

原著論文

北海道千歳川におけるサケ野生魚と放流魚の 回帰率の比較

森田健太郎*1・福澤博明*2・鈴木健吾*1

Comparison of fry-to-adult survival rates between wild and hatchery chum salmon in the
Chitose River, Hokkaido, Japan

Kentaro MORITA, Hiroaki FUKUZAWA and Kengo SUZUKI

Chum salmon stock enhancement that incorporates natural reproduction is required in Japan; for that purpose, it is necessary to accumulate information on the efficiency of natural reproduction. We estimated the fry-to-adult survival rates of wild and hatchery chum salmon in the Chitose River, Hokkaido, Japan, where the otoliths of all hatchery-released fry were thermally marked. The production of outmigrating wild fry was estimated by employing a rotary screw trap to determine the ratio of otolith thermally marked hatchery fish to non-marked wild fish, multiplied by the total number of hatchery-released fry. The numbers of returning wild and hatchery origin adults were estimated at the weir by identifying the ratio of the otolith thermally marked hatchery fish to the non-marked wild fish. The fry-to-adult survival rates (2006 and 2008–2011 brood years) of the wild fish were estimated as 0.22%–0.86%, whereas those of hatchery fish were estimated as 0.17%–1.29%. Even though the average body sizes of wild fry were significantly smaller than those of hatchery-released fry, and the wild fry outmigrated significantly later than the hatchery-released fry, the fry-to-adult survival rates did not differ significantly between fish of natural and hatchery origin.

キーワード：海洋生存率, 耳石温度標識, ふ化場魚, 天然魚
2017年9月2日受付 2018年9月4日受理

サケ *Oncorhynchus keta* は北日本の定置網漁業を支える重要な漁業資源であり, 主要河川では7~8割以上が人工ふ化放流により造成されている (森田ら 2013a)。一方で, 環境保全の観点からサケの野生魚に対する意識が高まりつつあり, 近年の水質改善や堰堤への魚道敷設などによる自然産卵環境の増大とあいまって, 北日本の広範囲で自然産卵するサケが確認されるようになった (宮腰ら 2011, Morita 2014, Iida *et al.* 2018)。

現在, サケの資源造成は人工ふ化放流だけで行う計画となっているが, 下流側での河川捕獲のために未利用と

なっている産卵場も多く (卜部ら 2013, 市村 2015), 自然産卵も活用した新しいサケの増殖事業の開発が望まれる。自然産卵を活用した増殖事業は, 増殖経費をかけずに資源への添加効果が期待されることに加え, 人工ふ化放流が生物多様性に及ぼすことが懸念される負の影響にも配慮した環境保全型の増殖事業として期待されている (小松ら 1997, 大熊ら 2016)。

サケの自然産卵を活用した増殖事業を展開するためには, 自然再生産の効果に関する知見を蓄積する必要がある。自然産卵による卵から稚魚までの生存率は約 10~

*1 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さけます資源研究部
〒062-0922 北海道札幌市豊平区中の島2条2丁目4-1
Hokkaido National Fisheries Research Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency
2-2-4-1 Nakanoshima, Toyohira-ku, Sapporo, Hokkaido 062-0922, Japan
moritak@affrc.go.jp

*2 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さけます生産技術部技術課

20%と推定されている（森田ら2013b, 有賀ら2014）。しかし、自然産卵によって生まれた野生の稚魚は、ふ化場で給餌されてから放流される稚魚と比べると小型であり、野生の稚魚とふ化場で生産された稚魚で同等の回帰効果が期待されるかどうか不明な点が多い。

北海道の千歳川では、自然産卵によって生まれた稚魚は、人工ふ化放流された稚魚と比べて体サイズが小さいことに加えて、降海時期が放流魚と比べて約1か月遅い（森田ら2013b, 清水ら2016）。千歳川では、自然産卵によって生まれた野生稚魚が多く存在することは以前から知られていたが、降海時期が遅いため大部分が死滅するものと考えられていた（真山ら1983）。しかし、千歳川から放流される人工ふ化放流魚の100%に耳石温度標識が付けられるようになり、回帰したサケ親魚の中には無標識魚も含まれていることが明らかになるにつれて、野生稚魚の中には親魚となって回帰する個体が存在することが示唆された（森田・大熊2015）。

そこで本研究では、自然産卵によって生産された野生のサケ稚魚の回帰効果を検証することを目的とした。本研究では、放流魚のほぼ全数が標識されている千歳川において、降下稚魚のトラップ調査から推定された無標識の野生稚魚降下数と、回帰親魚のモニタリング調査で得られた無標識の野生親魚数のデータから、野生稚魚の河川回帰率を推定し、放流魚の河川回帰率と比較した。

材料と方法

石狩川水系千歳川では、北海道区水産研究所千歳さけます事業所によって、毎年約3,000万尾のサケ稚魚が放流されている。2002年以降は基本的に放流魚の全てに耳石温度標識を付けて放流されている。2007～2012年の6年間、放流地点の約10km下流にロータリー式スクリュートラップ（E. G. Solution社製, Oregon, USA）が設置され、サケ降下稚魚が採集された。降下稚魚の採集期間は2007年では4月中旬から5月上旬と短かったが、2008年では3月中旬から5月下旬、2009年以降では3月上旬から6月中下旬まで延長され、サケ降下時期全般にわたり調査が行われた。スクリュートラップの稼働時間は24時間連続を基本とし、週2回の頻度で各年30～33日間行われた（ただし、2007年は8日間）。採集された稚魚は全重量が計量され、1尾当たりの平均体重から採集尾数が求められた。各採集日ごとに最大50～100尾について魚体測定を行うとともに、耳石温度標識の有無が確認された。森田ら（2013a, b）の方法に従って、無標識魚の比率から野生稚魚の割合を推定し、各年の放流数に乗ずることで野生稚魚の降下数を推定した。また、稚魚の降下時期を評価するため、スクリュートラップの平均通過日を $\sum m_i \cdot t_i / \sum m_i$ によって求めた（ m_i は採集日*t*における捕獲数）。2007～2012年の降下時期（2006～2011年級群）にスクリュートラップで採集されたサケ

稚魚の数は23,864～79,885尾、そのうち耳石温度標識の有無が確認された標本尾数は728～1,952尾であった。

千歳川では、日本海さけ・ます増殖事業協会によって、例年8月下旬から12月中旬にかけて、放流地点の約10km下流に設置されたウライ（上りやな）によって回帰したサケ親魚が捕獲され、捕獲日ごとに雌雄別の捕獲数が計数されている。2000年以降は、平均20万尾（範囲5～51万尾）のサケが毎年捕獲されている。北海道区水産研究所では、親魚捕獲が行われている期間について、旬ごとに約100尾（雌雄50尾ずつ）の親魚を抽出し、鱗による年齢査定および耳石温度標識の確認を行っている。森田ら（2013a）およびMorita *et al.*（2015）の方法に従って、時期別雌雄別年齢別の標識魚の比率から放流魚・野生魚割合を推定し、時期別雌雄別の河川捕獲数に乗ずることで、2006～2011年級群の放流魚と野生魚の河川捕獲された回帰親魚数を推定した。なお、本研究では2011年級群の6年魚が回帰する2017年までのデータを用いた。

得られた放流魚と野生魚の降下稚魚数および回帰親魚数から2006～2011年級群の河川回帰率を求めた。ただし、放流魚の全数が標識されていない2007年級群（標識率94%）は分析から除いた。河川回帰率、降下稚魚の平均体重、およびスクリュートラップの平均通過日が野生魚と放流魚間で異なるかを検証するため、対応のある*t*検定を用いて統計検定を行った。河川回帰率の年変動の大きさが野生魚と放流魚間で異なるかを検証するため、*F*検定を用いて等分散性の検定を行った。また、スクリュートラップで採集された降下稚魚の平均体重および平均通過日と河川回帰率の関係について、それぞれ線形回帰および二次曲線回帰にあてはめた。ただし、2007年（2006年級群）はスクリュートラップの調査期間が短かったため、通過日の分析から除いた。統計解析はSPSS version25（IBM社, Armonk, New York, USA）を用いて行った。

結 果

本研究で推定された放流魚と野生魚の降下稚魚数および回帰親魚数を表1に示す。野生魚の河川回帰率は0.217～0.856%、放流魚の河川回帰率は0.169～1.285%と推定された（図1a）。2006, 2009, 2010年級群では野生魚の河川回帰率が高く、2008, 2011年級群では放流

表1. 千歳川におけるサケ放流魚と野生魚の降下稚魚数および河川捕獲された回帰親魚数

年級	降下稚魚数 (千尾)		河川捕獲された回帰親魚数	
	放流魚	野生魚	放流魚	野生魚
2006	31,718	2,835	53,460	6,160
2008	31,790	3,639	408,560	9,468
2009	28,559	1,343	88,951	5,467
2010	29,705	891	77,002	6,238
2011	30,470	1,209	304,140	10,344

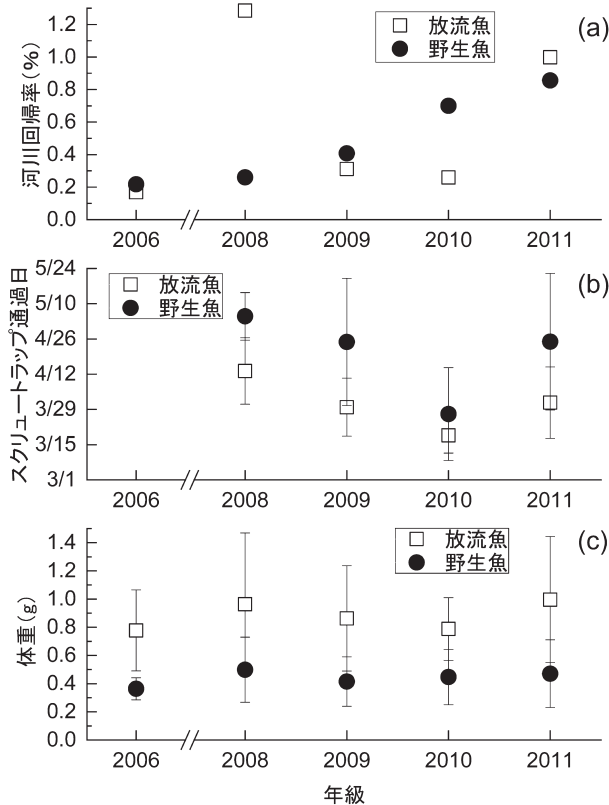


図1. 千歳川におけるサケ野生魚と放流魚の河川回帰率 (a), 降下稚魚のスクリュートラップ平均通過日 (b), 及びスクリュートラップで採集された降下稚魚の平均体重 (c) エラーバーは標準偏差

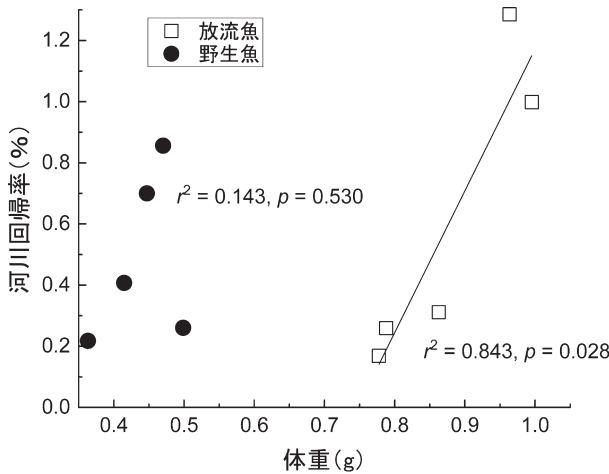


図2. 千歳川におけるサケ野生魚と放流魚の降下稚魚の平均体重と河川回帰率の関係

魚の河川回帰率が高かった。放流魚と野生魚で河川回帰率の平均値に有意差は認められなかった ($t_4 = 0.474$, $p = 0.660$)。河川回帰率の年変動は放流魚の方が野生魚よりも大きい傾向にあったが、分散に有意差は認められなかった ($F_{44} = 3.250$, $p = 0.281$)。スクリュートラップの平均通過日は、放流魚が3月中旬～4月中旬であったのに対し、野生魚は3月下旬～5月上旬と有意に遅かった (図1b, $t_5 = 5.252$, $p = 0.013$)。降下稚魚の平均体重は、放流魚が0.8～1.0gであったのに対し、野生魚は0.4～0.5g

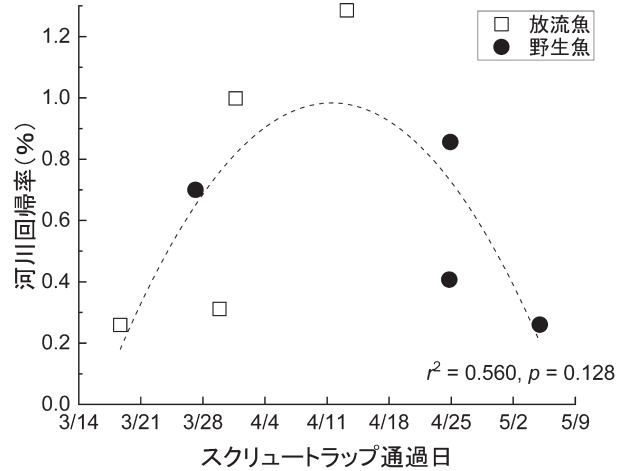


図3. 千歳川におけるサケ野生魚と放流魚の降下稚魚のスクリュートラップ平均通過日と河川回帰率の関係

と有意に小さかった (図1c, $t_4 = 14.46$, $p < 0.001$)。河川回帰率と降下稚魚サイズの間には、野生魚と放流魚を分けた場合、それぞれ正の相関関係があり、放流魚については有意な相関関係が認められた (図2, 放流魚: $r^2 = 0.843$, $F_{13} = 16.14$, $p = 0.028$, 野生魚: $r^2 = 0.143$, $F_{13} = 0.500$, $p = 0.530$)。しかし、野生魚は降下稚魚サイズが著しく小さいにも関わらず放流魚と同等の河川回帰率を示したため、野生魚と放流魚に共通する回帰直線は見出されなかった。河川回帰率とスクリュートラップ平均通過日の間には、野生魚と放流魚を含めた場合、4月中旬をピークとする凸型の関係が見られたが、得られた二次曲線は統計的に有意ではなかった (図3, $r^2 = 0.560$, $F_{25} = 3.184$, $p = 0.128$)。

考 察

自然産卵により発生した野生の稚魚は、放流された稚魚よりも体サイズが極めて小さく、また降下時期も遅かったが、河川回帰率は放流魚と同じレベルであった。人工ふ化放流事業で培われてきた適期・適サイズ放流の概念からは、1g以上で放流することが望ましいとされるが (関2013), 0.4～0.5gで降下した野生の稚魚が約1gで放流された稚魚と同様の河川回帰率を示す事は興味深い。放流された稚魚の方が野生の稚魚よりも大型で肥満度も高いものの、体成分中のグリコーゲン量は野生稚魚の方が約5倍高いこと (清水ら2016), 単位体サイズあたりの耐泳力は野生魚の方が高いこと (小林・大熊1983) が千歳川において報告されており、体サイズ以外の栄養状態や運動能力の差も河川回帰率の大小と関係すると考えられる。

サケ稚魚が河川を降下する体サイズに加えて、その時期も生き残りを左右する重要な要因であると考えられている。本研究では、スクリュートラップ通過日と河川回帰率の関係が凸型となる傾向も見られたため (図3), 放流された稚魚は生き残りが最適となる適期の前半、野生

の稚魚は適期の後半に降下しているのかも知れない。5月の北海道日本海沿岸の海表面水温は約10°Cであり、10日間で千歳川から沿岸域にたどり着くことが可能であるとすると（真山ら1983）、4月下旬から5月上旬に千歳川を降下した野生の稚魚も適期の上限とされる沿岸水温13°Cに達する前には降海できるものと考えられる。しかし、適期・適サイズ放流の概念で望ましいとされる沿岸水温13°Cの時点で体重3gに達すること（関2013）は野生の稚魚にとって困難であろう。このように、人工ふ化放流事業における適期・適サイズ放流の概念から逸脱している野生魚も放流魚と同様の河川回帰率を示す事は興味深い。

放流魚と野生魚間の回帰率の差異については、国外のサケ科魚類において知見が蓄積されており、放流魚よりも降海サイズが小さいにもかかわらず、野生魚の方が生存率は高いという傾向にある（タイセイヨウサケ *Salmo salar* : Jonsson *et al.* 2003, Saloniemi *et al.* 2004, マスノスケ *Oncorhynchus tshawytscha* : Beamish *et al.* 2012, スチールヘッド *O. mykiss* : Melnychuk *et al.* 2014, Osterback *et al.* 2014, ギンザケ *O. kisutch* : Zimmerman *et al.* 2015, 異なる事例としてタイセイヨウサケ : Vollset *et al.* 2017, スチールヘッド : Moore *et al.* 2012)。これまで日本では、サケの沿岸までの回帰率は、天然産卵の場合は0.1~0.5%であるのに対し、人工ふ化放流魚は3~5%に高まると説明され（岩手県さけ・ます増殖協会1985, 木村1994）、自然産卵による資源造成は困難であると考えられてきたが、その前提を再検討する必要がある。

推定値の偏りについて 本研究で推定された野生魚の河川回帰率は、以下の2つの理由から過小評価されている可能性が高い。第一に、千歳川にはウライが撤去された12月中旬以降に多くの野生サケが遡上し、その個体数は数千尾におよぶ（写真1, 森田ら2013b, 森田・大熊2015）。しかし、河川回帰率の計算に用いた回帰親魚数はウライが設置されている期間に捕獲された親魚に限定しているため、野生魚の回帰親魚数は過少推定され、したがって野生魚の河川回帰率が過小評価されている。第二に、野生魚の降下稚魚数を推定するにあたり、放流された稚魚がスクリュートラップまでの10kmを降下するまでに減耗は無いと仮定したが、放流直後にも減耗が生じている可能性が示唆されている（Morita *et al.* 2015）。本研究では、スクリュートラップで採集された降下稚魚の無標識率に放流数（約3,000万尾）を乗ずることで野生魚の降下稚魚数を推定したが、スクリュートラップの設置点を通過した放流稚魚の個体数が放流数よりも少ない場合には野生魚の降下稚魚数が過大推定され、したがって野生魚の河川回帰率が過小評価される。

一方、本研究で推定された野生魚の河川回帰率が過大評価される要因も2つ考えられる。まず、市民放流として無標識のサケ稚魚が千歳川（スクリュートラップよりも下流側）に放流されており、それらが回帰して河川捕



写真1. ウライ撤去後に千歳川上流に遡上する野生サケ（2016年1月1日）

獲された場合は無標識魚であるために野生魚として計数され、野生魚の河川回帰率が過大評価される。千歳水族館等から体験放流されたサケ稚魚の尾数は、2006~2011年級は約2~3万尾であり（私信、千歳水族館菊池基弘館長）、河川回帰率1%とすれば回帰親魚数は200~300尾と見積もられる。次に、他河川由来の迷入魚が千歳川に遡上して捕獲された場合、無標識魚であれば野生魚として計数され、野生魚の河川回帰率が過大評価される。迷入魚の遡上率は0.24%と見積もられており（福澤2016）、本研究の対象期間中の千歳川における河川捕獲数（平均19.4万尾、範囲7.9~42.3万尾）に乗ずると、465尾（190~1,015尾）が野生魚の回帰親魚数として過大に推定されたと考えられる。したがって、これらの2つの要因により生じる野生親魚数の過大推定は最大で1,300尾程度と考えられる。本研究で推定された無標識の親魚数は5,467~10,344尾であり、この値から1,300尾を減じた値を野生魚の回帰親魚数として河川回帰率を再推定すると、野生魚の河川回帰率は0.171~0.748%（13~24%減少）となったが、それでも2006、2010年級群は野生魚の方が放流魚よりも河川回帰率が高く、放流魚と野生魚間で河川回帰率に有意差は認められなかった（ $t_4 = 0.878$, $p = 0.430$ ）。

以上の事から、野生魚の河川回帰率は過小評価されている可能性の方が高く、自然産卵を活用した資源造成の効果は十分に期待できると考えられる。その一例として、千歳川の2011年級について考察する。千歳川上流部において2011年8月から2012年2月の間に自然産卵したサケ親魚数は3,700~4,400尾と推定されている（森田ら2013b）。一方、これらの親魚を親とする2011年級の野生魚の河川捕獲数は10,344尾であった（表1）。この場合、世代間の個体数の増減を親魚の数で比較すると、親世代の親魚数の2倍以上の子世代の親魚が河川に遡上していたことになる。現在、ふ化事業のために河川捕獲されたサケ親魚のうち、人工採卵に用いない余剰な親魚は売却され増殖経費に補填されているが、河川捕獲を人工採卵

に必要な個体数に留めれば、漁業資源を造成する効果が期待されるだろう。

ただし、本研究では河川回帰率を回帰効果の指標として用いた点については留意する必要がある。サケは沿岸定置網漁業による漁獲率が約80～90%と非常に高いため、遡上時期が異なる放流魚と野生魚で漁獲死亡率が異なれば、河川回帰率の大小と回帰率（自然要因による海洋生存率）の大小は必ずしも一致しない（森田2017）。そのため、サケの回帰効果を群間で比較する上では、漁獲死亡率の違いも考慮する必要があるが、この点については今後の検討課題としたい。

謝 辞

千歳川に於ける調査に惜しめないご協力を頂いた日本海さけ・ます増殖事業協会の安藤孝雄専務理事をはじめ職員の皆様に深く感謝する。また、本研究に使用したデータの収集に尽力された北海道区水産研究所千歳さけます事業所の歴代技術職員、並びに様々なアドバイスを頂いた大熊一正元資源保全グループ長に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 有賀 望・森田健太郎・鈴木俊哉・佐藤信洋・岡本康寿・大熊一正 (2014) 大都市を流れる豊平川におけるサケ *Oncorhynchus keta* 野生個体群の存続可能性の評価. 日本水産学会誌, **80**, 946-955.
- Beamish RJ, Sweeting RM, Neville CM, Lange KL, Beacham TD, Preikshot D (2012) Wild chinook salmon survive better than hatchery salmon in a period of poor production. *Environ. Biol. Fish.*, **94**, 135-148.
- 福澤博明 (2016) サケの母川回帰精度について. SALMON情報, **10**, 16-19.
- 市村政樹 (2015) 根室地域におけるサケの自然再生産の現状と評価に関する研究. 博士論文, 北海道大学大学院水産科学院, 函館市, 105 p.
- 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. *Fish. Sci.*, **84**, 453-459.
- 岩手県さけ・ます増殖協会 (1985) 岩手県のさけ・ますふ化場. 岩手県さけ・ます増殖協会, 盛岡市, pp.26-27.
- Jonsson N, Jonsson B, Hansen LP (2003) The marine survival and growth of wild and hatchery-reared Atlantic salmon. *J. Appl. Ecol.*, **40**, 900-911.
- 木村義一 (1994) 鼻曲がりサケ談義. 北日本海洋センター, 札幌市, pp.11-13.
- 小林哲夫・大熊一正 (1983) サケマス稚魚の体力測定装置について. 北海道さけ・ますふ化場研究報告, **37**, 41-44.
- 小松伸行・大森 明・小沼洋司 (1997) 大北川における天然サケ稚魚の動態と資源量. 茨城内水試研報, **33**, 33-42.
- 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年春放流稚魚の降河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.
- Melnychuk MC, Korman J, Hausch S, Welch DW, McCubbing DJ, Walters CJ (2014) Marine survival difference between wild and hatchery-reared steelhead trout determined during early downstream migration. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **71**, 831-846.
- 宮腰靖之・卜部浩一・安藤大成・實吉隼人・青山智哉・坂本博幸・春日井 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). 北水試研報, **80**, 51-64.
- Moore M, Berejikian BA, Tezak EP (2012) Variation in the early marine survival and behavior of natural and hatchery-reared Hood Canal steelhead. *PLoS One*, **7**, e49645.
- 森田健太郎・高橋 悟・大熊一正・永沢 亨 (2013a) 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**, 206-213.
- 森田健太郎・平間美信・宮内康行・高橋 悟・大貫 努・大熊一正 (2013b) 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**, 718-720.
- Morita K (2014) Japanese wild salmon research: toward a reconciliation between hatchery and wild salmon management. *NPAFC Newsletter*, **35**, 4-14.
- 森田健太郎・大熊一正 (2015) サケ: ふ化事業の陰で生き長らえてきた野生魚の存在とその保全. 魚類学雑誌, **62**, 189-195.
- Morita K, Nakashima A, Kikuchi M (2015) River temperature drives salmon survivorship: is it determined prior to ocean entry? *R. Soc. Open Sci.*, **2**, 140312.
- 森田健太郎 (2017) サケ沿岸漁獲物の耳石温度標識魚調査. SALMON情報, **11**, 33-35.
- 大熊一正・長谷川功・佐藤俊平・岸 大弼・市村政樹・飯田真也・森田健太郎 (2016) 野生魚を活用した持続可能なさけます漁業と増殖事業. SALMON情報, **10**, 30-37.
- Osterback AMK, Frechette DM, Hayes SA, Bond MH, Shaffer SA, Moore JW (2014) Linking individual size and wild and hatchery ancestry to survival and predation risk of threatened steelhead (*Oncorhynchus mykiss*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **71**, 1877-1887.
- Saloniemi I, Jokikokko E, Kallio-Nyberg I, Jutila E, Pasanen P (2004) Survival of reared and wild Atlantic salmon smolts: size matters more in bad years. *ICES J. Mar. Sci.*, **61**, 782-787.
- 関 二郎 (2013) さけます類の人工孵化放流に関する技術小史 (放流編). 水産技術, **6**, 69-82.
- 清水智仁・伴 真俊・宮内康行・梅田勝博・中尾勝哉・藤井 真・真山 紘 (2016) 千歳川を降河するふ化場産および野生産サケ稚魚の栄養状態. 水産技術, **8**, 89-94.
- 卜部浩一・三島啓雄・宮腰靖之 (2013) 十勝川水系におけるサケ・サクラマスの産卵環境評価 (資料). 北水試研報, **84**, 47-56.
- Vollset KW, Barlaup BT, Normann ES (2017) Release during night enhance survival of wild Atlantic salmon smolts. *Fish. Manag. Ecol.*, **24**, 256-264.

Zimmerman MS, Irvine JR, O'Neill M, Anderson JH, Greene CM, Weinheimer J, Trudel M, Rawson K (2015) Spatial and temporal patterns in smolt survival of wild and hatchery Coho Salmon in the Salish Sea. *Mar. Coast. Fish.*, **7**, 116 - 134.