

カラフトマス稚魚の成長適水温：サケ稚魚との比較飼育実験の試み（短報）

虎尾 充

北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場

Optimal growth temperatures of juvenile pink salmon: A trial of comparative rearing experiments with chum salmon (Short paper)

MITSURU TORAO

Salmon and Freshwater Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization,
Eniwa, Hokkaido 061-1433, Japan

The effects of seawater temperature on feeding and growth in juvenile pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) and chum salmon (*O. keta*) were examined in a controlled rearing experiment. Fish were fed *Artemia* to satiation for 10 days at six seawater temperatures (4, 8, 10, 13, 18, and 23 °C). We estimated the temperatures at which food intake (FI), specific growth rate in body weight and fork length (SGR_{BW} and SGR_{FL}), and feeding efficiency (FE) reached their highest values. For pink salmon, maximum FI occurred at 16.1 °C, maximum SGR_{BW} at 14.8 °C, maximum SGR_{FL} at 14.4 °C, and maximum FE at 10.5 °C. For chum salmon, the corresponding temperatures were 17.7 °C, 16.3 °C, 16.7 °C, and 13.0 °C. Although both species inhabit similar coastal temperature ranges, our results suggest that the optimal growth temperature for juvenile pink salmon is slightly lower than that for chum salmon. Further studies are required to refine these temperature estimates and improve their reliability.

キーワード： *Oncorhynchus gorbuscha*, *Oncorhynchus keta*, 瞬間成長率, 水温, 摂餌効率

カラフトマス *Oncorhynchus gorbuscha* とサケ *O. keta* は北海道において重要な沿岸漁業資源である。しかし、2010年代以降、両種とも来遊資源は急激に減少し、近年は低水準で推移している（佐橋, 2025; 渡邊・本多, 2025）。特にカラフトマスの資源減少はサケに比べても急速で、漁業資源消失の危機的な状況である。

カラフトマスとサケを含む太平洋サケ属魚類では、海洋生活初期の減耗が年級群豊度に大きな影響を与えると考えられており（Beamish, 2022; Farley Jr, *et al.*, 2024）、この時期の生残には成長率の高さが関わっている可能性がある（Honda *et al.*, 2017, 2019）。沿岸域でのカラフトマスとサケ稚魚の分布と成長は、表面海水温（Sea surface temperature, SST）の影響を強く受け、両種とも SST 5～13 °C に分布する（Ando *et al.*, 2005; Fujiwara *et al.*, 2007; Nagata *et al.*, 2007a, 2007b）。稚魚分布時期の北海道沿岸海域の SST は 2000 年代以降に低くなる傾向が見られた

が、2010 年代に入ると低水温から高水温への急激な昇温がしばしば見られるようになった（Saito and Miyakoshi, 2018）。また、サケ稚魚の沿岸域での成長には餌生物量が密接に関係しており（Saito *et al.*, 2009）、粒子追跡シミュレーションを用いた研究では、サケ稚魚の成長率に影響する主要な要因は動物プランクトン現存量であり、海水温上昇に伴う動物プランクトンの種類と量の変化がサケの生残に影響している可能性が示唆されている（Chang *et al.*, 2025）。これらのことから、カラフトマスとサケ稚魚の成長にとっての適水温期間の短縮と、稚魚にとっての適当な餌生物の減少が稚魚の成長率を低下させ、海洋生活初期の生残率の低下につながっている可能性がある。

一般的に、摂餌量と成長には魚種によって最適な水温がある（Brett, 1979; Jobling, 1994）。サケ稚魚でも、摂餌量（Food intake, FI）、瞬間成長率（Specific growth rate, SGR）、摂餌効率（Food efficiency, FE）はいずれも低水温

で低く、閾値を超えた高水温で低下することが明らかとなっており (Torao, 2022), これらは水温と摂餌、成長の関係性を評価する指標となり得る。資源減少の著しいカラフトマスはサケ稚魚と沿岸域で同じ水温帯に分布し食性も近い (Fujiwara *et al.*, 2007; Nagata *et al.*, 2007b) が、サケ稚魚と異なる成長適水温を持つ可能性がある。しかし、カラフトマス稚魚では、Mortensen and Savikko (1993) による限られた水温条件下での報告の他には、温度と摂餌の相互作用が成長に及ぼす影響を検証した報告は見当たらない。本研究では、海水移行後のカラフトマス稚魚とサケ稚魚を対象に、水温が FI・SGR・FE に及ぼす影響を比較し、両種の成長適水温の違いを明らかにすることを目的とした。

試料及び方法

供試魚 試験に用いたカラフトマスはオホーツク西部地区の頓別川で 2024 年 9 月 6 日および 16 日に採卵された卵から得た。(一社) 宗谷管内さけ・ます増殖事業協会の頓別孵化場で管理されていた発眼卵を、北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場の飼育施設に輸送し、浮上まで立体式孵化器で管理した。2025 年 1 月に浮上した稚魚は、アトキンス水槽 (長さ 3.26 m × 幅 0.33 m × 高さ 0.33 m) に収容し、給餌飼育を開始した。飼育水には河川水 (水温範囲 7.6℃～9.3℃) を掛け流しで使用し、海水飼育実験開始まで市販の仔稚魚用配合飼料 (ニューアルテック K1 および K2, 日清丸紅飼料株式会社, 東京) を飽食量与えた。サケ稚魚は、2024 年 9 月 13 日に北海道日本海側の石狩川の支流千歳川にある千歳川孵化場で採卵された卵から得た。受精卵は直ちに飼育施設に輸送し立体式孵化器に収容した。受精卵は、孵化まで冷却水循環装置 (CTP-3000, 東京理化機器株式会社) で 12℃ に加温した用水で、孵化後は河川水 (水温範囲 8.2℃～10.7℃) で管理した。12 月に浮上した稚魚は、アトキンス水槽に収容し、カラフトマスと同様に給餌飼育を行った。

海水飼育実験 飼育実験は、カラフトマスとサケそれぞれで、3 水温区ずつ 2 回に分けて合計 6 水温区を設定した。冷却水循環装置で水温を 8.5℃ (淡水飼育時の平均水温) に調整した恒温水槽内に、32% に調整した人工海水 (テトラマリンソルトプロ, スペクトラム ブランズ ジャパン株式会社, 横浜市) を満たし外部濾過装置 (テトラバリュー EX フィルタ VX75, スペクトラム ブランズ ジャパン株式会社) を備えた 38L ガラス水槽 (45 × 30 × 32 cm) を設置した。これを 3 セット作成し、1 回目の実験ではそれぞれ 4℃, 10℃, 18℃ に、2 回目は 8℃, 13℃, 23℃ に飼育水温を設定した。カラフトマスの 1 回目の試

験は、前日から絶食させたカラフトマス稚魚を麻酔して体重と尾叉長を測定し、12 時間以上淡水流水中で回復させた。回復した稚魚を 12 個体ずつ各水温区のガラス水槽に収容し、2025 年 4 月 8 日から 3 日間の水温の馴致期間を含めて 10 日間、人工海水中で飼育した。水温は、稚魚収容から 3 日間の馴致期間中に 8.5℃ からそれぞれ段階的に設定水温に調整した。同様に、2 回目の試験は 2025 年 4 月 22 日から 5 月 1 日に実施した。しかし、飼育開始 4 日目の 4 月 25～26 日に、13℃ 区で電気系統のトラブルにより冷却水循環装置と外部濾過装置が停止し、水温低下と酸欠で稚魚の状態が悪化したため、解析からは除外した。サケの飼育実験は 2025 年 1 月 15 日～24 日および 1 月 28 日～2 月 6 日に 2 回行った。1 回目の試験では、2025 年 1 月 14 日に体重と尾叉長を測定し、淡水中で 12 時間以上回復させたサケ稚魚各 30 個体を 1 月 15 日にそれぞれのガラス水槽に収容した。同様に、2 回目の試験は、1 月 27 日に稚魚の測定と回復を行い、1 月 28 日～2 月 6 日に飼育実験を行った。海水飼育開始後の稚魚には、馴致期間中を含めて 1 日 3 回、冷凍アルテミア (ビタクリンアグルトブライン, 株式会社キョーリン, 姫路市) を摂餌しなくなるまで与えた。給餌量は、給餌前後のアルテミア重量を測定して求めた。それぞれ、10 日間の海水飼育後に麻酔をして稚魚の体重と尾叉長を測定した。

最適水温の推定 摂餌量 (FI) は、10 日間に与えたアルテミア量 (湿重量, g) を各水槽の飼育稚魚数で除して算出した。体重と尾叉長の瞬間成長率 (SGR_{bw} , SGR_{FL}) は、以下の式で求めた。 $SGR = (\ln X2 - \ln X1) / T \times 100$ 。ここで、 $X1$ は実験開始時の魚の体重または尾叉長、 $X2$ は実験終了時の体重または尾叉長、 T は飼育日数である。摂餌効率 (FE) は、試験期間中の平均増重量を 1 個体当たりの総給餌量で除して求めた。それぞれ 2 回の飼育試験で得られたデータから、水温と FI, SGR および FE の関係式を得た。魚種ごとに得られた関係式に 0.1℃ ずつ水温を代入し、それぞれ最も高くなる水温 (最適水温) を求めた。

結 果

カラフトマスの第 1 回目の実験では、平均体重 1.46 g の稚魚は、10 日間の海水飼育後に 4℃ で 1.59 g, 10℃ で 1.79 g, 18℃ では 1.70 g まで成長した (Table 1)。稚魚 1 個体あたりの摂餌量は 4℃ で 0.74 g ind.⁻¹, 10℃ で 1.42 g ind.⁻¹, 18℃ で 1.47 g ind.⁻¹ であった。2 回目の試験では、平均体重が約 1.52 g で飼育を開始した稚魚の体重が 8℃ 区で 1.70 g, 18℃ 区で 1.56 g に増加した。摂餌量は 8℃ 処理では 0.95 g ind.⁻¹, 23℃ 区では 1.07 g ind.⁻¹ であった。

サケの 1 回目の実験では、収容時の平均体重 1.17 g の

Table 1 The body size and food intake of pink and chum salmon juvenile reared at different sea water temperatures before and after the experiment were measured

Species	Experimental date	Temp. (°C)	Initial			Final			Food intake (g ind. ⁻¹)
			Fork length (mm)	Wet weight (g)	Condition factor	Fork length (mm)	Wet weight (g)	Condition factor	
Pink (from Tonbetsu River)	Apr. 8 to 17, 2025.	4	60.33 ± 1.94	1.45 ± 0.11	6.63 ± 0.59	61.35 ± 1.81	1.59 ± 0.13	6.88 ± 0.37	0.74
		10	60.44 ± 2.27	1.49 ± 0.17	6.71 ± 0.21	64.08 ± 2.57	1.79 ± 0.27	6.76 ± 0.35	1.42
		18	60.47 ± 2.42	1.44 ± 0.18	6.50 ± 0.40	63.19 ± 2.58	1.70 ± 0.24	6.72 ± 0.47	1.47
	Apr. 22 to May 1, 2025.	8	61.58 ± 1.98	1.52 ± 0.15	6.50 ± 0.29	63.07 ± 1.92	1.70 ± 0.14	6.76 ± 0.29	0.95
		13	62.16 ± 2.46	1.56 ± 0.16	6.46 ± 0.18	N/A	N/A	N/A	N/A
		23	62.22 ± 2.27	1.49 ± 0.15	6.19 ± 0.35	61.73 ± 2.32	1.56 ± 0.23	6.60 ± 0.41	1.07
Chum (from Chitose River)	Jan. 15 to 24, 2025.	4	53.37 ± 1.72	1.20 ± 0.11	7.88 ± 0.44	56.09 ± 2.00	1.38 ± 0.14	7.81 ± 0.47	0.89
		10	52.76 ± 2.14	1.16 ± 0.14	7.85 ± 0.39	58.38 ± 2.62	1.59 ± 0.19	7.97 ± 0.62	1.50
		18	52.42 ± 2.32	1.14 ± 0.16	7.91 ± 0.45	60.06 ± 2.74	1.73 ± 0.24	7.97 ± 0.51	2.06
	Jan. 25 to Feb. 6, 2025.	8	53.81 ± 1.86	1.27 ± 0.12	8.15 ± 0.41	57.15 ± 1.85	1.50 ± 0.16	8.01 ± 0.43	2.86
		13	53.57 ± 1.89	1.24 ± 0.13	8.07 ± 0.34	59.20 ± 2.25	1.75 ± 0.20	8.40 ± 0.27	3.21
		23	54.00 ± 2.38	1.28 ± 0.17	8.09 ± 0.36	56.44 ± 4.90	1.34 ± 0.14	7.62 ± 1.18	2.25

The values indicate the mean ± standard deviation. The sample size for each test treatment was 12 pink salmon and 30 chum salmon.

N/A: The rearing experiment for pink salmon at 13°C was terminated prematurely due to a power supply issue.

稚魚が10日後に4℃で1.38 g, 10℃で1.59 g, 18℃では1.73 gまで成長した。稚魚1個体あたりの摂餌量は、4℃で0.89 g ind.⁻¹, 10℃で1.50 g ind.⁻¹, 18℃で2.06 g ind.⁻¹であった。2回目の試験では平均体重1.27 gで飼育を開始し、8℃区で1.70 g, 13℃区で1.75 g, 23℃区で1.34 gに増加した。摂餌量は8℃区で2.86 g ind.⁻¹, 13℃区で3.21 g ind.⁻¹, 23℃区では2.25 g ind.⁻¹であった。

カラフトマスのFIは水温が4℃から18℃まで上昇するにつれて増加し、23℃では減少した (Fig. 1a)。サケのFIも同様の傾向だが、水温が上昇するとサケのFIの上昇幅は大きかった。SGRは、カラフトマスでは4℃から10℃まで上昇したが18℃では減少した (Fig. 1b, c)。サケでは4℃から18℃までは上昇し、23℃では急激に低下した。FEは、カラフトマスでは4℃から比較的高く、10℃までは緩やかに上昇したが、18℃では低下した (Fig. 1d)。一方、サケのFEは、4℃で低く8℃から10℃にかけて高い値を示した。23℃では大きく低下した。水温と、カラフトマスおよびサケ稚魚のFI, SGR, FEには、以下の関係式が得られた。

FI

カラフトマス：

$$y = -0.0002x^3 + 0.0027x^2 + 0.0933x + 0.3049$$

$$(R^2 = 0.9595)$$

サケ：

$$y = -0.0013x^3 + 0.0382x^2 - 0.1327x + 0.8648$$

$$(R^2 = 0.9929)$$

SGR_{wg}

カラフトマス：

$$y = -0.0006x^3 + 0.0131x^2 + 0.0309x + 0.4860$$

$$(R^2 = 0.8900)$$

サケ：

$$y = -0.0032x^3 + 0.1004x^2 - 0.7096x + 2.6747$$

$$(R^2 = 0.9555)$$

SGR_{FL}

カラフトマス：

$$y = -0.0002x^3 + 0.0040x^2 + 0.0282x - 0.0322$$

$$(R^2 = 0.8754)$$

サケ：

$$y = -0.008x^3 + 0.0264x^2 - 0.1874x + 0.8336$$

$$(R^2 = 0.9173)$$

FE

$$\text{カラフトマス： } y = -0.0899x^2 + 1.8810x + 11.5313$$

$$(R^2 = 0.9302)$$

$$\text{サケ： } y = -0.1886x^2 + 4.8916x - 10.0187$$

$$(R^2 = 0.9074)$$

得られた関係式が最高値となる水温は、カラフトマスではFIは16.1℃, SGR_{wg}は14.8℃, SGR_{FL}は14.4℃, FEは10.5℃であった。サケではそれぞれ、17.7℃, 16.3℃, 16.7℃, 13.0℃であった。

考 察

本研究では、海水移行後のカラフトマスおよびサケ稚魚における摂餌量 (FI), 成長率 (SGR), 摂餌効率 (FE) の水温依存性を比較した。両種ともこれらの指標は水温に対して典型的な単峰型の応答を示したが、最適水温の位置および温度上昇に対する応答幅には違いが見られた。サケ稚魚の水温応答は、FI, SGR およびFEのいずれも先行研究 (Torao, 2022) と概ね一致しており、本研究の飼育条件および解析手法は妥当と考えられた。これに対

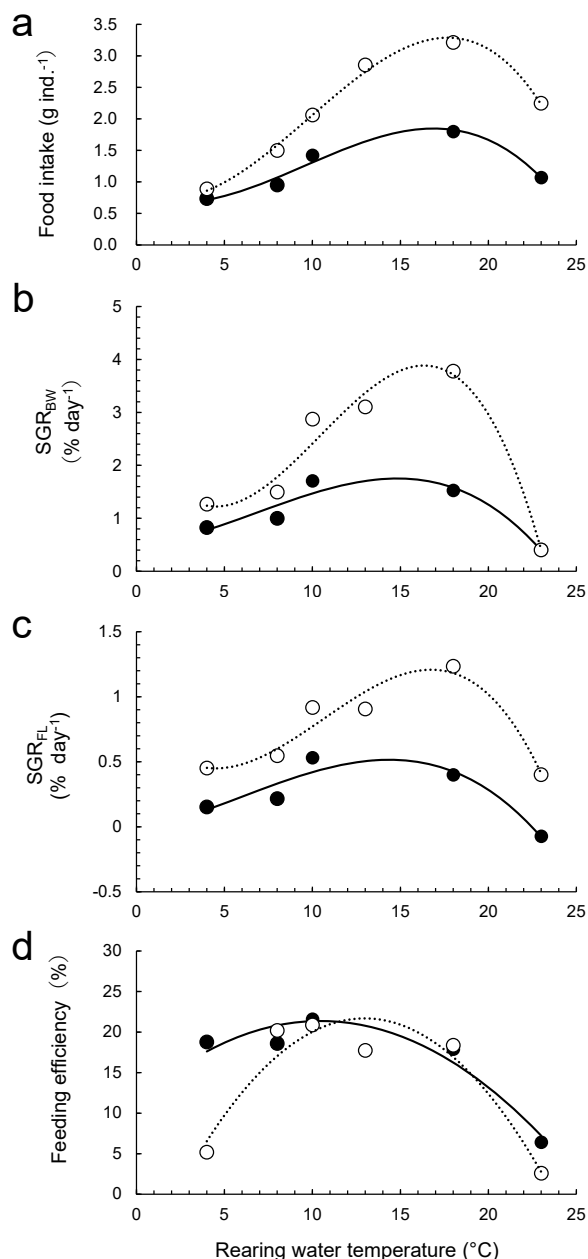


Fig. 1 Relationship between rearing water temperature and a: food intake, specific growth rates (b: wet body weight and c: fork length), and d: feeding efficiency of juvenile pink (solid circles and solid line) and chum (open circles and dotted line) salmon.

してカラフトマスでは FI および SGR の最適水温がサケより低温側に位置しており、水温上昇に対する成長応答の幅が比較的狭い傾向が見られた。さらに FE の最適水温は、両種とも FI および SGR の最適水温より低温側に位置しており、成長量の最大化とエネルギー利用効率の最大化が必ずしも一致しないことを示している。カラフトマスではこの傾向がより低温領域で顕著であり、低～中水温条件下で効率的に成長できる生理的特性を持つ可能性がある。一方、サケはカラフトマスに比べると

比較的高水温域で高い成長を示すが、低水温域では摂餌効率が低下しやすい傾向が示された。これらのことから、両種は沿岸域で同所的に分布するが (Ando *et al.*, 2005; Nagata *et al.*, 2007a, 2007b), 水温に対する成長応答が異なることが示唆された。

北海道沿岸域では 2010 年代以降に稚魚の分布時期の海水温の急激な昇温が発生しやすくなっている (Saito and Miyakoshi, 2018)。また、サケでは動物プランクトン現存量が成長の主要因であるとされ (Saito *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2025), 海水温上昇に伴う餌環境の変化が成長率を低下させる可能性が指摘されている。飼育実験では、12℃から15℃への昇温に伴い、サケ稚魚では体重維持に必要な摂餌量が約2倍になることが示されている (興石, 1980)。こうした稚魚の沿岸滞在期間中の短期的な昇温は、摂餌要求量の増加と代謝コストの上昇をもたらし、成長効率を低下させる可能性が想定される。本研究で示されたように、高水温ほど高い FI を必要とする傾向は、餌生物が減少または組成変化した条件下では十分に成長を補償できず、沿岸域での成長率の低下をさらに助長する可能性がある。特に近年、カラフトマス資源はサケ以上に急激な減少傾向を示している。カラフトマスはサケに比べ成長最適水温が低温側にあり、高水温で成長効率が低下しやすいことから、近年の沿岸水温の急変に対してより影響を受けやすい可能性がある。

ただし、本研究にはいくつかの課題もある。カラフトマスでは設備トラブルにより 13℃区間のデータが得られず、最適水温の推定精度に制約がある。また、サケに比べてカラフトマスの FI および SGR が全体的に低かったが、給餌方法や飼育管理が影響した可能性も否定できない。しかし、同一条件下における水温応答曲線の形状と最適水温の位置に着目することで、種間差の議論は可能である。また本研究では成長における体サイズの影響も評価出来ていない。人工孵化放流では、カラフトマスは尾叉長 35 mm, 体重 0.3~0.4 g 程度で放流されることが多い (虎尾ら, 2010)。本研究で対象としたカラフトマス稚魚はこれより大型のサイズであった。一方、サケ稚魚は増殖事業における放流サイズに相当する体サイズであった。いずれも沿岸域での生活期の体サイズ範囲であるが (Fujiwara *et al.*, 2007; Nagata *et al.*, 2007b), カラフトマスの放流適期を検討するには放流サイズの個体での試験が必要かもしれない。カラフトマス資源量の急減により研究材料の確保が難しい状況であるが、これらの点は今後明らかにしなければならない。

本研究で示された両種の成長適水温の違いは、沿岸生活初期の生残機構の理解に資するとともに、近年の沿岸水温変動下における資源動態や放流事業のあり方を検討

する上で重要な基礎情報となる。

謝 辞

本研究のサケに関する飼育試験は水産庁栽培養殖課委託事業「さけ・ます等栽培対象資源対策事業」の一環として実施し、一般社団法人日本海さけ・ます増殖事業協会から受精卵を提供していただいた。また、カラフトマスは、一般社団法人宗谷管内さけ・ます増殖事業協会の増殖事業用種卵から提供していただいた。ここに記して深謝する。

引用文献

- Ando D, Miyakoshi Y, Nagata M, Fujiwara M, Hoshino N, Asami H. Distribution and migration of pink salmon juveniles in the coastal waters of eastern Hokkaido, Okhotsk Sea. *North Pacific Anadromous Fish Commission Technical Reports* 2005; 6: 71-73.
- Beamish R. The need to see a bigger picture to understand the ups and downs of Pacific salmon abundances. *ICES Journal of Marine Science* 2022; 79: 1005-1014.
- Brett JR. Environmental factors and growth. In: Hoar WS, Randall DJ, Brett JR (eds). *Fish Physiology, Vol. 8* Academic Press, London. 1979; 599-675.
- Chang YLK, Honda K, Morita K. Beyond lethal temperatures: Factors behind the disappearance of chum salmon from their southern margins under climate change. *PLOS ONE* 2025; 20: e0330957.
- Farley Jr. EV, Yasumiishi EM, Murphy JM, Strasburger W, Sewall F, Howard K, Moss JH. Critical periods in the marine life history of juvenile western Alaska chum salmon in a changing climate. *Marine ecology progress series* 2024; 726: 149-160.
- Fujiwara M, Miyakoshi Y, Ando D, Shimada H, Sawada M, Asami H, Nagata M. Distribution and growth of juvenile pink salmon in the coastal waters of eastern Hokkaido determined with otolith-marking. *North Pacific Anadromous Fish Commission Technical Reports* 2007; 7: 37-39.
- Honda K, Kawakami T, Suzuki K, Watanabe K, Saito T. Growth rate characteristics of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* originating from the Pacific coast of Japan and reaching Konbumori, eastern Hokkaido. *Fisheries Science* 2017; 83: 987-996.
- Honda K, Kawakami T, Saito T, Urawa S. First report of growth rate of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* captured in the Sea of Okhotsk offshore. *Ichthyological Research* 2019; 66: 155-159.
- Jobling M. *Fish Bioenergetics*. Chapman & Hall, London. 1994.
- 興石裕一. 海水飼育サケ稚魚の餌料要求量. 日本海区水産研究所研究報告 1980; 31: 41-55.
- Mortensen DG, Savikko H. Effects of water temperature on growth of juvenile pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*). *NOAA technical memorandum NMFS-AFSC* 28, 1993, 12p.
- Nagata M, Ando D, Fujiwara M, Miyakoshi Y, Sawada M, Shimada H, Asami H. A shift in pink salmon dominance in the Okhotsk Sea of Hokkaido in relation to coastal environments during early sea life. *North Pacific Anadromous Fish Commission Bulletin* 2007a; 4: 237-249.
- Nagata M, Miyakoshi Y, Fujiwara M, Ando D, Asami H, Kaneko T, Iwabuchi M. Spatial distribution and feeding interactions between chum and pink salmon juveniles in the coastal water of the Okhotsk Sea in the eastern Hokkaido. *North Pacific Anadromous Fish Commission Technical Reports* 2007b; 7: 88-91.
- 佐橋玄記. カラフトマス日本系. 令和6年度国際漁業資源の現況. 水産庁 水産研究・教育機構, 2025. https://kokushi.fra.go.jp/R06/R06_60_PIN.pdf, (2026.03.25)
- Saito T, Miyakoshi Y. Current status of chum and pink Salmon: What is reducing adult returns in Japan? *North Pacific Anadromous Fish Commission Technical Report* 2018; 11: 8-9.
- Saito T, Shimizu I, Seki J, Nagasawa K. Relationship between zooplankton abundance and the early marine life history of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* in eastern Hokkaido, Japan. *Fisheries Science* 2009; 75: 303-316.
- Torao M. Effect of water temperature on the feed intake, growth, and feeding efficiency of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* after seawater transfer. *Aquaculture Science* 2022; 70: 97-106.
- 虎尾充, 竹内勝巳, 佐々木義隆, 春日井潔, 村上豊, 永田光博. 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 2010; 64: 7-15.
- 渡邊久爾, 本多健太郎. サケ(シロザケ)日本系. 令和6年度国際漁業資源の現況. 水産庁 水産研究・教育機構, 2025. https://kokushi.fra.go.jp/R06/R06_61_CHU.pdf, (2026.03.25)