

粒子追跡実験を用いた北海道日本海におけるサケ幼稚魚の北上移動に関する考察（短報）

小山達也^{*1}, 品田晃良², 黒田 寛³, 宮腰靖之¹

¹北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場

²北海道立総合研究機構中央水産試験場

³国立研究開発法人水産研究・教育機構北海道区水産研究所

Consideration on northward transport of juvenile chum salmon in the Sea of Japan off Hokkaido based on particle-tracking experiments (Short paper)

TATSUYA KOYAMA^{*1}, AKIYOSHI SHINADA², HIROSHI KURODA³ and YASUYUKI MIYAKOSHI¹

¹ Salmon and Freshwater Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, *Eniwa, Hokkaido 061-1433*

² Central Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, *Yoichi, Hokkaido 046-8555*

³ Hokkaido National Fisheries Research Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, *Kushiro, Hokkaido 085-0802, Japan*

Using particle-tracking experiments, based on a high-resolution ocean model, we examined the northward transport of juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*), released into the Sea of Japan, by assuming that the particles represented juvenile chum salmon, which were transported passively by ocean currents. The experiments were undertaken for the two brood year classes of juvenile chum salmon; the 2009 brood year class released in the spring of 2010, which showed the lowest return rate among the 2007 to 2010 brood year classes, and the 2007 brood year class released in the spring of 2008, which showed the highest return rate. A remarkable difference in the distribution of the particles was observed between the two brood year classes; i.e., for the 2009 class, particles were transported across a wider range in offshore waters, and the timing at which particles were transported into the Okhotsk Sea through the Soya Strait was delayed. Moreover, the ambient sea water temperature experienced by the particles was lower for the 2009 year class. These results indicated that the post-release transport of juvenile chum salmon by ocean currents was remarkably different between the two years and it may contribute to the low return rate of the 2009 class on the Sea of Japan side of Hokkaido.

キーワード：サケ幼稚魚, 北上移動, 北海道日本海, 粒子追跡実験

北海道日本海沿岸のサケ *Oncorhynchus keta* の来遊数は全道の1割未満と少ないがこの海域にとっては秋の主要な漁業資源として重要であり, 同地域のサケ資源向上に向けた期待は大きい。北海道立総合研究機構(以下, 道総研) さけます・内水面水産試験場では, 日本海のサケの資源構造を詳しく把握するため, 2010年から日本海沿岸のサケ捕獲河川の大部分で年齢組成調査を行っているが, その調査結果を用い2007年級から2010年級の回帰尾数を推定したところ, 調査した全ての河川で2009年級の

回帰尾数が著しく少ないという結果が得られた(小山ら, 2017)。各河川のサケの回帰状況には放流魚の種苗性など, 個別の要因も影響すると思われるが, 2009年級では日本海沿岸のすべての河川で近年としてはかなり少ない回帰尾数にとどまっていることから, 降海後の日本海の沿岸環境がサケの生き残りに厳しい条件であったと考えるのが妥当であろう。しかし, 2009年級の日本海沿岸のサケ低回帰の原因について明確な見解は示されておらず, この資源変動の要因を究明することは北海道日本海のサ

報文番号A559 (2018年1月15日受理)

*Tel: 0153-72-6141. Fax: 0153-72-5188. E-mail: koyama-tatsuya@hro.or.jp

ケ資源向上に繋がるものと考えられる。

海洋生活初期の生残がサケの回帰来遊に大きく影響すると言われていることから (Healey, 1982; Bax, 1983; Pearcy, 1992), その時期の海洋環境をモニタリングすることが重要と考えられる。オホーツク中東部からえりも以東太平洋については降海した稚魚が経験する沿岸水温と資源変動の間に一定の関連性が見いだされている (Nagata *et al.*, 2017)。しかし, Nagata *et al.* (2017) は, 暖流の影響が強い日本海区については沿岸水温という環境因子だけでは資源の増減に関わる原因を特定するのは難しいと指摘している。一方, サケの回帰尾数と沿岸流速の関係性を指摘した事例もあるが (水産総合研究センター, 2015), 北海道日本海のサケ資源の変動要因に関する理解はまだ十分とは言えない。

近年, 海洋流動モデルの出力を利用した粒子追跡実験が盛んに行われており, 遊泳力の弱い稚仔魚などを粒子と仮定して, その輸送経路や経験水温をトレースすることで, 初期生活史の生残過程の変動機構を解明する取り組みが行われている。国立研究開発法人水産研究・教育機構北海道区水産研究所 (以下, 北水研) と道総研中央水産試験場は北海道の水産海洋研究に粒子追跡実験を活用するため, 「高解像度北海道沿岸モデルを用いた粒子追跡システムの水産海洋研究への適用」に関する共同研究を行っており, 北海道の様々な漁業資源生物の生態解明に有益な結果が得られている (品田・黒田, 2016)。本研究では, 高解像度北海道沿岸モデルの再解析値を用いた粒子追跡実験において, 粒子をサケ幼稚魚とみなし, 日本海に降海した後のサケの北上移動中の位置や経験水温, さらに宗谷海峡からオホーツク海へ輸送される頻度や時期の検証を行った。特に, 日本海の全ての河川で回帰尾数が近年としては多かった2007年級と少なかった2009年級について検証した。

材料と方法

沿岸を含めた海洋におけるサケ幼稚魚の移動をシミュレーションするにあたっては高解像度北海道沿岸モデルの出力を用いた粒子追跡実験を行った (Kuroda *et al.*, 2014)。粒子追跡システムの基盤となる海洋モデルは, 水産機構海況予測システムFRA-ROMS (Kuroda *et al.*, 2017) を北海道周辺 (北緯38.49° から47.01°, 東経138.89° から148.21° の範囲) において1/50° の水平格子幅で高解像度化したモデルで, Kuroda *et al.* (2014) で用いた海洋モデルを基盤としている。Kuroda *et al.* (2014) で用いたモデルからの変更点は, 側面境界が南に拡大されていること, また, 日々の現実的な気象外力や河川流量

でモデルが駆動され, 約100 km以上の空間規模をもつ中規模変動はFRA-ROMSの再解析値により修正されていることであり, これにより北海道周辺における日々の海況が再現される。本研究の粒子追跡実験には高解像度北海道沿岸モデルの6時間平均出力を用いた。なお, 粒子追跡には北水研と道総研の共同研究で開発した汎用的な粒子追跡システムを利用し, 本システムに実験期間, 粒子の初期配置位置, 水深および粒子の鉛直移動等の設定を入力することで, 粒子の位置や経験水温を追跡することが可能である。本研究では, 粒子をサケ幼稚魚とみなし, 能動的には遊泳せず, 受動的に輸送されると仮定して, 放流後, すなわち粒子を海中に投入後の粒子位置を追跡した。粒子の投入場所としては, 北海道日本海沿岸において地理的に中央に位置し, また, サケ増殖河川として典型的な放流規模 (毎年約650万尾) および河川規模である余市川の河口域をモデルとして選定した。粒子追跡実験の開始月日は2007年級と2009年級が降海する2008年と2010年の余市川において最後の放流を行った4月下旬の中日, 4月26日とした。沿岸におけるサケ稚魚は渚滞で成長した後に沖合に移動し北上回遊することから (Nagata *et al.*, 2007; 永田・宮腰, 2013), 粒子の投入場所は, 余市川の河口からもっとも沿岸に位置し, 1/50° の水平格子幅の区画で粒子を配置できる北緯43.2105° から43.2205°, 東経140.8395° から140.8495° のおよそ2 km四方の区域とし, 676個の粒子を初期配置した。追跡する実験期間は60日間とした。サケ幼稚魚の遊泳層は海表面付近であることから (Moulton, 1997), 粒子初期配置の深度は0.75mとし, 鉛直方向の拡散はせず一定水深を移動する設定で実験を行った。

日本海からオホーツク海へ移動した粒子の判定は粒子の置かれている経度について宗谷岬の位置する東経141.9364° を基準に西側と東側に区分することにより行った。

結果

粒子追跡実験を開始した3日後, 1週間後の粒子の位置をFig. 1に示した。実験開始3日後には, 粒子は2008年には石狩湾沿岸に, 2010年には投入地点より北方25 kmを中心とする石狩湾沖合に運ばれた。実験開始1週間後には, 2008年は粒子の多くが留萌から羽幌沿岸にまで達したのに対し, 2010年は増毛沖の移動に留まり両年の間で相違がみられた。実験開始から1週間における粒子の毎日の経験水温の平均値をFig. 2に示した。各個別における粒子の経験水温は2008年が7.85~10.47°C, 2010年が5.66~7.77°Cの範囲であり, 2008年は8°C前後の水温の場

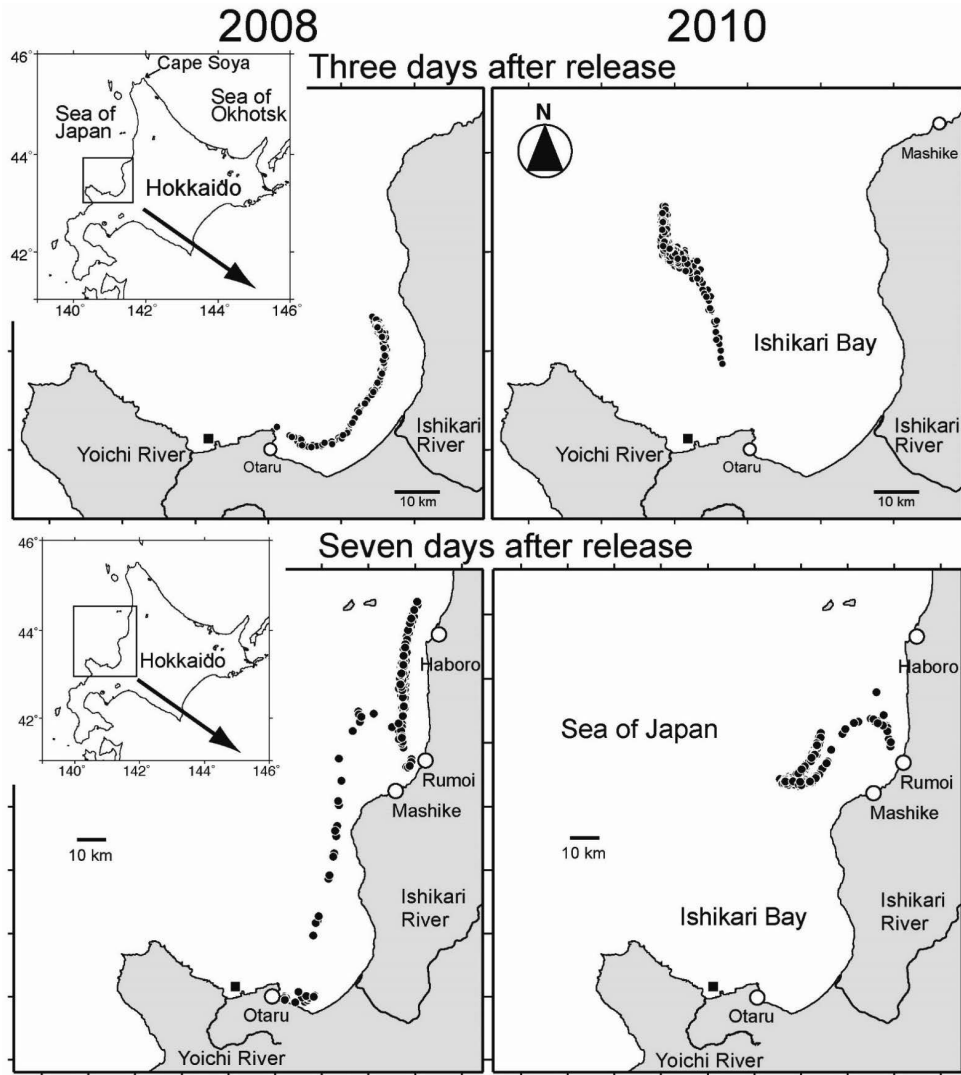


Fig. 1 Distribution of particles released into the coastal area of Yoichi on April 26 simulated by the particle-tracking experiments. Closed squares indicate release locations of particles.

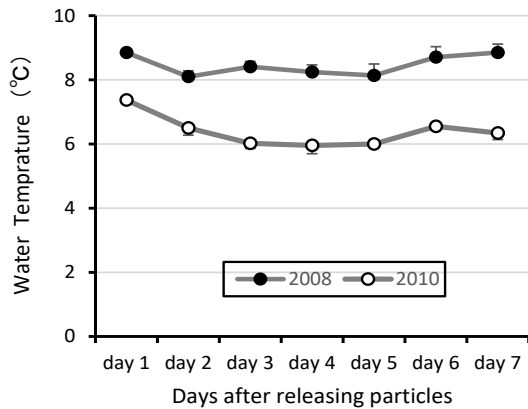


Fig. 2 Ambient sea water temperature experienced by the particles during the initial 7 days of the tracking experiments.

所に位置していたのに対し、2010年は6°C前後と低い水温を経験していた。

余市沿岸に投入した676個の粒子について、5月以降の宗谷岬の東西の分布状況、および、それぞれの粒子が経験した水温をFig.3に示した。宗谷岬東側のオホーツク海への移入状況を見ると2008年は5月31日には88.3%が移入したのに対して、2010年ではオホーツク海へ流入した粒子は6月10日でも55%に過ぎず、明らかに2010年が2008年より遅くオホーツク海に移入した。また、2010年では粒子追跡実験で捉えきれない域外に向かう粒子も28.7%と多くみられ、これらはサハリン西側にあたる日本海の北方域に位置していた。粒子の経験水温はオホーツク海においては両年で大きな違いは見られなかった(日別経験水温平均値の範囲2008年: 5.93~10.32°C, 2010年: 6.11~11.88°C)。一方、日本海に分布している粒子では2010年が2008年よりも低い水温を経験していたが、6

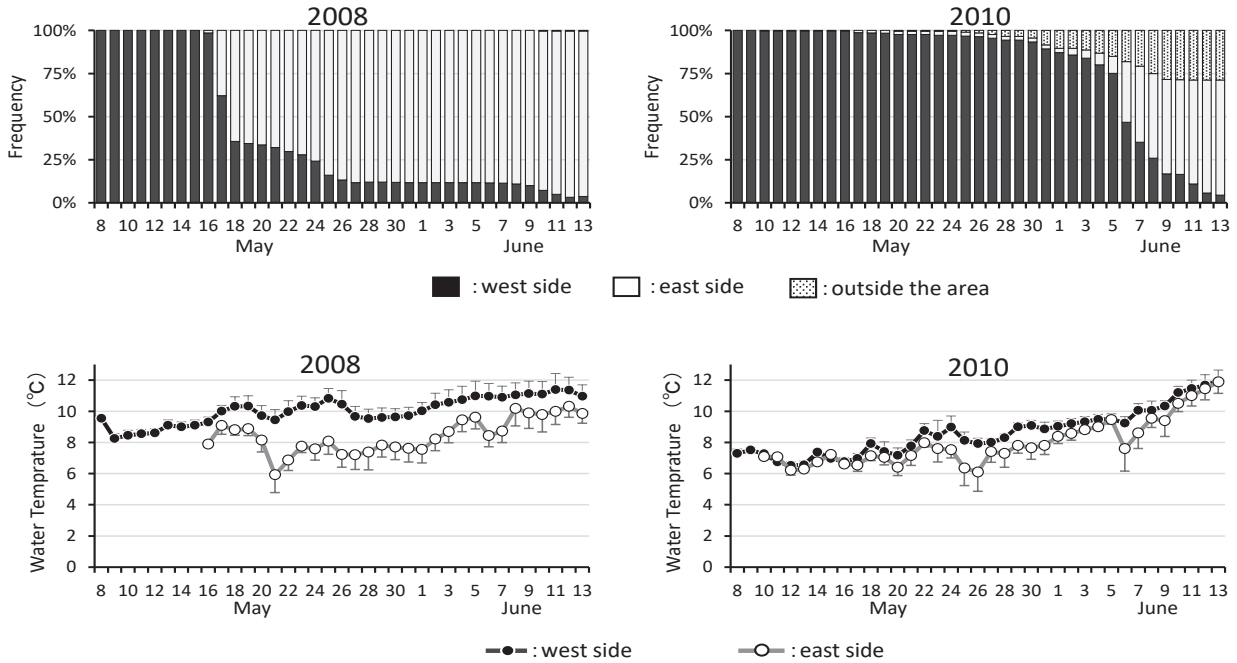


Fig. 3 Frequency of particles located in the east and west of the Cape Soya (upper panels) and sea water temperature experienced by the particles (lower panels) simulated by the particle-tracking experiments. Error bars indicate standard deviations.

月中旬には2010年が2008年よりも高くなった（日別経験水温平均値の範囲2008年: 8.25~11.39°C, 2010年: 6.53~11.93°C）。

考 察

東屋ら（2015）は、東北太平洋沿岸から北海道沿岸に至るサケ稚魚の移動をシミュレートした粒子実験において、移動要因を海流による受動的移動のみにしたケースと海流による受動的移動に加え自泳による能動的移動の両方の効果を取り入れたケースを比較した場合、東北沿岸から北海道の日高や太平洋東部沿岸に達するには自泳による能動的な移動が必要なことを報告している。本研究における日本海を北上移動する粒子の移動実験では、オホーツク海に多くの粒子が流入したのは2008年では5月中下旬、2010年では6月であった（Fig. 3）。真山ら（1982）は、4月中下旬に石狩川河口域に分布したサケ標識魚が6月上中旬に宗谷岬の東側で採捕された事例を報告している。本研究では粒子の能動的移動を考慮しなかったが、真山ら（1982）による野外での観察結果と時期的に大きな違いはみられなかった。一方、北上回遊する石狩川産サケ稚魚は留萌、宗谷地方のごく沿岸帯を通過すると報告されているが（真山ら, 1982）、日本海ではサケ幼稚魚の北上移動経路は十分明らかとなっていない。粒子実験では沿岸から離れ沖合に移動する例も見られることから、

沖合に移動する経路についてもモデル実験を参考にして検証する必要がある。

北海道日本海の流れの流向流速についてはホタテガイ浮遊幼生の分布移動を明らかにすることを目的に流向流速計を深度10 mから20 mに設置して調査されている（北海道立総合研究機構中央水産試験場, 2011~2013）。その結果、小樽沖では風には関係なく東向きの流れの頻度が高い。一方、増毛以北の沿岸部では北上流が卓越しており、その流れを駆動させる力は主に風であることが示唆されている。本研究における粒子実験では、実験開始後3日目の位置が両年で大きく異なり、2010年では小樽沖における東向きの流れに従うことなく石狩湾の沖合に移動した（Fig. 1）。2010年4月27日~4月29日の小樽市における風向風速は東または東南東の風で最大風速7.7~11.7m/sを示していたが（気象庁 <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>）、サケ稚魚の遊泳層に設定した表層ではこうした風の影響を強く受けた可能性がある。粒子投入1週間後を見ると、2008年には粒子はより北方に移動したが、この事象も風に影響されたものと考えられる。一方、粒子投入後1週間の粒子の経験水温は2008年が8°C以上、2010年が6°C前後であり、2008年がサケ幼稚魚の適水温により合致していたと言える。2010年の水温は沿岸も2008年より低く、粒子の経験水温は沖合に運ばれることでさらに低くなった可能性も考えられるが、いずれにせよ、2010年には海水温が低く、粒子に

は沖合へと輸送する力が強く働いたことが明らかとなった。

宗谷海峡を通過して日本海からオホーツク海へと流れる宗谷暖流の駆動力は海峡の両側、日本海北部とオホーツク海南西部の水位差であることが明らかにされている(青田ら, 1993)。オホーツク海は日本海に比較し栄養塩に富み餌生物の観点から日本海より良好な環境であることが指摘されている(Kobayashi *et al.*, 2015)。サケ幼稚魚にとって好適な水温であれば、早い時期にオホーツク海に流入することがサケ幼稚魚の生き残りに関し有利に働くものと考えられるが、本研究の粒子実験では粒子のオホーツク海への流入は2010年が2008年よりもかなり遅れる結果となった。また、実験で投入した約700個の粒子のうちの約3割が粒子モデルの域外である日本海北方のサハリン西岸に逸脱し、それらのオホーツク海への流入は不可能と考えられた。このように、粒子実験における2010年の日本海での北上移動や水温、オホーツク海への流入状況を見ると、この年はサケ幼稚魚の生き残りに不利な条件であった可能性が示唆され、このことが北海道日本海での2009年級の低い回帰(小山ら, 2017)をもたらした可能性がある。

最近の海面水温情報については国土交通省気象庁が発信している気象衛星「ひまわり」による画像を通しウェブからリアルタイムに入手することが可能である(http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyo/daily/sst_HQ.html)。加えて、潮流については日本海区水産研究所が発信しているJADEシステムの利用で予測も可能である(<http://jade2.dc.affrc.go.jp/jade2/>)。これら情報によりサケ稚魚の放流タイミングを適切に管理すれば、放流後のサケ幼稚魚の減耗を最小限に抑え、ひいては回帰資源量の増大に貢献するものと考えられる。これらを補完説明する過去の事象、すなわち、年級別回帰資源量と海洋環境の関係を把握する必要があるが、放流後のサケ幼稚魚が経験する海洋環境を捉えるのに粒子追跡実験は大変有意義なツールといえる。本研究では2カ年分の粒子実験を行い比較したに過ぎないが、海区全体におけるサケ親魚の回帰資源量のモニタリングを継続することで実験例がさらに集積され、今後、さらにサケ年級別回帰資源量とサケ稚魚放流後の海洋環境の関連性について検討する材料が整うことを期待したい。

謝 辞

サケ稚魚を模した粒子追跡には、道総研と北水研の共同研究『高解像度北海道沿岸モデルを用いた粒子追跡システムの水産海洋研究への適用』(平成26~32年度)で

開発した粒子追跡システムを利用しました。また、本調査は公益社団法人北海道さけ・ます増殖事業協会からの受託研究「秋サケ資源低迷の原因を解明するためのモニタリング調査」の一環として進めました。

引用文献

- 青田昌秋, 石川正雄, 山田俊郎. 宗谷海峡の流れについて. 低温科学. 物理篇 1989; **47**: 147-160.
- 東屋知範, 黒田 寛, 鶴沼辰哉, 横田高士. 流体モデルなどによるサケ稚魚の回遊条件の検証. 平成 26 年度太平洋サケ資源回復調査委託事業調査報告書 2015; 40-44.
- Bax NJ. Early marine mortality of marked juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) released into Hood Canal, Puget Sound, Washington, in 1980. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1983; **40**: 426-435.
- Healey MC. Timing and relative intensity of size-selective mortality of juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) during early sea life. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1982; **39**: 952-957.
- 北海道立総合研究機構中央水産試験場. 日本海ホタテガイ採苗不振対策研究. 平成21~23年度道総研中央水産試験場事業報告書, 余市, 2011~2013.
- Kobayashi Y, Takatsu T, Yamaguchi H, Joh M. Comparisons of diet and nutritional conditions in *Pseudopleuronectes herzensteini* juveniles between two nursery grounds off northern Hokkaido, Japan. *Fish. Sci.* 2015; **81**: 463-472.
- 小山達也, 下田和孝, 青山智哉, 飯嶋亜内, 卜部浩一, 藤原 真, 宮腰靖之. 北海道日本海側河川に遡上したサケの最近の年級別回帰尾数(資料). 北海道立水産試験場研究報告 2017; **92**: 47-58.
- Kuroda H, Takahashi D, Mitsudera H, Azumaya T, Setou T. A preliminary study to understand the transport process for the eggs and larvae of Japanese Pacific walleye Pollock *Theragra chalcogramma* using particle-tracking experiments based on a high-resolution ocean model. *Fish. Sci.* 2014; **80**: 127-138.
- Kuroda H, Setou T, Kakehi S, Ito S, Taneda T, Azumaya T, Inagake D, Hiroe Y, Morinaga K, Okazaki M, Yokota T, Okunishi T, Aoki K, Shimizu Y, Hasegawa D, Watanabe T. Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through development of the FRA-ROMS ocean forecast system: overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open J. Ma. Sci.* 2017; **7**: 62-90.

真山 紘, 加藤 守, 関 二郎, 清水幾太郎. 石狩川産サケの生態調査-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 1982; **36**: 1-17.

Moulton LL. Early marine residence, growth, and feeding by juvenile salmon in northern Cook Inlet, Alaska. *Alaska Fish. Res. Bull.* 1997; **4**: 154-177.

永田光博, 宮腰靖之. ふ化事業の光と影-持続的資源管理に向けて. 「サケ学大全 (帰山雅秀, 永田光博, 中川大介編著)」北海道大学出版会, 札幌. 2013; 151-156.

Nagata M, Miyakoshi Y, Ando D, Fujiwara M, Sawada M, Shimada H, Asami H. Influence of coastal seawater temperature on the distribution and growth of juvenile

chum salmon, with recommendations for altered release strategies. *N. Pac. Anadr. Fish Comm. Bull.* 2007; **4**: 223-235.

Nagata M, Miyakoshi Y, Fujiwara M, Kasugai K, Ando D, Torao M, Saneyoshi H, Irvine JR. Adapting Hokkaido hatchery strategies to regional ocean conditions can improve chum salmon survival and reduce mortality. *N. Pac. Anadr. Fish Comm. Bull.* 2017; **6**: 73-85.

Pearcy WG. Ocean Ecology of North Pacific Salmonids. University of Washington Press, Seattle, 1992; 179 pp..

品田晃良, 黒田 寛. 高解像度沿岸モデルの可能性と現在の取組. 黒潮の資源海洋研究2016; **17**: 6.

水産総合研究センター. サケの来遊数の推定と放流方法を検討. FRA NEWS 2015; **45**: 4-5.