenile salmon survival. *Journal of Marine Systems* 174: 54–63.
- Wertheimer AC, Thrower FP (2007) Mortality rates of chum salmon during their early marine residency. *American Fisheries Society Symposium* 57: 233–247.
- Worm B, Myers RA (2003) Meta-analysis of cod-shrimp interactions reveals top-down control in oceanic food webs. *Ecology* 84: 162–173.
- Yamada Y, Sasaki K, Yamane K, Yatsuya M, Shimizu Y, Nagakura Y, Kurokawa T, Nikaido H (2019) The utilization of cold-water zooplankton as prey for chum salmon fry (*Oncorhynchus keta*) in Yamada Bay, Iwate, Pacific coast of northern Japan. *Regional Studies in Marine Science* 29: 100633.
- 柳井清治・河内香織・伊藤絹子 (2006) 北海道東部河川におけるシロザケの死骸が森林－河川生態系に及ぼす影響. 応用生態工学 9(2): 167–178.
- Yasuda T, Nagano N, Kitano H (2018) Diel vertical migration of chub mackerel: preliminary evidence from a biologging study. *Marine Ecology Progress Series* 598: 147–151.
- Yatsuya M, Sasaki K, Shimizu Y, Ohta K, Yamane K, Yamada Y, Moriyama

S, Nagakura T, Nikaido H (2018) Effects of duration of net-pen acclimation and timing of river stocking on early growth and adult return of chum salmon along the Pacific Coast of Honshu, Japan. *North Pacific Anadromous Fish Commission Technical Report* 11: 127–128.

横内克巳・奥西 武・長谷川大介・相生信彦・佐藤俊昭・増田義男・矢倉浅黄・荒井将人・大森健策・由上龍嗣 (2023) 三陸・常磐海域における沿岸水温を用いたマサバ定置網の漁期開始予報. 水産技術 15(2): 13–19.

由上龍嗣・西嶋翔太・上村泰洋・古市 生・井須小羊子・渡部亮介 (2021a) 令和 2 (2020) 年度マサバ太平洋系群の資源評価. 我が国周辺水域の漁業資源評価. 水産庁・水産研究・教育機構, 東京, 53 pp.

由上龍嗣・西嶋翔太・上村泰洋・古市 生・井須小羊子・渡部亮介 (2021b) 令和 2 (2020) 年度ゴマサバ太平洋系群の資源評価. 我が国周辺水域の漁業資源評価. 水産庁・水産研究・教育機構, 東京, 47 pp.