

技術小史

さけます類の人工孵化放流に関する技術小史（放流編）

関 二郎*

Development of Hatchery Techniques for Releasing Juvenile Chum Salmon in Japan

Jiro SEKI

Annual number of chum salmon returns in Japan has increased since the late 1970's, maintaining approximately 40-80 million fish for recent several decades. It is generally recognized that the increase of chum salmon returns was caused by the development of hatchery techniques including the production of healthy juveniles and the control of their release timing. Ecological studies in rivers and coastal waters are essential to estimate the proper timing of hatchery releases for better survival of juvenile salmon. Coastal salmon studies started since 1969 in northern Japan, and clarified several ecological aspects of juvenile chum salmon such as special coastal distribution, migration, growth, and feeding during their early coastal ocean life. At the same time, rearing techniques were drastically improved after introducing artificial feed, which allowed hatcheries to produce lots of healthy juvenile salmon and to control the timing of their releases. A growth model based on coastal seawater temperature and body size of juvenile chum salmon was used for the assessment of hatchery releases. As a result, the period of hatchery releases became narrow across the coastal waters. Because it is not easy to forecast variation of coastal environments, hatchery release techniques should be improved to reduce risk of early salmon mortalities under a changing climate.

2012年2月14日受付, 2013年5月22日受理

1. はじめに

放流はふ化放流事業工程の最終段階であり、親魚の捕獲から始まり半年以上に亘る長い飼育管理後によくたどり着く。この時期になると多くの孵化場で放流式が行われ、地域によっては小学生や幼稚園児を招待して盛大に行われ、テレビや新聞で報道されるなど北国の春の風物詩の一つとなっている。

さけます類の人工増殖事業において放流の技術的観点から次の3点が挙げられる。1つ目は放流時期を決定する考え方であり、2つ目は放流時の稚魚の取り扱いに関する技術的問題であり、3つ目として資源造成を目的とした稚魚の輸送を含めた放流に関する技術である。本稿ではこれらの3点について、サケを主体として歴史的変

遷を含めて記述する。

2. 適期・適サイズ放流

(1) 適期放流の概念

日本のサケ資源が1970年後半から増加し、近年では資源の変動は在るものの4,000～8,000万尾弱の高位安定を保っている。このような資源の増大は適切な時期に稚魚を放流するといういわゆる「適期放流」の考えに則って放流が行われた成果であることが広く認識されている。

「適期放流」の概念を簡潔に言えば、「サケ稚魚にとって最適な環境条件下で放流すること」と言える。この「適期放流」の概念が始めて提示されたのは、1964年に

* 〒061-1372 北海道恵庭市恵み野南4丁目5-4
(元独立行政法人水産総合研究センター さけますセンター職員)
4-5-4 Megumino minami, Eniwa, Hokkaido 061-1372, Japan
(Former Research Division Director, National Salmon Resources Center, Fisheries Research Agency)
isotutuji@apricot.ocn.ne.jp

ソビエト連邦（現ロシア）のサハリン州で開催された日ソ増殖専門家会議において、日本側委員の逸見文彦氏が「サケ・マス稚魚の降海までの間の生残率及びその改善対策について」の演題で報告したのが初めてである¹⁾。この報告ではサケの資源を増大させるためには、“自然的環境条件に十分対応しうる健康な稚魚を作らなければならない”ことと、“放流期における河川内及び沿岸の自然餌料の時期的、量的消長を調査し、餌料生物の豊富な時期に稚魚を放流するようにしている”ことを挙げている。この報告は「日本国内で行っている孵化放流の現状」について発表したものであるが、日本側委員として出席していた小林哲夫博士によれば、当初予定していた講演内容を急遽変更し、小林博士の考えを基に、「今後行うべきこと」について発表したのが実情であったとのことである。小林博士は1970年12月にナホトカで行われた「極東系さけ・ますの再生産問題に関する日ソ専門家会議」でも“稚魚の降海時期が生き残りに大きな関係がある。（略）適切な時期に沢山の稚魚を放流することが資源増大の手段”と発言し、放流時期の重要性を指摘している²⁾。この考えはその後“健苗育成”と“適期放流”という簡潔な言葉でふ化放流事業の従事者に広がりその沿岸域の環境も考慮した放流技術確立のための調査研究が行われるようになった。

このように、さけます類の初期生活期に対する沿岸環境の重要性が認識されたのは1960年代になってからであるが、淡水域については既に1930年代に半田³⁾が放流は河川や湖沼での天然餌料が増殖する時期に行うべきことを指摘している。河川整備が余り進んでいなかった1950年代頃までは河川周辺の三ヶ月湖などの沼沢地帯で動物プランクトン類が大量に増殖するので、サケ稚魚にとって格好の摂餌水域であったと思われ、小林・石川⁴⁾も千歳川、石狩川の中下流域ではサケ稚魚が湖沼地帯から流出した動物プランクトンを大量に摂餌していたことを報告している。この頃までに見られた沼沢地帯の多くはその後の河川の改修や農地整備によりほとんど消滅したので、現在では大量の稚魚が河川湖沼域に滞留しながら天然餌料で成長することを期待することは望むべくもない。沼沢地帯が豊富に存在した時代に沼沢域に滞留した放流稚魚の割合や滞留期間は明らかで無いが、一般に放流された稚魚の降海する速度はかなり速い。放流されたサケ稚魚の多くが河口まで到達する日数は、河口までの距離が80kmの千歳川でも7～10日⁵⁾、網走川でも放流から2旬以内にその多くは降海し、特に大型の稚魚の方が早い⁶⁾。また小河川ではその多くは1日程度で降海すると推定されており⁷⁾、河口付近の沼沢地の発達が少ない日本において放流稚魚が初期の棲息域として沿岸域を利用する度合は極めて高い。このことから見て、小林がサケの初期生活期での沿岸域の餌料環境の重要性を指摘したことは現在から見ても高く評価される。

一方、放流後の環境条件に対応し得る健苗の生産は

1970年代以降の施設拡充と技術向上によって安定した種苗生産量が確立している。当然“適期放流”は“健苗育成”があって始めて成り立つ概念であり、この両者は人工ふ化放流事業を成功させるための対になる重要な要素である。

サケ稚魚の放流適期を知るには、河川および沿岸域での生態を明らかにすることが不可欠であるが、1964年の段階ではサケ幼稚魚の沿岸域での生態的知見は極めて乏しく、佐野・小林⁸⁾や三原⁹⁾の断片的な報告が見られるだけであった。沿岸域でのサケ幼稚魚の生態についての調査は1965年に釧路沿岸域で行われているが、その調査内容は限られたものであり¹⁰⁾、沿岸域での生態を知るには程遠いものであった。沿岸域でのサケ稚魚の生態を明らかにする努力が欠けていた理由として、当時ふ化放流事業を行っていた「さけ・ますふ化場」の放流事業は河川内で完結するという考えが主流であったことが大きかったと思われる。

(2) 沿岸水域での幼稚魚調査

日ソ増殖専門家会議の開催から4年後の1969年に、サケ幼稚魚の沿岸域での生態調査を目的とした「沿岸水域調査」が北海道の噴火湾で初めて行われ、沿岸域におけるサケ稚魚の分布、移動、成長、食性などの一端が明らかになった¹¹⁾。この時実施された調査項目は、その後のさけます幼稚魚の生態調査でもほぼ踏襲され現在に至っている。さけます幼稚魚に関する生態調査は、その後本州まで拡大され、1973年から2002年までの29年間に亘り国の補助事業として13県において試験研究機関を中心に沿岸域の調査が実施された。これらの調査事業に平行して、さけます資源の増大を目的とし、1977年から1981年までの5年間に亘り北海道、本州太平洋、日本海及び沖合の4グループ構成で『サケ別枠研究』が行われた。その中で淡水生活期から沿岸からの離岸時期までの生態が調査され、その生態に合わせた増殖技術の開発が行われた。現在ではさけます類に関する沿岸域の調査は、本州では岩手県など数県で継続されているに過ぎないが、北海道では北海道区水産研究所、さけます・内水面試験場が継続的に調査を行っている。

小林¹²⁾は北海道から本州にかけて太平洋14定点、日本海9定点、オホーツク海6定点の29定点での沿岸部の表面水温から3月1日を起点とした水温上昇の回帰直線を求め、それぞれの地区での放流終了の目安となる沿岸水温を推定した。それによると、無給餌で平均体重が0.366gで放流されたサケ幼稚魚の沿岸での成長は $W=0.366e^{0.392X}$ （W：体重g、X：放流からの経過日数）で示され、沖合生活に移行する3gになるには約50日を要することになる。稚魚の放流は、沿岸から稚魚が見えなくなる表面水温15℃に達する50日前までには終了すべきであり、この50日前の水温条件は上昇の傾斜が急な地区では7～8℃、緩やかな地区では10℃前後と推定

している。その後の沿岸域でのサケ稚魚生態調査によって、表面水温 13℃以上になるとほとんど分布が見られなくなることから^{5,13)}、無給餌の稚魚の放流終了の目安となる沿岸水温は、小林の推定した値より低い。

サケ稚魚は『雪代水と共に降海する』と古くから言われているように融雪増水期に降海することが知られていて、サケ稚魚は 0℃前後の低温にも十分に堪えられることが判る。「適期放流」の概念が唱えられた当初は、沿岸水温 5℃をサケ稚魚の放流開始の目安としていた¹⁴⁾。この理由として、天然のサケ稚魚の降海盛期の沿岸水温は 5～8℃であること¹⁴⁾、北海道で飼育しているサケ稚魚は 5℃以上になると摂餌欲が増加することが観察されることなどがあげられている。ただ、真山（未発表）によればサハリンのサケは 4℃での遊泳行動は極めて不活発であるにも拘わらず、給餌した餌に対しては活発に反応するとのことで、サケの水温に対する摂餌反応には地域差があるものと考えられる。また、自然界においても秋季のオホーツク海に分布する体長 20cm 以上に成長し不適な水温環境を忌避する能力の高い幼魚が 5℃以下の海域にはほとんど分布しないこと¹⁵⁾などからもサケ稚魚の生息に適する下限水温は 5℃と見ることができる。

(3) 稚魚の給餌と放流時の体サイズ

1892年に藤村¹⁶⁾は稚魚の放流時期を調整するため給餌を行う事が有効で、その餌料として肝臓、蚕蛹粉末、イサダ粉末、エビ粉末などを挙げている。北海道では 1902～1906 年度まで動物性飼料を与え 6 月中下旬頃に放流していたが^{17,18)}、その後は無給餌で臍嚢吸収したもののから順次放流する方法に変更され、それ以降 60 年以上に亘って無給餌で飼育した稚魚が放流された。この間、半田³⁾は放流後の外敵や水の増減による影響などに対する抵抗力が増加するまで給餌飼育するか天然餌料が豊富な河川池沼に放流することを提唱したが、同時に人工餌料による飼育は経費の面から実用的でないことも指摘していて、長期間に亘って無給餌で放流されていた理由の一つが経済的問題であったことが窺える。

1950 年代後半になりサケ稚魚の放流量が急増したため、河川内での天然餌料による成長が期し難く、さらに河川開発によって天然餌料の供給力そのものが衰退していると考えられたことから、北海道さけ・ますふ化場の数事業場において、1962 年級群を対象に「鮭鱒稚魚飼育事業」が開始された。この事業開始に先立ち、1962 年春にサケとカラフトマスを対象にして千歳と根室支場でスケトウダラ卵と鮮魚肉、粉末肝臓、脱脂粉乳などを配合した餌を使用して飼育試験を行い、3～4 週間の給餌期間でサケとカラフトマスの体重がそれぞれ 0.3g と 0.1g 程度増加することが確認された¹⁹⁾。この飼育実験結果に基づき、1962 年級群のサケとカラフトマス合わせて 3,000 万尾を 3～4 週間給餌飼育した後に放流した。給餌飼育事業に用いた餌は、開始から数年間はスケトウ

ダラ卵や鮮魚肉などの生餌を主体としその他の材料を加えたもので、事業場内でコンクリートミキサー機によって混合し作成していた。1967 年になって全面的に乾燥配合飼料に切り替えられ、生餌を保存する間に度々生じていた脂焼けなどの原料の劣化の心配と、餌の配合作業から解放された。その後工業生産された餌料が安定的に供給されるようになったため給餌飼育する尾数も年々増加し、1976 年には放流数の 82% に達し、1985 年以降には 95% 以上が給餌飼育後に放流されるようになった。

放流稚魚の平均体重は無給餌放流で放流されていた 1957 年には道内 42 ふ化場全体では 0.19～0.91g の範囲であり、そのうち 0.3g 台が 15 箇所、0.4g 台が 14 箇所と両方で 70% を占めていたが²⁰⁾、給餌初年度の 1962 年級群で給餌飼育された稚魚の平均体重は 0.79g と無給餌放流群の 2 倍近い体重となっている。その後給餌飼育割合は徐々に増加し、1975 年級群では 68% に達し、この間の平均体重は 0.8g を越えていた。それ以降も給餌割合は急激に増加したもののその割合が 80% を超えた 1976 年級群になると平均体重は 0.6g 台に低下し、給餌対象尾数の急激な増加に対し投餌量がそれほど伸びていかなかったことが窺える。この傾向はほぼ 10 年間続いたが、1986 年以降には再び 0.8g を越え、1990 年以降は常に 1g 以上の稚魚が放流されている²¹⁾。関²²⁾は北海道太平洋沿岸の主要 4 孵化場から放流されたサケ稚魚の放流時体重は 1980-1984 年に比較して 1994-1998 年の方が大きくなっているばかりでなく放流時期も遅くなっている事を指摘しているが、近年はさらに放流開始時期が遅くなり終了時期が早まり、同じ時期で比較するとより大型の稚魚が放流されている（図 1）。この傾向は全道的に見られ、給餌飼育の導入によって放流時期を決定する自由度が高まったことを示している。

一般に放流時の体サイズが大きい方が初期生残が高いと考えられているが、給餌飼育によって放流時期が遅くなると放流時の体サイズは大きくなるので、回帰率に及ぼす影響は放流時期、体サイズの何れの方が大きいかは古くから注目されていた。そのため、サケ稚魚の放流時期と体サイズの違いによる回帰率の差異についての比較実験が 1970 年代から幾つか行われている。それらの結果では、1973 年の千歳川と 1986 年の広尾川で行ったサケの実験放流では何れも放流時期が遅くなりかつ体サイズが大きい放流群の方が回帰率は高い^{23,24)}。しかし、1974 年春に北海道の根室海峡に面した西別川に放流した 3 群の 3 年魚までの回帰率は、3 月の早い時期に放流した群が最も高く次いで最も遅い 5 月放流群で、4 月に放流した群が最も低い結果となっている²³⁾。カラフトマスについての同様な放流試験では、道南の遊楽部川から放流した群で放流時の体サイズが大きいほど回帰率も高くなっているが、道東の西別川では無給餌の小型群の方が給餌した大型群より回帰率は高く逆の結果となっている²³⁾。その後、さけ・ます資源管理センター（現

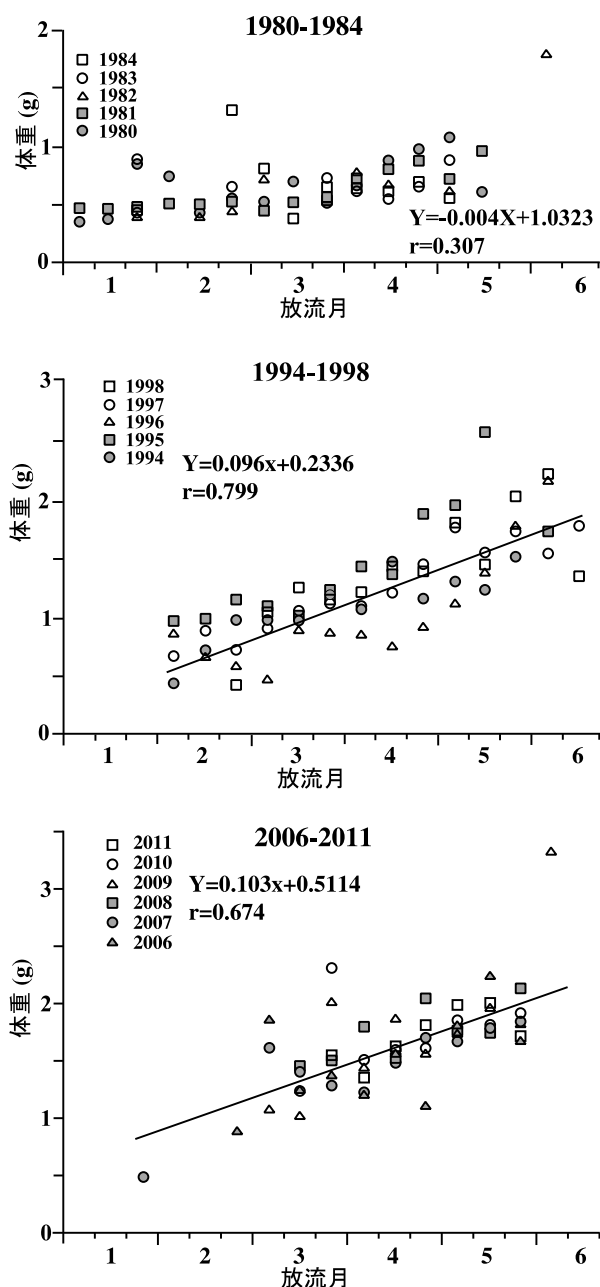


図1. 北海道太平洋沿岸の主要4河川(敷生川, 静内川, 十勝川, 釧路川)全体の放流時期(旬別)と放流時の体サイズの変遷

北海道区水産研究所)では1996年から2001年までの5年間に亘り、北海道内の12河川集団を選定し、各河川集団におけるサケ稚魚の適正な放流時期と体サイズを検討するため標識魚による放流実験を行なった。これらの回帰標識魚の解析結果では大きくは2グループに分けられた。一つは日本海、オホーツク海のグループで、比較的放流日が遅く大きいサイズでの放流群が高い回帰率を示した。もう一つは北海道太平洋東側から根室海峡へかけてのグループで、回帰率は最初に放流した群の放流時の沿岸水温によって異なった。すなわち、最初の放流群の放流時の沿岸水温が4.8℃以下では、遅く放流した体サイズの大きい方が回帰率は高く、4.8℃以上では放流

時期の違いによる体サイズの大小と回帰率には差がない場合が多く見られた。これらの実験放流では最初の放流群の平均体重は沿岸水温が4.8℃以下では1g以下であったものが多く、4.8℃以上の場合では多くは1.2gを越えていた²⁶⁾。SAITO and NAGASAWA²⁷⁾は1976～1998年の22年間に亘る放流時の平均体重と回帰率との関係を解析し、放流稚魚の体重が0.5～1.3g程度で放流されるオホーツク海や根室海峡の地域での回帰率は放流時の体重が1g以上であると回帰率は有意に高くなるが、放流時の体重が1.2g以上で放流される北海道太平洋西部、本州太平洋では放流時の体サイズと回帰率に相関は見られなかった事を報告している。

給餌飼育が行われるようになった結果、飢餓状態を経験することのない健康な稚魚を任意の時期に放流することが可能となり、稚魚の生態から考えられる「放流適期」に放流するような飼育管理が行われるようになった。放流時の体サイズと回帰率の関係をみると、大きいサイズの方が高い回帰率を示すことが多いのでより大きいサイズでの放流が推奨されている。しかし、戸叶²⁶⁾やSAITO and NAGASAWA²⁷⁾の結果が示唆する様に、地域によってはあるサイズ以上で放流しても回帰率の向上に寄与しないことも考えられるので、孵化場運営の経済的の面なども踏まえて地域毎に最適な放流サイズを決定することが必要と思われる。

1970年代から行われてきた放流サイズと時期に関する多くの実験放流では、小さいサイズの稚魚は放流時期が早く、大きいサイズの稚魚は放流時期が遅かったので、これらの条件のどちらがより回帰率に寄与しているのかは明らかにされていない。唯一西別川で行った1974年春の放流実験では早い時期の放流群で高い回帰率となっていて、この理由として標識魚の再捕努力の差、来遊時期と沿岸漁獲強度の違いなどが挙げられている²⁵⁾。

異なる時期に同じサイズの稚魚を放流するには異なる遡上時期の採卵群を使用すると容易に目的のサイズを育成することができる。しかし、遡上時期が異なると回帰時の沿岸漁獲強度が異なり、この差異が回帰量に及ぼす影響割合を推測することは困難である。このため、回帰に対する放流時期とサイズの2条件の寄与率を明らかにするには、同一採卵日の卵を使用して、同一日に異なるサイズ群を又は同一サイズ群を異なる日に放流する必要がある。しかし、現状での孵化施設は資源造成を目的としたものであるため実験放流に必要な飼育施設、設備として十分なものとは言えず今後この様な実験放流が可能な施設を設ける必要がある。また、対象とする群間のサイズ条件を満たしたとしても、後述するように健苗性の評価方法が未だ確立されていないため、飼育水温や投餌量(率)を変えてサイズ調整をすることが健苗性へどのように影響しているかを評価することが困難なことも問題の一つとして挙げられる。

(4) 放流の評価モデル

千歳川に放流された標識魚の沿岸域における追跡結果から、尾叉長7cm（体重3g）になると沖合へ移動するので、沿岸に滞留可能な上限水温である13℃までにこのサイズに成長することが生残るために必要である²⁸⁾。一方、各種の標識放流実験によって放流された標識魚の、放流から沿岸域で再捕されるまでの成長量から求められた日間成長率は海域により違いはあるものの尾叉長で見れば0.0050～0.0138の範囲にあり^{13, 14, 22, 29)}、0.01前後の値が多い（表1）。

これらの条件を基に、野川³⁰⁾は本州日本海側の1987年と1988年の2年間の放流時の体サイズと放流時期に

表1. サケ再捕標識魚の海域毎の日間成長率

日間成長率		海 域	発表著者
尾叉長 (mm)	体重 (g)		
	0.392	噴火湾	小林 ¹⁴⁾
0.0050-0.0118		宮城県北部海域	掃山 ²⁹⁾
0.0054-0.0082		釧路市桂恋港	入江 ¹³⁾
0.0075-0.0138		広尾沿岸	関 ²²⁾
0.0103		静内沿岸	関 ²²⁾
-0.0025-0.0106		敷生沿岸	関 ²²⁾

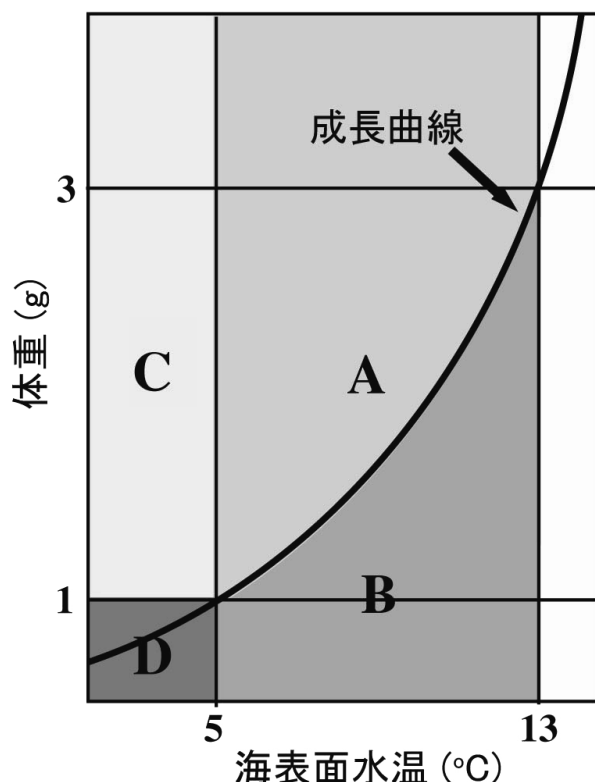


図2. 放流時期と体サイズの区分モデル
沿岸表面水温5℃：稚魚が活発に摂餌する最低水温、放流時体重1g：回帰率が高まる体サイズ、成長曲線：沿岸での分布が見られなくなる沿岸水温13℃までに体重3gに達する曲線（A：放流時水温5℃＜、放流時体重1g＜、水温13℃時体重3g＜、B：放流時水温5℃＜、水温13℃時体重3g＞、C：放流時水温5℃＞、体重1g＜、D：放流時の水温5℃＞、体重1g＞）

ついて解析した結果、適切な放流条件を満たして放流された群は全放流数の30%以下に過ぎないことを明らかにしている。多くの孵化場では飼育施設能力以上の稚魚を収容しているため沿岸水温が放流可能な時期に至っても適切なサイズまで成長出来ないことがその要因となっている。そして本州域での回帰資源が増大しないのは、このような放流条件を満たす割合が低いことが主な原因であると結論づけている。

1998年以降の放流サケ稚魚についてさけ・ます資源管理センターが中心となって放流時の沿岸水温とサイズの2条件を基に図2に示すモデルを作成し放流状況を評価している。前述したようにサケ稚魚は、水温5℃以上で摂餌欲が増加することから5℃以上での放流が望ましい。また、体サイズから見て回帰率は1g以上で有意に高くなることから1g以上で放流することが望ましいと言える。さらに、稚魚が沿岸離脱する上限水温は13℃でその時点で3g以上になっている必要があることも指摘されている。図中の曲線は13℃時点で3gに達する成長曲線を示したもので、沿岸離脱時にはこの曲線よりも高い成長であることが求められる。これらの水温条件と体サイズ条件によって4つに区分される。すなわち、サケ稚魚の放流時の沿岸水温が5℃以上かどうかと放流体重が1g以上かどうか、また離岸期に当たる表面水温13℃の時点で体重3gに達するかどうかである。図2に示す4エリアのそれぞれの条件は、Aエリアは放流時の表面水温5℃以上で1g以上で放流され、離岸期に3g以上に達し全ての条件を満たすもの。Bエリアは放流時の表面水温が5℃以上を満たすものの体重が1g以下のもの。Cエリアは放流時の体重が1g以上の条件を満たしているが表面水温が5℃以下の時期に放流されたもの。Dエリアは放流時の表面水温が5℃以下で体重が1g以下で、水温、体サイズ共に条件を満たしていないものである。この図では表面水温と体重の両条件を満たすAエリアの放流群が適期放流群と見なされる。2000年春の放流状況を見ると地区により異なるものの、Aエリアに該当する時期に放流されている稚魚は北海道全体で35%弱に過ぎず、岩手県を除く本州各県では石川県がほぼAエリアで放流している以外は概して30%以下となっている³¹⁾。このモデルは1998年に作成され、それまでのサケ稚魚の生態についての知見に基づいたものである。今後、北海道で1996年以降に大規模に行われた標識放流実験や、最近全国的に行われている耳石温度標識による標識放流の回帰結果の解析を早急に行い、あらたな知見を取り入れて、このモデルの妥当性を検討する必要がある。

真山ら³²⁾はサケ稚魚は沿岸表面水温が低い時期には水深5m以内の極沿岸部に分布し、8℃に昇温すると分布水域が沖側に広がることを明らかにした。オホーツク海では放流時期に8～13℃に達する時期が早い年と、13℃を超える時期が早い年の年級群は回帰率が高い傾向

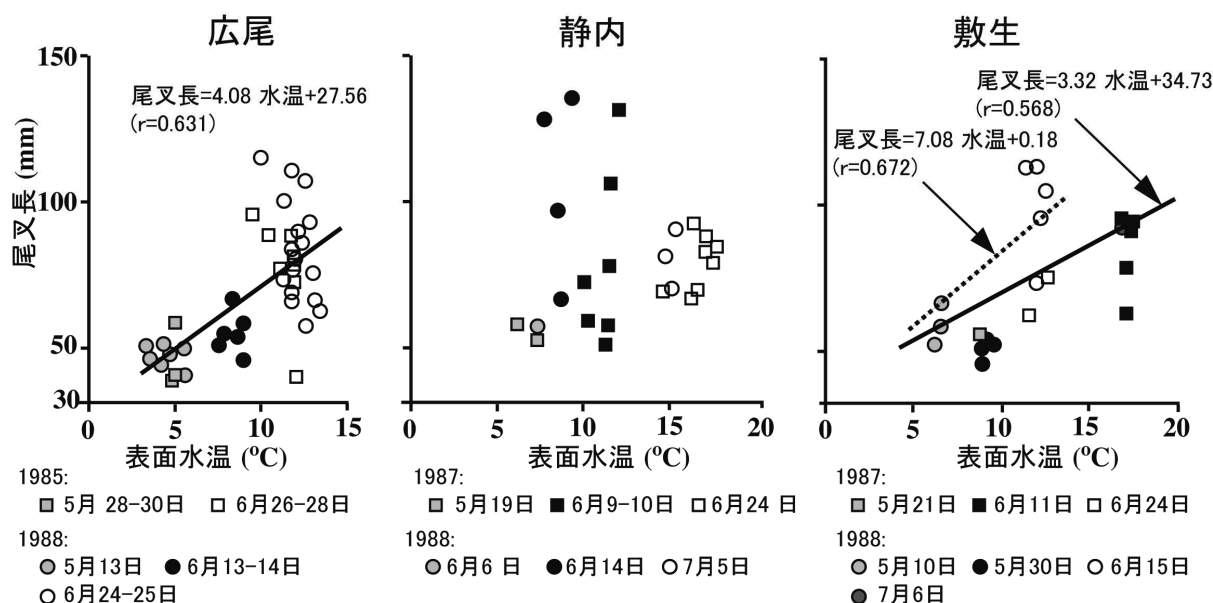


図3. 広尾沿岸, 静内沿岸, 敷生沿岸で採捕されたサケ幼稚魚の平均尾叉長 (mm) と採捕時の表面水温 (°C)

が見られる³³⁾。また、高橋 (未発表) も釧路沿岸では5月下旬の沿岸水温8°Cラインの形成される位置が岸寄りである年の年級群は回帰率が高くなることを指摘しており、沿岸水温が8°Cに達する時期の動向がサケ幼稚魚の初期生残に影響を及ぼしている可能性が指摘されている。秋季のオホーツク海に分布するサケ幼魚の密度は表面水温7~9°Cの海域で高い¹⁵⁾。また、北洋でのサケの漁場形成水温は4~10°Cで³⁴⁾、5~7°Cで漁獲量の多い³⁵⁾ことが知られている。これらのことから、サケは好適水温の選択能力 (すなわち移動能力) が高くなるに従って棲息水温の幅が狭くなっている。このようなサケの分布状況から見て、7~9°Cの水温帯はサケにとって好適な水温帯であり、この水温帯を継続的に移動回遊出来ることが生残率を高めることになっているのかも知れない。

サケ幼稚魚は沿岸域で表面水温17°Cでも分布が確認されているが²²⁾、13°C以上では極めて稀である。関²²⁾は北海道の太平洋沿岸で採捕された幼魚の尾叉長から、表面水温が12°Cまでは尾叉長は増加するがそれ以上の水温になると減少することを明らかにし (図3)、その理由として表面水温12°C以上になると成長が劣る個体でも沿岸からの移動を迫られるためと推測している。このことから表面水温13°Cはサケ幼稚魚の沿岸分布の上限値であり、放流適期の水温帯の上限は12°C以下と考えるべきなのかも知れない。12°C以上の水域に分布する成長の劣る個体が資源となっているかは明らかで無いが、もし成長出来る上限水温を12°Cとすれば、それまでに移動可能な成長量を確保出来る稚魚を放流する必要があることになる。

(5) 健苗性

孵化放流事業の成功は“健康な種苗を育成し、適切な時期に放流する”ことに尽きる。如何なる放流方法を用いても肝心の種苗が虚弱なものであってはその成功がおぼつかないことは自明のことである。健苗育成の課題については主に飼育管理の稿で論じるべきものと考えますが、放流時に健苗性についての評価が試みられていることからその概要について述べる。

放流時点での稚魚の健苗性を評価するための指標で未だ確固たるものは確立されていないが、指標として肥満度、海水適応力、スタミナ (遊泳能力)、ATP等について有効性が検討されてきた。サケ稚魚を直接海中に入れると肥満度が7.0以下の個体で死亡率が高いことや³⁶⁾、20日間程度絶食させた個体の死亡率が20%に達することなどから、成長や栄養状態の悪い個体は海中での生存率が低くなる傾向がある³⁷⁾。

原虫病や細菌性鰓病に罹患した場合にも塩分耐性が低下する。特に1980年代になり、鞭毛虫類のイクチオボド (*Ichthyobodo* spp.) が体表に大量寄生すると表皮組織が破壊され、サケ稚魚が降海時に脱水されて大量死亡することが感染実験により初めて示された³⁸⁾。イクチオボドは約40%の孵化場で発生しており、放流魚の生残率を高めるため、放流前に寄生虫検査を実施し、必要に応じて駆虫処理を行う必要がある。駆虫方法としてホルマリン浴が極めて有効であるが、2003年に薬事法が改正され水産薬としての使用が禁止された。代替となる安全な駆虫方法の開発が必要である。

海水適応能力の低い個体が多い稚魚群は成長や健康面で問題があると推測できるので、1989年頃から当時の北海道さけ・ますふ化場管轄の事業場において、放流群

毎の塩分耐性試験が開始され今日に至っている。

海水適応能試験の方法は、60L以上の水槽を使用し、33%の人工海水1リットル当たり1尾の稚魚を入れ、エアレーションを行いながら48時間後の生存数を見るもので³⁹⁾、ほとんどは100%の生存率を示すが、時には80%台の低い生存率の場合も見られる。低い生存率の群の多くは回帰率も低いが、100%の生存率でも回帰率が低い場合が見られ、この試験で得られた生存率と回帰率との間にどの程度の相関があるのかは未だ十分に検討されていない。

小林・大熊⁴⁰⁾は流速に抗する遊泳力が稚魚のスタミナを示しているとの観点から、遊泳力を現場で簡便に測定できる装置を開発した。稚魚の瞬発遊泳速度が大きいと攻撃行動、捕食者からの逃避、餌の捕獲などに有利に働き、放流後の生残に有利に働くと考えられるが、遊泳力と健苗性ととの具体的な関係については明らかにはなっていない。稚魚の遊泳力は飼育された環境によって異なり、飼育密度が高い場合や、流速の少ない池で飼育された稚魚は遊泳力の低下が見られ、特に立体式孵化器で管理された稚魚は著しく遊泳力が劣る事が指摘されている。平均游泳速度29.8cm/分の稚魚を0.561m²の水槽を用いて、注水量を74L/分(A群)、30L/分(B群)、23L/分(C群)で飼育した時に、遊泳力は8日後にはA群1.70倍(50.7cm/分)、B群1.41倍(41.02cm/分)、C群1.06倍(31.59cm/分)に向上し、28日後にはA群は1.74倍、B群1.69倍、C群1.65倍となった。遊泳力は飼育する水槽が大きいほど向上するが、その度合は29日後でも最大で1.56倍程度であった⁴¹⁾。サケ稚魚の遊泳力は最大で50cm/分程度と見られるが、遊泳力の低い稚魚の遊泳力をこのレベルまで向上させるには流速を与えてトレーニングする事が有効で、流速が大きいほど回復する時間は短くなるが、ある程度の流速を与えると1ヶ月程度のトレーニングで最大遊泳力近くまで向上させることが出来る。

サケ稚魚の飼育密度が高い程体内の異物排出能力を増大させるためのATP含量が増加し、ATP synthase (AST) 遺伝子が減少するが、この変化は健康状態の悪化に起因すると考えられることから、これらの値はサケ稚魚の健康状態の指標になると考えられている⁴²⁾。また、ATP量が成長や飢餓耐性、遊泳速度と相関が認められることから種苗性の指標となり得る可能性も指摘されている⁴³⁾。サケ稚魚体内のATP含量はクエン酸鉄を添加した飼料を与えることで増加するのでクエン酸鉄を与えることによってサケ稚魚の健苗性の向上を図ることが出来る可能性がある⁴⁴⁾。

ここで挙げた健苗性の指標の中で、遊泳力の回復方法とATP含量を増加させるクエン酸鉄添加飼料の給餌は指標と言うよりは健苗性の向上に直接繋がるもので、特にATP含量を増加させる餌料開発の具体的方法について検討すべきであろう。

(6) 減耗リスクの低減

SAITO *et.al*⁴⁵⁾は根室海峡に面する河川から放流された1999～2002年級群の回帰結果を分析し、2000年級群は2001年春の海洋生活初期の沿岸域では餌の量が多く⁴⁶⁾明らかに成長が良かったにもかかわらずその回帰率は平年以下であった事を明らかにしている。また、最近北海道内で広く行われている耳石温度標識魚の放流幼稚魚の沿岸で採捕された幼稚魚の解析結果から、襟裳岬東側の釧路川や十勝川で放流された標識魚が襟裳岬西側の白老沿岸まで回遊していることが確認されている⁴⁷⁾。これらのことから、降海したサケ稚魚は放流河川付近の狭い海域だけでなく広い範囲の沿岸環境に影響を受けていることが判る。さらに、日本系サケ幼魚は越冬直前までオホーツク海に生息することから⁴⁸⁾、沿岸域の環境ばかりでなく、少なくともオホーツク海へ回遊するまで好適環境が連続していることが高い生残率の条件と考えられる。

稚魚の放流後は人為的な操作は一切できないので、高い回帰率を得るためには放流後の生息海域の環境変動による減耗リスクをいかに減少させるかが重要な放流技術となる。そのためには自然界における減耗は避け難いものとして、そのリスクを分散するような放流操作を行うことが肝要である。図4は採卵したサケ卵の放流までのロット管理を模式的に示したものである。多くの孵化場では、サケの採卵が数ヶ月に亘って行われ、採卵された卵はボックス型孵化器を使用した場合約50万粒が1ロットとして管理され、それらのロットの多くは1日分で満たされるが採卵数の都合によっては数日分の卵が含まれる。次の段階の養魚池では一面当り100～200万粒を収容するので卵期での数ロット分が養魚池では1ロットとして管理される。さらに飼育池では一面当り300～400万尾飼育されるので、複数面分の養魚池の稚魚が1面の飼育池に1ロットとして収容管理される。特に採卵数の少ない時期のロットでは、工程が進むにつれて1ロットに含まれる採卵日の日数が拡大していく危険性が大きい。この様な場合、放流が飼育池単位で一斉に行われ

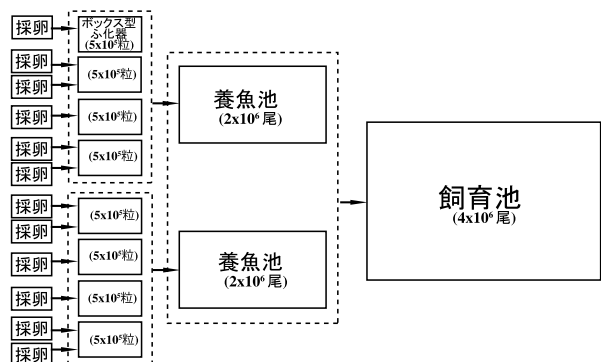


図4. 孵化場における採卵から放流までのロット管理の概念図
発育段階が進むにつれてそれぞれのロットが統合されてくる

ると、放流後の生息環境条件が劣悪であった場合には採卵日の近接した稚魚が一斉に高い減耗を受けることになり、特定の期間の資源が極端に減少する可能性がある。この減耗リスクを避けるためには、採卵日の近接した群はある程度の日数の中中で数回に分けて放流することが望ましいと言える。



写真1. 飼育池の排水部の構造
A：水位調整用堰板，B 稚魚の流下防止用網
一斉放流の際は A，B 双方を取去り，自然放流の場合は B のみを取去る

サケは通常は飼育池から放流水路を経て河川へ放流される。写真1は飼育池の排水部の構造を示したもので、通常池の排水部のコンクリート壁に2～3本の溝を設け、内側の溝に金網を張り稚魚の流下を防ぎ外側に嵌めた堰板によって水位を調整している。飼育池からの放流はこの構造を活用し、外側にある排水部の堰板を全て取り払い一斉に放流する方法と、堰板の内側の金網だけを外しオーバーフローした水流に任せて放流する自然流下法がある。自然流下法では全ての稚魚が池から河川に降りるまで一週間以上必要とするため、池の回転効率が悪くなることと、放流期日を特定できなくなるので余り行われていないが、稚魚の自発的行動に委ねた良い方法と考えられる。

3. 補助的な放流技術

(1) 稚魚の活魚輸送放流

明治時代にサケの人工孵化放流を取り入れた目的として、資源量の減少した河川での資源回復と未利用河川での新たな資源造成の2つが挙げられる²³⁾。さけます類の資源の枯渇した河川での資源回復には既に孵化施設が整っている場合には卵の移植が効率的である。しかし、孵化施設に問題を有する場合や、未利用河川で新たな資源造成を図る場合には、稚魚の輸送放流が行われる。近年では孵化放流事業の効率化を目指し、複数の河川で採取した卵を一箇所の孵化場で集約的に管理し、飼育した稚魚をそれぞれの河川まで輸送し放流することも行われている。これ以外にも希ではあるが、飼育時にトラブル

が発生した孵化場への稚魚の補填のための輸送も行われている。サケの移植は古くは全て卵で行われていた。卵の移動時期は、衝撃に対する抵抗力が強い受精直後か発眼期に限られる。受精直後卵は受精後48時間以上経つと抵抗力が低下するため近距離の移動に限られるが、発眼卵は長時間衝撃に対する抵抗力を有するので、長距離輸送を行う事が可能である。すでに1882年には北海道から本州へサケ発眼卵50万粒の移植が行われ、1888年には120万粒が関東、東北地方を中心に、遠く中国地方の鳥根県と広島県まで移植されたことが記録されている⁴⁹⁾。1980年代にも本州に於ける資源増大を目的として北海道から大量の卵が移植され1980年後半には2億粒以上に達し、日本海側は鳥取県、太平洋側は千葉県までの13県へ移植されている。しかし、遺伝的系群保全の観点から、1997年以降は基本的には卵の移動は同じ系群内に限られることとなり、系群をまたぐ長距離移植は行われなくなった。

稚魚の活魚輸送が初めて行われたのは1930年で、国技館（東京）で開催された北海道博覧会のため、サケ稚魚10,000尾とヤマベ（サクラマス）60尾を北海道の千歳孵化場から東京まで鉄道により運搬した。途中、札幌、青函連絡船上、盛岡で水の交換と酸素供給を行い、約46時間を費やして輸送は成功裏に終了した⁵⁰⁾。この活魚輸送はあくまで試験レベルの小規模なもので事業レベルとはほど遠いものであったが、サケ稚魚の活魚輸送第一号となる記念すべきものであった。

半田は1932年以前に部内向けに行ったと思われる“鮭鱒人工孵化法講義”のテキストで、サケ稚魚の灌漑用水への迷入や害魚による食害による減耗を低減するため下流での稚魚放流が有利であることを指摘し、そのために孵化場の下流域への設置、発眼卵または仔魚での運搬、稚魚の輸送を含む3つの方法を提案している。これらの中で技術的には稚魚の輸送が最も困難であることを指摘している。その後、1932年に著した「鮭鱒人工蕃殖論」でも、河川内での減耗を低減するために下流での稚魚放流と、そのために稚魚の大量輸送技術を開発すべき事を提案している。半田のこの提案が基になったと思われるが、千歳川の孵化場より下流に構築されている灌漑用水溝への迷入を防ぐ目的で、サケ稚魚の大量輸送の試みが1932、1933年の2年間に亘って行われている。その方法は生け簀を船の船腹に吊り下げ、灌漑溝の下流まで輸送するものであった⁵¹⁾。しかし、この時は輸送尾数も少なく、しかも輸送が長時間に及ぶなど種々の困難を伴い期待した成果も得られなかったため、わずか2年間で中止を余儀なくされている⁵²⁾。1950年春になると、前回と同様に千歳川でサケ稚魚の大量輸送が再び試みられた。使用したのは長さ3.6m（12尺）、巾0.9m（3尺）、深さ0.3m（1尺）で前後に船首様の着いている分解可能な専用生け簀船で、1回に最大150万尾を輸送可能であった。この生け簀船を用いて直線距離にして約

45km を 7 時間 30 分～ 11 時間 30 分かけほとんど減耗することなく輸送している⁵²⁾。しかし、この様な生け簀船によって河川内を航行して輸送する方法は水深がある程度以上の河川に限られることもあって広く行われることはなかった。

稚魚の陸路による活魚輸送は公式には 1966 年に開始された。しかし、元さけますセンター職員の富樫和弘氏によると、千歳事業場では 1960 年台初めには 10km 程離れた安平川孵化場への陸上輸送が小規模ながら行われていて、30 分程度の輸送行程を酸素供給なしで、水温が高い場合には雪で冷却するなどの簡便な方法で運搬していたとのことである。本格的な陸上輸送が行われたのは 1966 年からで、主な目的は農業用水の取水口への迷入防止であったが、ふ化場から河川までの放流水路が無い場合や水質汚染された河川を避けることなどもその目的となっていた⁵³⁾。また、釧路川支流の途中に流入する温泉水中に含まれる水酸化アルミニウムの害毒を避けるため、1976 年以降輸送放流が行われている⁵⁴⁾。輸送放流が開始された 1966 年には北海道内の 8 水系に 3,270 万尾が輸送放流された。その輸送には主にキャンバス製のタンクが使用され、この時使用されたキャンバス製のタンクのサイズは場所によって異なるが、縦 150～180cm、横 80～90cm 深さ 85～90cm の比較的大型のものと、縦 90cm、横 90cm 深さ 85～120cm の小型の 2 つのタイプがあった。タンク容量は大型で 1.2m³、小型で 0.6m³ なので用水の容量は 0.5～1m³ 程度となり、1 回当りの運搬数は大型のタイプで 10 万～28.5 万尾であった。所によっては蓋付の 35～40L のポリバケツも使用され、その運搬尾数は 3.6～16.5 万尾であった。稚魚輸送用のタンクは 1967 年まではキャンバス製のものだけであったが、1968 年にはステンレス製のものが使用され始め、1969 年以降はアルミ製のタンクの使用も開始された。アルミやステンレス製のタンク容量は 0.7～3 トンと種々見られるが、何れもタンクと用水および魚を含め上限重量が 4 トントラックで運べる仕様となっている。キャンバス製のタンクも魚の重量と用水を含め 4 トントラックで運搬可能な仕様になっていて、容量が 1.5m³ のものは 1 基で 2 トン以内となり 1 回につき 2 基を、3m³ のものは 1 基を運搬する事が可能である。

何れのタンクも放流成績に大きな差は見られないが、ステンレスやアルミ製のタンクは耐久性に優れているが高価で重いことから最近では余り使用されていない。写真 2 はキャンバス製のタンクを使用した放流風景である。一般的なキャンバス製タンクの仕様は、外枠を 30mm 程度の鉄パイプで作り、その内側にキャンバスの膨らみを防ぐための合板を張りその中にキャンバス製のタンクを置いて上部をロープで外枠に固定する。タンク下部側面には径 20cm 程度の放流用の管が設けられている。キャンバス製のタンクは作成が容易で安価であることと、親魚輸送や消毒槽にも転用出来ることなどから多



写真 2. 稚魚の活魚輸送に依る河川への放流風景
4 トントラック上のキャンバス製のタンクからホースを使用して河川に放流している。

くのふ化場で使用されている。

現在では 100 万尾単位の稚魚の輸送は通常の業務として行われていて、1996 年度には北海道内で生産された約 10 億尾のサケ稚魚の約 16% に当たる 16,500 万尾が孵化場間の移動や河川への放流を目的として活魚輸送されている。しかもその輸送距離は 100km 程度は普通に行われていて、例えば北海道後志地方にある京極孵化場では南は檜山地方天の川、北は留萌地方の遠別川まで、羊蹄ふ化場でも遠別川まで輸送放流して⁵⁵⁾その距離は 300km 以上に及んでいる。稚魚の活魚輸送は孵化場間の移動や放流の目的で長距離間を行なっているだけでなく、孵化場内での飼育池間の移動でも行われ、活魚輸送技術は孵化放流事業にとって欠くことの出来ない重要な技術となっている。

前述のように、本格的な稚魚の活魚輸送が 1967 年春に開始され、トラックによって陸路を輸送された。この時には輸送容器は種々のものが使用されたがいずれも運搬中は溶存酸素の低下を防止するための酸素供給と、用水温度の上昇を防ぐため雪や氷を利用するなど現在行われている輸送方法と変わらない技術が使われた。初めて大規模に行った活魚輸送が大きな事故も無く行えたことから、開始 2 年後の 1969 年に出版された「さけ・ます人工ふ化事業実施要項」でも酸素の使用を前提とした留意事項が記載されている。

稚魚を輸送するに当たって、水量に対する稚魚の重量(収容密度)は 1979 年以前には 20% が基準であった。この基準が設定された経緯については明らかでないが、ニジマスなどの活魚輸送を参考にして基準としたのかもしれない。その後、収容密度 10% 区と 15% 区の比較試験を行い、その結果溶存酸素量は 15% 区で 2～3ppm と低く、稚魚の老廃物を起源とする NH₄-N、PO₄-P、SiO₂ も 15% 区の方が高かった。この様に収容密度が

15%でも水質が著しく悪化することが明らかとなった⁵⁶⁾ことから、1980年に収容密度の基準を10%以内に改正している。

稚魚の輸送は移動距離に関係なく酸素ガスが継続して供給され、一定以上の溶存酸素量が確保される。輸送中の稚魚が溶存酸素の不足によって危険な状態になる時の値は2.6～2.7ppmで、その状態になる時間(t分)は次式で求められる⁵⁷⁾。

$t=V/8.37W(a-26)$ 但し V (ton): 水量, W (kg): 運搬する魚の体重, a (ppm): 用水の溶存酸素量

運搬稚魚に対する酸素供給量は多い方が斃死防止には有効であるが、血球数の変化から見ると、過剰になると血液性状やスタミナ面での影響が懸念されている⁵⁸⁾。1969年版のさけ・ます人工孵化事業実施要項では必要な溶存酸素量は7ppm以上となっているが⁵⁹⁾、それ以降のマニュアルには具体的な数値は掲載されていない。酸素の供給量は運搬する魚の重量と距離によって異なるが、ガス圧を1.2～1.5kgに調整し分散器によって気泡を発生させながら運搬している。運搬中の溶存酸素量の測定は特別な場合を除き特に行われることはないが、運搬する魚の状態(鼻上げ、体色の変化など)を見ながら酸素供給量を調節する。酸素の泡は細かい泡が水中に溶け込み易いので、分散器はより細かい泡が発生できる製品が使用されている。運搬時に利用する用水の温度が高い場合や気温が高く昇温の危険がある場合には水を用いて冷却する。

藤原ら⁵⁵⁾は実際の事業で実施されているサケ稚魚の収容密度6.0～7.0%で200km以上の長距離を運搬した時の水質変化のモニタリング結果を解析し、長距離輸送時の水質変化が稚魚に与える影響について検討した。その結果、輸送中のNH₄-N濃度や稚魚の積み込み方法、過飽和溶存酸素の影響など幾つかの項目で検討すべき問題はあるものの、おおむね現在の輸送方法で問題が生じるレベルではないことを報告している。いずれにしても、減耗を防ぐためには稚魚の状態を観察しながら輸送すべきであり、特に溶存酸素量の低下と水温変動に注意しながら運搬する事が肝要である。

輸送放流が開始されて3年目の1970年に「多目的輸送タンク」の作成が計画された。当初の条件として、容量1～2m³のタンクに200kg/m³の密度で魚を収容し水温4～8℃を保持しながら24時間運用可能なものでかつ4トントラックに積載可能な重量が提示された。しかし、実際の設計段階ではアンモニア除去装置、エアレーション、酸素供給、暖冷房などの装置などが付随した3m³のタンクで8時間の運用可能なものでその重量は6トン近くなり、見積価格も540万円と高額なものとなったこともあり、タンクは実際に製作されることはなかった。

1963年7月に本邦では珍しいヘリコプターによる稚魚の輸送試験が行われている。寺尾・菊池⁶⁰⁾は支笏湖の上流にあるオコタンペ湖へサケとヒメマスの交配種

3,000尾を酸素封入したポリエチレン袋に入れ、この袋を段ボール箱に収めてヘリコプターで運搬し、湖岸からと水面10m上から放流した。放流直前の稚魚は体色に変化し活動力も低下するなど運搬方法に問題が見られたものの、何れの放流方法でも斃死魚は見られなかった事を報告している。

(2) 海浜域への直接放流

サケ資源が増加したものの、地域的には依然としてその資源量に不均衡が見られる。その原因の一つとして、ふ化用水の不足や適当な放流河川が無いなどの地形的な問題が挙げられる。これらの地形的な制約によって資源量の増大が困難な地域において、サケ稚魚を直接海浜域に放流することにより漁業資源の造成を図る試みが行われた。サケ稚魚の海浜域に放流する技術的な問題点と、漁業資源育成の可否について検討するため、1987年から1990年の3年間に亘り、北海道オホーツク沿岸の目梨泊港および枝幸港と太平洋沿岸の静内港に放流したサケ稚魚について沿岸域での回帰追跡調査が行われた。

ふ化場から放流する港湾までの稚魚の輸送は概ね河川への輸送放流に準じ運搬重量は水量の10%としたが、用水は輸送中に海水馴致が行われることを目的に、海水に等量の淡水を加えた50%海水とした。放流場所は最寄りの港湾である目梨泊、枝幸、東静内の3カ所で、運搬した稚魚は岸壁よりホースを使用してタンク内の水と一緒に直接海水中に放流した。この運搬による稚魚の死亡個体は見られず^{61,62)}、東静内放流群の標識魚は放流48時間後には6km離れた近隣の港湾で再捕された²²⁾。

サケ稚魚を放流した目梨泊と枝幸の両港において1992、1993年の両年に、多数のサケの滞留が認められた。いずれも成熟の進んだ所謂BブナからCブナの個体で、その年齢も放流したサケの回帰年齢とほぼ一致し標識魚の混入割合と放流時の混入割合がほぼ同じであったことなどから本試験によって放流されたものである可能性が極めて高かった^{61,62)}。海浜域への直接放流と河川への放流との回帰効率の差などは明らかにされなかったものの、この方法による沿岸の漁業資源造成は十分可能であると言える。しかし、港に来遊したサケの沿岸での回遊経路や港に滞留した後の回遊経路は明らかに出来なかった。この方法で放流したサケは沿岸滞留期間が長くそのほとんどは沿岸で漁獲されると推測されるものの、一部の成熟したサケが再生産の場所として多くの河川に分散遡上し、遺伝的交雑が生じる恐れがある。このため、海浜域への直接放流は技術的面で問題はほとんど無かったものの、系群保全を脅かす可能性があることからこの方法による資源造成は考えられていない。

(3) 海中飼育放流

我国に於いてサケの海中飼育放流が試みられたのは1973年から1976年の4年間に亘り水産庁の委託研究

「さけ養殖技術開発企業化試験委託事業」の一環として岩手県山田湾で行われたのが初めてで、その目的の一つとして未利用空間の活用による稚魚生産体制の強化が挙げられている⁶³⁾。その後1977年から開始された「別枠研究さけ・海中飼育」グループの中心課題として、海中飼育放流技術の確立を図ると共に、1972年から1976年級までの5年級群について河川放流群と海中飼育群の回帰結果が解析された。

岩手県山田湾で1972～1976年の5年級群について行った海中飼育放流群と河川放流群の河川回帰率の比較結果では(表2)、回帰率は年により異なるが、3年級群は河川放流群の方が高く、2年級群は海中飼育放流群の方が高い値が得られ、その中でも1976年級群は11.46%と高い回帰率を示した。海中飼育群は他河川への遡上率が河川放流群に比較して4～18倍程度高く(表3)母川記銘能力が低いと考えられるので実際の回帰率は海中飼育群の方が高いと推測されている⁶⁴⁾。海中飼育放流は1981年から事業レベルで行われるようになり現在まで25年近く継続されているが、その効果についての解析は1982年に飯岡らが行って以降行われていない。

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位置付けられる。この観点から飯岡⁶³⁾は海中飼育導入の条件として次の5点を挙げている。

- 1) 飼育池の収容能力が不足し稚魚サイズを0.6～0.8g以上に飼育出来ない場合。
- 2) 放流しようとする時期の河川水温が低く、沿岸の餌料条件も悪い場合。
- 3) 沿岸の生物生産力が低下し、食物競合が予測される時。
- 4) 河川放流すると湾外への移動サイズが3g以下と予想され、海中飼育によって4～5gに成長可能な場所であること。

5) 放流河川が外洋に面しているため稚魚が成長する前に外洋への移動を余儀なくされる地区。

海中飼育を行う施設は陸上施設に比較して安価な網イケスを使用し容易に飼育規模を拡大することが出来るため、飼育池の収容能力が不足している孵化場にとって放流数を増やすためには極めて有効な方法と言える。しかし、海中飼育施設は、波浪等によって生じる破損を防ぐために、時化や波浪の影響の少ない海域であることが望ましい。このため、当初海中飼育が行われたのは湾や入江の発達している岩手県を中心とした三陸沿岸で、岩手県では1982年春には既に4,789万尾の海中飼育が行われ、1987年春にはピークとなり1億尾を超え、それ以降海中飼育数は減少に転じ2001年春には最盛期の10%程度の1,170万尾まで減少した。その後やや増加し2001年春には3,148万尾となっている。北海道では1978年頃には道東のサロマ湖や能取湖での海中飼育が行われていたが、沿岸域での海中飼育が開始されたのは1980年からで、当初は東部の根室海峡海域などに限られていたが、その後港湾なども利用されるようになったため広い地域で行われるようになり2011年春には北海道内の放流数の約9%に相当する9,400万尾が海中飼育放流されている(図5)。

岩手県山田湾では海中飼育魚は放流後1～7日間程度で湾外に移動し、放流時の体重が8g以上での回帰率が高いので、放流するまでにこのサイズに達している必要がある。この条件を満たすためには、海中飼育に用いる稚魚は、海水馴致能力を考慮して0.8～1.0gの稚魚を海中の網生け簀に収容し、海中飼育期間の平均日間成長率4%以上を目標とし、ビブリオ病の発生が増加する水温10℃になるまでに放流することが必要である⁶⁴⁾。稚魚の日間成長率は水温や摂餌量などによって異なり、放流後の湾外への移動日数も飼育海域が内湾か湾口部かによって異なるので、湾外移動時の体重8g以上の条件を満

表2. 岩手県山田湾で実施した海中飼育群および河川放流群の標識魚の回帰結果(飯岡⁶¹⁾)

年級	1972	1973	1974	1975	1976
海中飼育群	1.84	7.58	3.96	4.93	11.46
河川放流群	3.48	8.52	3.69	6.60	9.73

表3. 1972-1975年の5年間にわたり岩手県山田湾で実施した海中飼育群および河川放流群の標識魚の回帰河川尾数(飯岡ら⁶²⁾のデータによる)

放流場所	年級群	回帰河川尾数		B/A x 100 (%)
		織笠川遡上数(A)	織笠川以外の河川への遡上数(B)	
海中飼育群	1972	91	2	2.20
	1973	747	9	1.20
	1974	74	8	10.81
	1975	65	6	9.23
	計	977	25	2.56
河川放流群	1972	1,124	3	0.27
	1973	2,540	3	0.31
	1974	664	6	0.60
	1975	759	10	0.92
	計	5,087	22	0.43

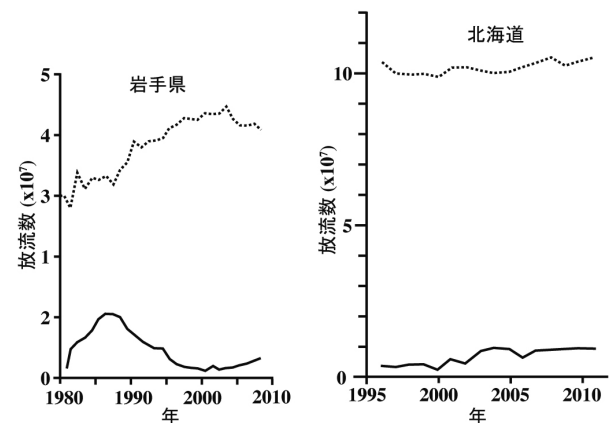


図5. 岩手県および北海道におけるサケ稚魚の全放流数(破線)と海中飼育放流数(実線) 岩手県(1980-2008年)、北海道(1995-2011年)

たすための飼育管理方法はそれぞれの海域毎に確立しなければならない。また、海中飼育可能な期間は海域によって異なり、三陸地区では2月に沿岸水温が最低となるが、河川の融雪増水時期の3月には沿岸水温は5～6℃に上昇し、この時期から海中飼育による成長が期待できるので最長で2ヶ月程度の海中飼育が可能である⁶³⁾。

北海道での海中飼育開始時期は海域により異なり、道南では3月中上旬に道東、オホーツク海では5月上旬以降と約2ヶ月の差が見られる。飼育日数は全道平均で約30日前後となっている。稚魚の平均体重は年や地域により変動があるものの飼育開始時には0.8g台で、放流時には2倍以上の1.8～2.0gまで成長している。北海道でのこれらの値を基に日間成長率を求めると0.022～0.029となり、再捕された標識魚から求めた最大値(表1)のほぼ2倍の値となっている。

海中飼育放流の問題点としては、陸上に比較して飼育管理に人手がかかることである。具体的には給餌毎に船舶を使用しなければならず、時化時には給餌が出来ないこと、網生け籠のメンテナンスを行わなければならないことなどが挙げられる。また、陸上施設に比較して安価とは言え経済的負担も大きい。海中飼育のための経費は陸上の孵化施設の運営以外に必要なものであり、網生け籠施設費や給餌などの人件費などが挙げられる。三陸沿岸で1989年以降に海中飼育放流数が急激に減少したのは、サケの水揚げ高の減少により海中飼育による経済的負担を回避せざるを得なかったことが理由の一つとなっている。

更に、海中飼育放流したサケの母川記銘能力が低いと言うことは海浜域直接放流と同様に系群保全の観点からの問題を含んでいる。海中飼育の海域が母川の流出海域近くであれば記銘能力もそれなりに維持出来るかも知れないが、母川から余りに遠い場合には多くの河川に遡上する危険性が高い。海中飼育放流数が全放流数の10%近くを占めるようになったにもかかわらず、この放流の効果については飯岡ら^{63,64)}が行った解析結果があるに過ぎない。そのため、この放流方法の飼育管理、放流などの技術面での検討、資源造成に果たしている役割と経済的課題、系群保全などの問題点を含めた評価を早急に行う必要があると思われる。

4. おわりに

サケ稚魚の放流は適切な時期に適切なサイズで放流することが重要であるという所謂「適期放流」の概念が提唱されてからほぼ50年が経過した。ここ10年来のサケの来遊数は5～7,000万尾で高位不安定と評価されていたが2010年以降4,000万尾台とやや低迷の兆しが見え、特に北海道太平洋沿岸と三陸沿岸での不振が危惧されている。これらの海域での不振を推測するに、秋期のオホーツク海に分布するサケ幼魚には日本系とロシア系が混在し^{48,65)}、その中には岩手県の河川を起源とする群も含

まれているので、オホーツク海へ移動するまでの間の海洋環境に原因があるのかも知れない。

「適期放流」が提唱されてから暫くして正規分布型の放流パターンが推奨された。即ち放流数は序盤に少なく盛期に多く終盤には再び少量の放流を行うパターンである。このようなパターンで放流することは沿岸環境の情報が少なかった時代のリスク管理手法として適切なものであったと言える。1960年代から始められた給餌飼育によって大型のサケ稚魚を適切と思われる時期に放流出来るようになった。そのため放流時期は無給餌飼育の時よりも遅くなり放流期間も短くなっているため、一回当たりの放流数は多くなっている可能性がある。放流は沿岸水温の変化を見ながら行っていて、その時の沿岸水温データは多くの研究機関や漁協等から入手可能である。しかし、サケ稚魚が降海直後に分布する極沿岸部の海況変動予測レベルはまだ十分でないため、必ずしも放流後のサケ稚魚にとって至適な環境条件への放流でない場合も考えられる。このようなリスクを軽減するためには、正規分布型放流パターンにこだわる必要は無いものの、集中的な大量放流を避け、ある程度期間をおいた日程で分散し放流を行うべきであろう。

従来サケの放流効果を判定するために鱭切り標識による追跡調査が行われてきた。この方法では切除出来る鱭は限られているので、使用出来るパターンも限られたものであった。しかし、2000年に本格的に導入された耳石温度標識法では数多くのパターンが利用可能となっている⁶⁶⁾。今後この標識法を活用して多様な条件設定による放流試験が進展すると考えられるので、更により良い放流技術の開発が進むことを期待したい。

謝 辞

本稿を取り纏めるに当たり査読者から有益な助言を頂いた、記してお礼申し上げる。本稿で使用した写真の一部を水産総合研究センター北海道区水産研究所に提供して頂いた。また、千歳事業所には撮影の便宜を図って頂いたお礼を申し上げます。

文 献

- 1) 逸見文彦(1964)サケ・マス幼稚魚の降海までの間の生残率及びその改善対策について。さけ・ますの再生産に関する第2回日ソ専門家会議報告書、大日本水産会、日本鮭鱒資源保護協会、145-154。
- 2) 水産庁(1970)極東系さけ・ますの再生産問題に関する日ソ専門家会議報告書。92pp。
- 3) 半田芳男(1932)鮭鱒人工蕃殖論。北海道鮭鱒孵化事業協会、札幌、278pp。
- 4) 小林哲夫・石川嘉郎(1964)サケ稚魚の生態調査-Ⅷ。千歳川、石狩川の鮭稚魚の生長と食性について。北海道さけ・ますふ研報、18、7-15。

- 5) 真山 紘・加藤 守・関 二郎・清水幾太郎 (1982) 石狩川産サケの生態調査－1. 1979年春放流稚魚の降海移動と沿岸帯での分布回遊. さけ・ますふ研報, **36**, 1-17.
- 6) 宮腰靖之・安藤大成・藤原 真・隼野寛史・永田光博 (2012) 網走川におけるサケ稚魚の降海移動. 北水試研報, **82**, 19-26.
- 7) 関 二郎・清水幾太郎・鈴木俊哉 (1997) 北海道太平洋沿岸中部海域における標識サケの移動と成長. 水産海洋学会, **61**, 1-9.
- 8) 佐野誠三・小林哲夫 (1953) さけ稚魚の生態調査 (2). 標識放流試験におけるさけ稚魚の移動と成長について. 北海道さけ・ますふ研報, **8**, 71-79.
- 9) 三原健夫 (1958) 北海道沿岸に出現するサケ稚魚の生態について. 水産孵化場研報, **13**, 1-14.
- 10) さけ・ますふ化場 (1966) 釧路川並びに沿岸域におけるサケ稚魚の生態. 水産庁さけ・ますふ化場昭和40年度事業報告, 140.
- 11) 小林哲夫 (1970) 遊楽部川におけるサケマス生態調査Ⅱ. 沿岸域における稚魚の移動, 成長, 食性について. 昭和44年度さけ・ます増殖事業に関する調査報告, 37-52. 水産庁北海道さけますふ化場, 日本鮭鱒資源保護協会.
- 12) 小林哲夫 (1976) 沿岸生育環境調査結果報告書. 沿岸サケマス稚魚追跡調査. 昭和48年～49年度. 水産庁北海道さけますふ化場, 日本鮭鱒資源保護協会, 64 pp.
- 13) 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. 西水研報, **68**, 1-142.
- 14) 小林哲夫 (1977) 沿岸帯泳期におけるサケ・マス幼魚の生態. 水産海洋研究, **31**, 39-44.
- 15) 小倉未基 (1995) 1993年10-11月のオホーツク海南部水域及び千島列島沖合太平洋におけるさけます類の分布. 平成5年度開洋丸第2次航海調査報告, 水産庁, 57-64.
- 16) 藤村真吉 (1892) 鮭人工孵化法. 北海道廳第二水産課, 35 pp.
- 17) 北海道水産試験場 (1906) 鮭人工孵化. 第2回北海道水産試験場事業報告, 165-230.
- 18) 北海道水産試験場 (1910) 鮭人工孵化. 第3回北海道水産試験場事業報告, 440-607.
- 19) 水産庁さけ・ますふ化場 (1963) 鮭稚魚飼育事業. 昭和37年度事業成績書. 88-92.
- 20) 北海道さけますふ化場 (1957) 昭和51年度) 放流期に達した稚魚の全長と体重. 資料106, 15 pp.
- 21) 野川秀樹・八木澤功 (2011) さけます類の人工孵化放流に関する技術小史 (飼育管理編). 水産技報, **3**, 67-89.
- 22) 関 二郎 (2005) 北海道太平洋沿岸におけるサケ幼稚魚の摂餌特性と餌料環境に関する研究. さけ・ます資源管理センター研報, **7**, 1-104.
- 23) 小林哲夫 (2009) 日本サケマス増殖史. 北海道大学出版会, 札幌, 311 pp.
- 24) 関 二郎・清水幾太郎 (1996) 広尾川におけるサケ幼稚魚の放流時期の違いによる回帰率について. 水産海洋研究, **60**, 339-347.
- 25) 北海道さけ・ますふ化場 (1978) 標識魚の回帰実態調査. 昭和51年度事業成績書, 191-192.
- 26) 戸叶 恒 (2007) 増殖効率化モデル事業. SALMON 情報, **1**, 4-5.
- 27) SAITO T., and K. NAGASAWA (2009) Regional synchrony in return rates of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) in Japan in relation to coastal temperature and size at release. *Fish. Res.*, **95**, 14-27.
- 28) MAYAMA H. (1982) Technical innovations in chum salmon enhancement with special reference to fry condition and timing of release. In Proceedings of the 11th U. S.-Japan Meeting on Aquaculture, Salmon enhancement. *NOAA Tech. Rep. NMFS* **27**, 83-86.
- 29) 帰山雅秀 (1986) サケ *Oncorhynchus keta* (Walbaum) の初期生活史に関する生態学的研究. さけ・ますふ化場研報, **40**, 31-92.
- 30) 野川秀樹 (1992) 本州日本海沿岸におけるサケ増殖と資源動態. 魚と卵, **161**, 29-43.
- 31) さけ・ます資源管理センター (2000) Salmon Database 9 (2) 種苗放流モニタリング. 108 pp.
- 32) 真山 紘・関 二郎・清水幾太郎・野村哲一・大熊一正 (1981) 石狩沿岸におけるサケ稚魚の分布, 移動 (1979, 1980). サケ別枠1980年「河川型研究グループ」レポート, 北水研, 釧路. 185-198.
- 33) 宮腰靖之・永田光博・齋藤誠一 (2007) 衛生リモートセンシングにより観測したオホーツク海東部地区の春季の沿岸水温とサケの回帰率との関係. 北海道水産孵化場研報, **61**, 1-10.
- 34) 岡本信男 (1954) 北洋鮭鱒. 水産週報社, 東京. 190 pp.
- 35) 日鮭連記念誌編さん委員会 (1965) さけます独航船のあゆみ. 日本鮭鱒漁業協同組合連合会, 東京, 720 pp.
- 36) 橋本 進 (1979) 放流サケ稚魚の飼育に関する研究－1. 北海道さけ・ますふ化場研報, **33**, 25-30.
- 37) 橋本 進 (1982) 放流用サケ稚魚の飼育に関する研究－Ⅱ. 餌の硬さ, 給餌の熟練度, 回数, 時刻及び用水の不足. 北海道さけ・ますふ化場研報, **36**, 19-37.
- 38) URAWA S. (1996) The pathobiology of ectoparasitic protozoans on hatchery-reared Pacific salmon. *Sci. Rep. Hokkaido Salmon Hatchery*, **50**, 1-99.
- 39) さけ・ます資源管理センター (2003) 海水適応能試験について. さけ・ます通信, **3**, 2.
- 40) 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・ますふ化場研報, **37**, 41-44.
- 41) さけ・ますふ化場 (1975) 放流期における稚魚の体力増強に関する実験. 昭和49年度事業報告, 209.
- 42) NAKAJIMA M., K. NAITO, T. KOYAMA, H. SANEYOSHI, M. KOBAYASHI, N. KOIDE, and H. UEDA (2010) Physiological impacts of high rearing density on chum salmon *Oncorhynchus keta* fry. *Aquaculture Sci.*, **58**, 387-399.
- 43) 北海道さけ・ます増殖協会 (2007) さけ・ますふ化放流事業実施マニュアル. 103 pp.
- 44) MIZUNO S., N. MASAKA, T. TERANISHI, D. ANDO, T. KOYAMA, K. ARAYA, M. MIYAMOTO, and M. NAGATA (2008) Physiological effects of an iron citrate dietary supplement on chum salmon (*Oncorhynchus keta*) fry. *Aquaculture Sci.*, **56**, 531-542.
- 45) SAITO T., I. SHIMIZU, J. SEKI, T. KAGA, E. HASEGAWA, H. SAITO and K. NAGASAWA (2010) Can research on the early marine life stage of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* forecast returns of adult salmon? A case study from eastern Hokkaido, Japan. *Fish Sci.*, **76**, 909-920.
- 46) 関 二郎・斎藤寿彦・清水幾太郎 (2006) 根室海峡標津沿岸域における春季の動物プランクトンの鉛直分布. さけ・ます資源管理センター研報, **8**, 37-46.
- 47) 高橋史久 (2010) 耳石温度標識魚から得られた知見 その

- 2 (放流時期とサイズの検討). **SALMON 情報**, **4**, 12-14.
- 48) URAWA S., S. SATO, N. VARNAVSKAYA, P. A. CRANE, and T. BEACHAM (2007) Genetic stock identification of juvenile chum salmon caught in the Okhotsk Sea during the fall of 2003. *NPAFC Tec. Rep.*, **7**, 72-74.
- 49) 秋葉鉄之 (1986) 道南地方の鮭鱒ふ化事業史. 北海道さけ・ますふ化放流百年記念事業協賛会, 札幌, 188 pp.
- 50) 大野磯吉・内海重左エ門 (1930) 活魚輸送試験復命書. 北海道庁千歳水産孵化場, 14 pp.
- 51) 北海道廳 (1934) 昭和2年～昭和8年度鮭鱒孵化事業報告.
- 52) 佐野誠三 (1950) 鮭稚魚の輸送放流に就いて. 鮭鱒彙報, **51**, 1-6.
- 53) さけ・ますふ化場 (1967) 降河稚魚保護事業結果. 昭和41年度事業報告書, 112.
- 54) さけ・ますふ化場 (1975) 昭和50年度降河稚魚保護事業. 昭和50年度事業報告書, 161-183.
- 55) 藤原真人・實吉隼人・鈴木邦夫 (2013) サケ稚魚長距離輸送時の経時的な水質変化. 北水試研報, **82**, 27-32.
- 56) 清水幾太郎 (1985) 稚魚輸送放流技術の開発. 遡河性さけ・ますの大量培養技術の開発に関する総合研究, 106-107. 水産庁.
- 57) さけ・ますふ化場 (1979) 放流稚魚の輸送時における酸素の消費ならびに代謝排出量について. 190.
- 58) 農林水産技術会議事務局 (1978) 『遡河性さけ・ますの大量培養技術の開発に関する総合研究』 推進会議資料. 337 pp.
- 59) さけ・ますふ化場 (1969) さけ・ます人工ふ化事業実施要項. 78 pp.
- 60) 寺尾俊郎・菊地資郎 (1963) ヘリコプターで空から放流. 魚と卵, **101**, 4-7.
- 61) 戸叶 恒 (1991) サケ幼稚魚の海浜域直接放流試験について (予報). 魚と卵, **160**, 39-41.
- 62) 松本雅彦 (1994) サケ稚魚の海浜域直接放流試験. 魚と卵, **163**, 9-11.
- 63) 飯岡主税 (1982) シロサケ稚魚海中飼育放流による沿岸回帰特性. 別枠研究さけ・海中飼育放流, 昭和56年度報告, 東北水研, 35-46.
- 64) 飯岡主税・浦野 謙・武市正明・佐藤司朗・大川重三・蛇石 幸・寺島 淳・湊 善明 (1982) 昭和54年度 研究開発促進事業 サケの回帰向上に関する種苗育成放流技術開発試研報告書 標識放流魚回帰調査. 別枠研究さけ・海中飼育放流, 昭和54年度報告, 東北水研, 137-164.
- 65) URAWA, S., J. SEKI, M. KAWANA, T. SAITO, P. A. CRANE, L. W. SEEB, M. FUKUWAKA, and E. AKINICHEVA (2006) Origins of juvenile chum salmon caught in the southwestern Okhotsk Sea during the fall of 2000. *Bull. National Salmon Resources Center*, **8**, 9-16.
- 66) 浦和茂彦 (2001) さけ・ます類の耳石標識: 技術と応用. さけ・ます資源管理センターニュース, **7**, 3-11.