

h. 【サケ幼稚魚の耳石日周輪解析】

h-1. 北海道太平洋沿岸域（資源生態部 本多健太郎）

【目的】

耳石日周輪解析による降海・成長履歴の把握や調査データの分析などを通じて、放流魚（耳石温度標識魚）の生残条件について検討する。北海道太平洋沿岸域では、これまでのモニタリング結果から降海後西側海域で採集される個体の存在が認められており（Saito et al. 2013）、すべての個体が降海後直線的にオホーツク海まで向かうわけではないことがわかっている。しかしながら、何割の個体が、どのような個体が、どこまで西側に向かうのか、そして何割が東側に戻って来られるのかといった知見は得られていない。近年親魚の来遊不振が続く北海道太平洋側では、幼稚魚の生残を考える上でこのような情報の収集・蓄積は不可欠である。

【方法】

北海道太平洋沿岸域で採集された耳石温度標識魚を供試魚とした。同一河川起源且つ同一年級で河口の東西の採集地点で 10 尾以上採集された群のみを対象とし、十勝川起源で 2013 年、2016 年、2019 年に室蘭・虎杖浜、厚賀・春立、昆布森で採集された群と静内川起源で 2019 年、2020 年、2021 年に同地点で採集された群が該当した（図 1）。耳石温度標識の確認に使用しなかった耳石を用いて、Honda et al. (2017) の方法に従い、降海時の尾叉長（以下、FL）、降海月日、降海から採集までの日数を推定し、降海後の成長速度（採集時 FL-降海時 FL）/降海から採集までの日数）を評価した。ただし、降海チェックが不明瞭で、降海日を特定するための微量元素分析が必要なサンプルは含まれない（分析後追加予定）。各群が採集された地点（方角）に応じた降海履歴（降海日・降海時 FL）や成長速度の特徴の有無に注目した。

【結果及び考察】

各群において、採集日や採集時 FL は採集地点の違いによって偏りがあり、それに伴って推定した降海日や降海時 FL も偏った（図 2）。例えば、十勝川起源で 2019 年に昆布森で採集された個体の多くは 7 月以降に 90 mm FL 以下で採集されており、そのような個体の降海履歴は同年に厚賀・春立で採集された個体の降海履歴の分布と異なった。また、2021 年に室蘭・虎杖浜で採集された静内川起源個体の多くは採集時 FL が 80 mm 以下と小さく偏り、降海履歴も昆布森採集群と比べて早期・小型に偏った。一方で、十勝川起源群では、厚賀・春立採集個体と昆布森採集個体の降海履歴の分布が一部で重複しており、同時期に同体サイズで降海した魚が東西どちらにも向かうことが示された。

各群の成長速度は総じて東方に位置する昆布森採集群で速く偏る傾向にあったが、十勝川起源群では厚賀・春立採集群と昆布森採集群との間で傾向は年によって異なった（図 3）。室蘭・虎杖浜採集群の成長速度はいずれも低く偏り、昆布森採集群との降海履歴の重複度合いも低かった（図 2）。体サイズ・成長依存減耗理論を基準に（Honda et al. 2017, 2020）、回遊の目的地であるオホーツク海により近い昆布森で採集した群の降海履歴や成長速度をより“望ましい”とするのであれば、あるいは昆布森採集群の中に西側に回遊した後に戻って採集された個体が含まれると仮定するならば、室蘭・虎杖浜採集群はその後減耗しやすい集団であったと考えられる。室蘭・虎杖浜採集群では夜間の灯下採集によるサンプリングバイアスの存在が疑われるため、本結果は成長の遅い小型個体が選択的に採集されたことに起因するのかもしれない。静内川起源の室蘭・虎杖浜採集群の中には降海後 15 日以内に採集された個体が 18 尾確認された。このような個体は、室蘭・虎杖浜までの最短路 100 km を沿岸親潮の影響を受け、受動的に移動した可能性も考えられる。一方で、2019 年に厚賀・春立で採集された静内川起源群では、降海後採集されるまでの日数が 30 日を超えた個体が 87.5% (21/24) を占めた。厚賀・春立はどちらも静内川河口から十数 km しか離れていない

ため、これらの個体の中には西側海域から戻ってきた個体も含まれるのかもしれない。

本解析で用いた各群のサンプルサイズは十分ではなく、ゆえに本結果が各群の代表値であるとは言えない。しかしながら、一定数の幼稚魚が 100 km 以上も西側の海域に移動することは明白であり、特に 2021 年の虎杖浜では、期間中に採集した無標識魚を含むサケ幼稚魚計 259 尾の内 53 尾 (20.5%) が静内川起源であった (3)-①-2. えりも以西地区を参照)。生残に求められる降海条件 (履歴) の許容範囲が年によっては極めて狭い中 (Saito 2022)、西側に移動した個体の特徴やその後の挙動を探ることは、幼稚魚の減耗メカニズムを理解する上で引き続き欠かせない。

【引用文献】

- Honda K., et al. (2017) Growth rate characteristics of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* originating from the Pacific coast of Japan and reaching Konbumori, eastern Hokkaido. Fish. Sci. 83: 987-996.
- Honda K., et al. (2020) Sea-entry conditions of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* that improve post-sea-entry survival: a case study of the 2012 brood-year stock released from the Kushiro River. Fish. Sci. 86: 783-792.
- Saito T., et al. (2013) The dispersal pattern of juvenile chum salmon in the Pacific Ocean off the Coast of Hokkaido, Japan. NPAFC Tech. Rep. 9: 21-22.
- Saito T. (2022) Optimum timing and size at release of chum salmon: Improving survival by modifying hatchery practices. Fish. Oceanogr. <https://doi.org/10.1111/fog.12585>

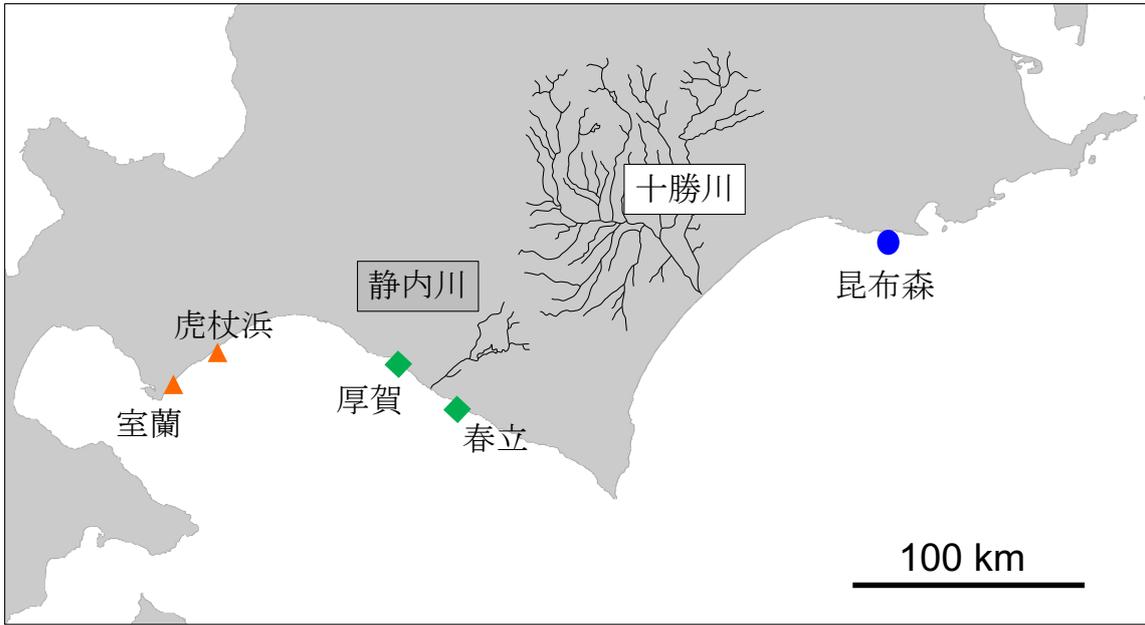


図 1. サケ幼稚魚の起源河川と採集地点

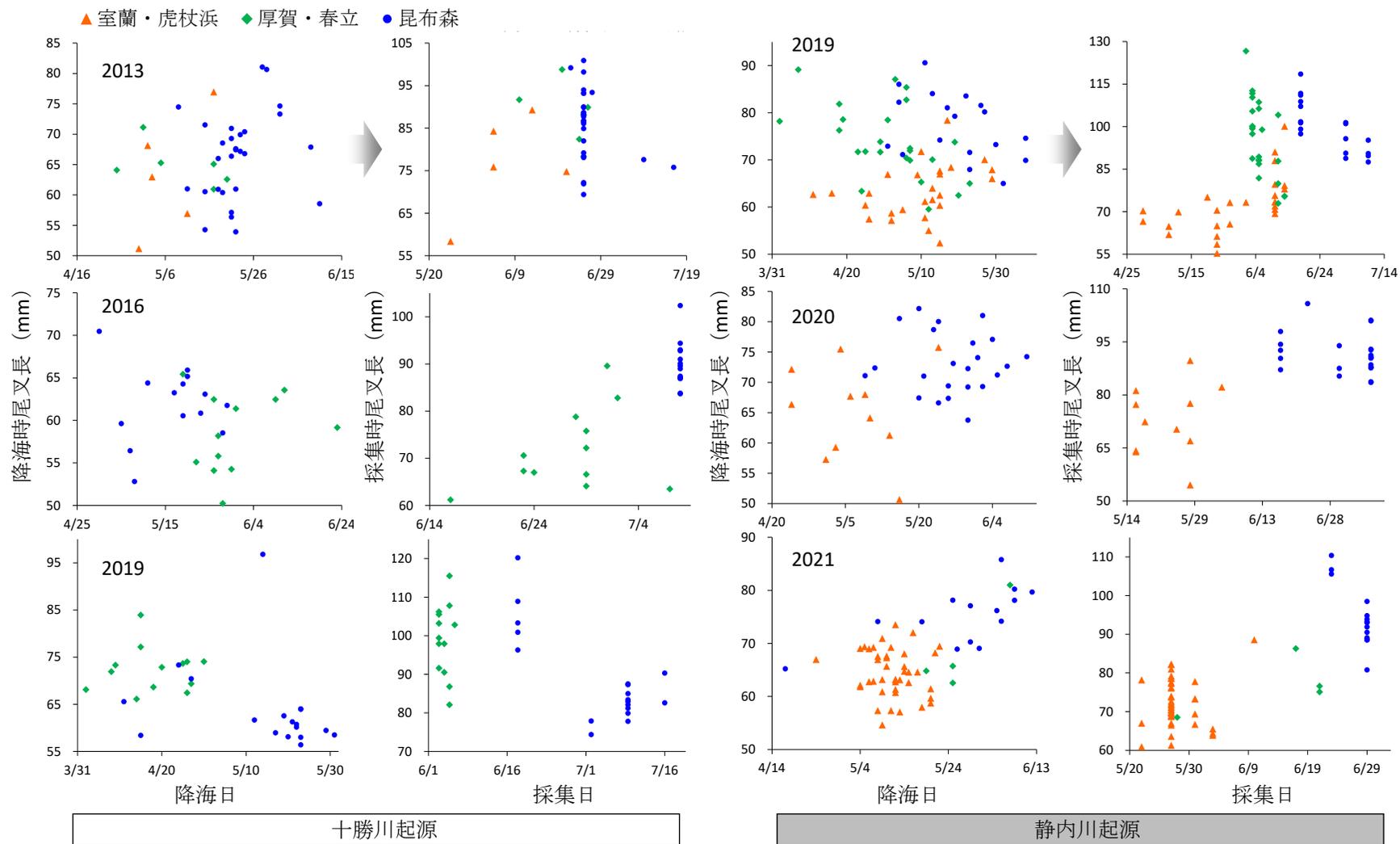


図 2. 十勝川 (左)・静内川 (右) 起源のサケ幼稚魚の採捕年別推定降海日と降海時の尾叉長および採集日と採集時の尾叉長の関係

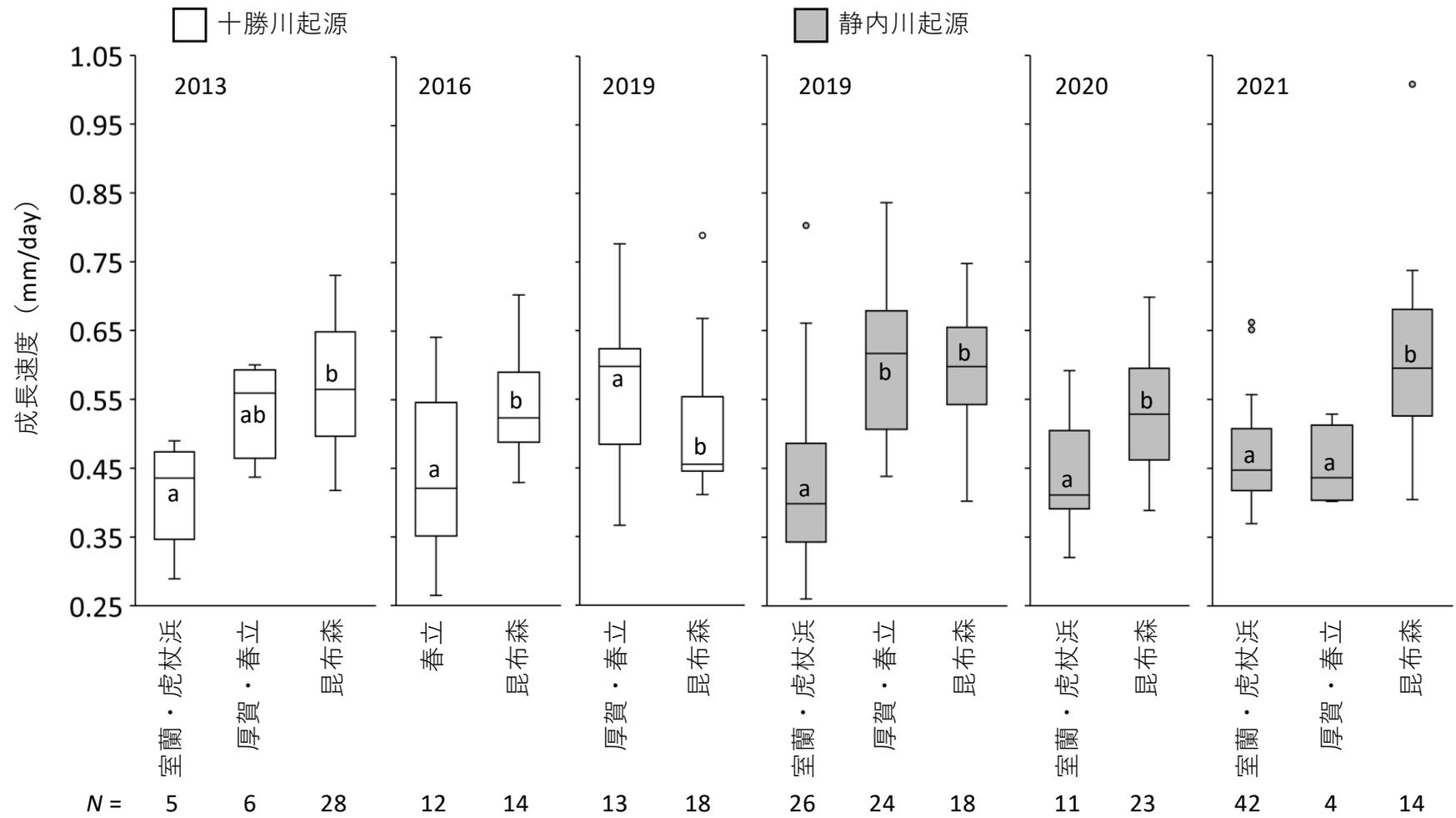


図 3. 十勝川・静内川起源のサケ幼稚魚の採集年・採集地点別成長速度 (箱ひげ図)。各グラフ中のアルファベットは統計学的な有意差を表す。

h-2. 北海道日本海厚田沿岸域（資源生態部 斎藤寿彦）

【目的】

耳石日周輪解析による降海・成長履歴の把握や調査データの分析などを通じて、放流魚（耳石温度標識魚）の生残条件について検討する。

【方法】

日本海側の厚田沿岸域で採集された耳石温度標識魚を主な供試魚とした。耳石温度標識の確認に使用しなかった耳石を用いて、既往の方法により降海時の尾叉長（以下、FL）、降海月日、降海から採捕までの日数を推定し、降海後の成長速度（（採集時 FL-降海時 FL）/降海から採捕までの日数）を評価した。厚田沿岸域では、これまでのモニタリング結果から、単位漁獲努力量当たりの幼稚魚採集数と当該年級の親魚の河川回帰数に正の相関関係が認められている。この結果は、放流魚の年級群豊度（回帰数の多寡）が厚田沿岸到達までの生残りに大きく依存していることを示唆している。今年度は、2020年に採集された耳石温度標識魚（2019年級）の標識パターン（ハッチコード：以下、HC）について降海履歴の推定を実施し、2016～2018年級との比較を行った。

最近の研究によれば、沿岸域で高成長を遂げたサケ幼稚魚は初期生残も良い可能性が指摘されている（例えば、Honda et al. 2017, 2019）。そこで、沿岸域で高成長を獲得する要因を検討する目的で、本事業で分析した2016～2019年級の採集個体について、個体の成長速度に、降海月日や降海サイズがどのように影響するかを明らかにするため、成長速度を従属変数、調査年、調査年の平均動物プランクトン湿重量、降海月日、降海サイズ、沿岸滞泳期間（降海月日から採集月日までの日数）および耳石温度標識HCを説明変数とする一般化加法モデルを構築した。モデル選択（説明変数の組み合わせ）は、赤池情報量規準（以下、AIC）により検討し、AICが最小となるモデルを採択した。なお、構築するモデルの誤差分布は全てガンマ分布を仮定した。

【結果及び考察】

2020年の厚田沿岸域では、3月27日から5月26日までの期間に、用船調査を7回実施し、のべ26回の曳網調査により667尾のサケ幼稚魚が採集されている（森下ほか2021）。耳石温度標識を確認した結果、石狩川（豊平川含む）から放流された標識魚は44.8%を占めていた（森下ほか2021）。本分析では、これら石狩川の標識魚のうち、調査日および調査定点ごとに最大20～30尾を無作為抽出したものを耳石日周輪解析のサンプルとした。分析に用いたサンプルの放流履歴、採集履歴および耳石日周輪解析の結果を表1に示す。

耳石日周輪解析の結果、推定された降海日は3月19日から5月3日に及んだ。このうち、実際の放流日以前に降海したと推定された個体は、HC 2-2-3Hの3尾（最も早い放流月日との差：平均5日、範囲1-10日）、2-3-2Hの1尾（最も早い放流月日との差：6日）、2,3-3Hの1尾（最も早い放流月日との差：1日）および2,3-3Hの2尾（最も早い放流月日との差3日、範囲1-5日）であった。しかし、これらの個体は推定降海日と実際の放流日との乖離が平均4日ほどと僅かであったことから、日周輪解析の測定誤差が推定結果に与える影響は軽微であるものと考え、これらの個体も含めて以後の分析を行うことにした。

2020年に採集された個体の成長速度（降海から再捕までの体成長）は平均0.44～0.78 mm/日と推定された。2019年に採集された標識魚では、標識群ごとに平均成長速度と沿岸域での回収率との関係を調べたところ、両者に統計学的に有意な正の相関が認められた（斎藤ほか2021）。同様の分析を2020年の採集魚について実施したが、標識群ごとの平均成長速度と回収率の間には統計学的に有意な関係は認められなかった（スピアマンの順位相関： $\rho = 0.19$, $p > 0.05$ ）。したがって、2019年に観察されたような成長速度の大きな標識群ほど沿岸での回収率が高くなるという傾向は、2020年には認められなかった。

2017～2020年の厚田沿岸における成長速度を比較した結果、成長速度の年平均値は2017年 > 2019年 = 2020年 > 2018年の順番で大きいことがわかった（図1、クラスカルウォ

リステスト： $\chi^2=113.45$ 、 $df=3$ 、 $p < 0.0001$ 、[多重比較] ボンフェローニ補正によるウィルコクソン順位和検定： $p < 0.0001$ ～1)。なお、成長速度の最も大きかった2017年の採集魚（2016年級）は、2021年に放流河川である石狩川水系千歳川に5年魚として回帰している。2021年の河川回帰親魚について、耳石温度標識の確認作業はまだ終了していないが、鱗から推定した年齢別河川捕獲数から判断すると、5年魚までの河川捕獲数で比較した場合、2016年級は当該河川で全数標識が開始された2001年級以降で2番目に多い捕獲数を記録した模様である。すなわち、幼稚魚期に高い成長速度を獲得したことで初期生残が高まり、結果として親魚としての回帰も多くなった可能性が示唆される。

成長速度を従属変数とする一般化加法モデルを検討するため、様々な説明変数を組み合わせた全64モデルを検討した（表2）。モデル選択の結果、上位7モデルには降海サイズ、降海月日および沿岸滞泳期間の3変数が説明変数として含まれていた。図2に、これらのモデルの、成長速度に対する放流サイズ、降海月日および沿岸滞泳期間の効果をそれぞれ示す。降海月日の効果はM字型を呈し、1月1日からの日数で85～89日（すなわち、3/27～29）の期間に成長速度に対して若干プラスの効果が認められるが、90日（3/30）からは負の効果へと転じ、106日（4/17）に再度プラスの効果となって以降は日を追うごとにプラス効果が増加した。次に降海サイズは成長速度に対して線形の関係が認められ、降海サイズFL46.2mm以上で成長速度に対してプラスの効果を与えた可能性が示された。また、沿岸滞泳期間は降海直後からしばらくの期間は成長速度に対してマイナスの効果として作用するものの、19日以降はプラスの効果が日増しに増大する傾向が認められた。なぜ、降海直後の約3週間弱の期間、成長速度にマイナスの効果が認められるのか明確な理由を指摘することは困難であるが、もしかしたら降海直後は海水への馴致など淡水とは異なる環境への適応が必要となるため、成長の一時的な停滞が生じるのかもしれない。

本年度の検討により、石狩川産のふ化場魚はFL46.2mm以上のサイズで4/17以降に降海した場合に成長速度に対してプラスの効果がある可能性が示された。真山ほか（1982）は、石狩川における標識魚の追跡調査から、4月上旬に放流される盛期群は、そのほとんどが放流後10日以内の短期間に河川内で成長することなく降海することを報告している。したがって、4月上旬にFL46.2mm以上のサイズで放流を行うことが、降海後の成長速度の獲得に寄与し、ひいては初期生残を向上させる可能性があるものと考えられる。

【引用文献】

- Honda K., et al. (2017) Growth rate characteristics of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* originating from the Pacific coast of Japan and reaching Konbumori, eastern Hokkaido. Fish. Sci., 83: 987-996.
- Honda K., et al. (2019) First report of growth rate of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* captured in the Sea of Okhotsk offshore. Ichthyol. Res., 66: 155-159.
- 真山 紘ほか. (1982) 石狩産サケの生態調査-I 1979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, 1-17.
- 森下 匠ほか. (2021) 3)-1-1. 【厚田沿岸域】令和2年度さけ・ます等栽培対象資源対策事業 さけ・ますふ化放流抜本対策 調査報告書. 42-45.
- 斎藤寿彦ほか. (2021) 3)-1-4. 【サケ幼稚魚の耳石日周輪解析】令和2年度さけ・ます等栽培対象資源対策事業 さけ・ますふ化放流抜本対策 調査報告書. 53-55.

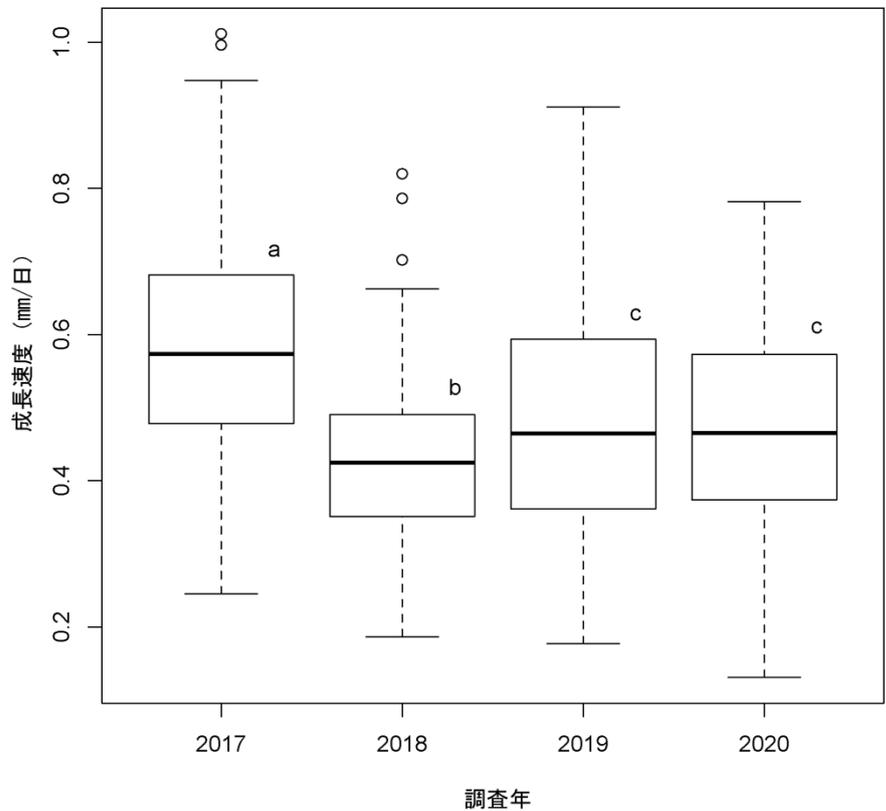


図 1. 厚田沿岸で採集された石狩川産サケ幼稚魚の成長速度（箱ひげ図）
 グラフ中のアルファベットは統計学的な有意差を表す。

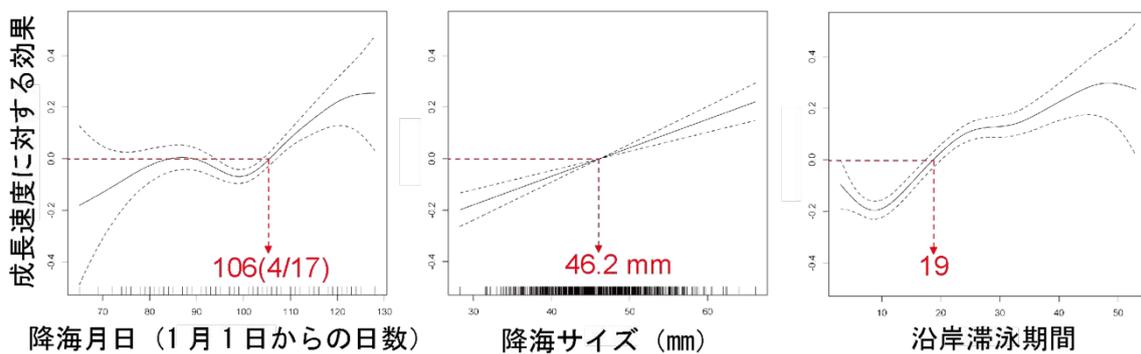


図 2. 厚田沿岸で 2017～2020 年に採集された石狩産サケ幼稚魚の成長速度に影響を及ぼす
 要因 表 2 のモデル #64 において認められた、降海月日、降海サイズ及び沿岸滞泳期間
 と成長速度の関係を示す。それぞれ説明変数が赤字以上の値のとき、成長速度にプラス
 の効果が作用する。

表 1. 2020 年厚田沿岸域で採集された石狩川水系起源の標識サケの放流履歴、採集履歴及び日周輪解析結果

ハッチ コード	放流履歴			厚田での採集履歴				耳石日周輪解析の結果			
	放流月日	放流サイズ* ³ (mm)	放流数 (千尾)	採集月日	再捕数	再捕サイズ* ¹ (mm)	回収率* ²	標本数	推定降海日* ¹	推定降海* ¹ サイズ(mm)	成長速度* ¹ (mm/日)
2-2-3H	2020/4/3~13	49.28	12,422	4/8~5/26	124	55.00 (37.32-77.16)	9.98	95	4/13 (3/25-4/27)	46.14 (34.15-57.00)	0.44 (0.19-0.68)
2-3-2H	2020/4/24	48.00	1,007	5/8~26	8	57.43 (50.71-70.37)	7.94	8	4/26 (4/19-5/3)	45.46 (38.84-54.09)	0.53 (0.40-0.67)
2-3, 3H	2020/4/16	47.40	1,895	4/26~5/19	26	50.26 (36.07-65.92)	13.72	22	4/20 (4/16-4/27)	42.48 (35.08-49.09)	0.45 (0.13-0.62)
2, 2n, 3H	2020/3/3	49.20	1,339	4/24~5/8	6	65.72 (50.81-79.06)	4.48	6	3/27 (3/21-4/9)	49.00 (41.03-54.22)	0.50 (0.33-0.78)
2, 3-3H	2020/3/23~4/1	48.41	11,865	3/27~5/19	105	57.16 (36.40-94.76)	8.85	82	4/8 (3/19-4/25)	46.83 (34.27-62.29)	0.50 (0.20-0.95)
2, 4n, 3H	2020/3/12	49.00	1,307	3/27~5/8	5	55.67 (44.27-84.24)	3.83	4	3/23 (3/19-3/26)	46.76 (39.23-53.23)	0.50 (0.31-0.70)
2, 6n, 3H	2020/3/24	50.00	1,310	4/8~5/19	13	60.67 (44.27-85.45)	9.92	10	4/2 (3/25-4/8)	46.16 (38.76-55.72)	0.52 (0.36-0.78)
2-2H* ⁴	2020/3/19~5/!	-	85.6	5/8	1	85.16	11.68	1	4/5	58.57	0.78

*1：表中の数値は測定値あるいは推定値の平均を、括弧内はその範囲をそれぞれ示す。降海日が放流日より早く推定されたケースを含む

*2：回収率= (再捕数/放流数) × 10⁻⁶

*3：同一ハッチコードの群が複数日にわたって放流されている場合は放流数による加重平均で放流サイズを算出

*4：札幌市豊平川さけ科学館からの放流

表 2. 2017～2020 年に厚田沿岸域で採集した石狩川産サケ幼稚魚 (n = 827) における成長速度を従属変数とする一般化加法モデル (モデル選択) 全モデル 64 のうち上位 10 モデルを示す。説明変数の ”+” はモデルに採択された変数を表す。HC はハッチコードの違いを、s()はスプライン関数をそれぞれ示す。モデルの誤差項はガンマ分布を仮定。

モデル#	説明変数							GCV	AIC	Δ AIC	モデルにより説明された デビアンズ%	統計学的に有意 (p<0.05) な説明変数
	定数	HC	調査年	動物プランクトン	s(沿岸滞泳期間)	s(降海サイズ)	s(降海月日)					
64	-0.7046	+	+	+	+	+	+	0.054693	-1259.9	0	47.80%	s(沿岸滞泳期間)、s(降海サイズ)、s(降海月日)、定数
58	-0.7046	+			+	+	+	0.054693	-1259.9	0	47.80%	HC、s(沿岸滞泳期間)、s(降海サイズ)、s(降海月日)、定数
62	-0.7046	+		+	+	+	+	0.054693	-1259.9	0	47.80%	s(沿岸滞泳期間)、s(降海サイズ)、s(降海月日)、定数
60	-0.6006	+	+		+	+	+	0.054693	-1259.9	0	47.80%	HC、s(沿岸滞泳期間)、s(降海サイズ)、s(降海月日)、定数
59	-0.5837		+		+	+	+	0.054635	-1259	0.97	45%	調査年、s(沿岸滞泳期間)、s(降海サイズ)、s(降海月日)、定数
61	-0.7299			+	+	+	+	0.054635	-1259	0.97	45%	動物プランクトン、s(沿岸滞泳期間)、s(降海サイズ)、s(降海月日)、定数
63	-0.7637		+	+	+	+	+	0.054635	-1259	0.97	45%	動物プランクトン、s(沿岸滞泳期間)、s(降海サイズ)、s(降海月日)、定数
47	-0.7707		+	+	+		+	0.056791	-1226.6	33.37	42.60%	動物プランクトン、s(沿岸滞泳期間)、s(降海月日)、定数
43	-0.5622		+		+		+	0.056791	-1226.6	33.37	42.60%	調査年、s(沿岸滞泳期間)、s(降海月日)、定数
45	-0.7548			+	+	+	+	0.054635	-1226.6	33.37	45.00%	動物プランクトン、s(沿岸滞泳期間)、s(降海サイズ)、s(降海時海水温)、定数

GCV: 一般化クロス・バリデーション規準

AIC: 赤池情報量規準

Δ AIC: AIC 最小モデルとの当該モデルの AIC との差