

技術小史

さけます類の人工ふ化放流に関する技術小史(飼育管理編)

野川 秀樹 *1・八木 沢 功 *2

Development of Techniques for Rearing Juvenile Chum Salmon in Artificial Propagation in Japan

Hideki NOGAWA, and Isao YAGISAWA

The feeding of released juvenile chum salmon in Japan has been conducted since about 1888, when full-scale artificial propagation began. The purposes of feeding are to avoid release during times of increasing water level in river, to prevent cannibalism, etc., and it is usually done on a temporary basis. Presently, the feeding/rearing period spans several months and takes into account such things as the water temperature of streams into which the fish are released, coastal environments during seaward migration, and target release weight of 1g or more. This system represents a major change from the time that artificial rearing was begun. This has been especially the case since the late 1970s, as vigorous technical developments, such as the introduction of optimum release techniques during the proper period and at the proper size of healthier fish. The development and dissemination of these techniques have contributed greatly to the increase in salmon resources. This paper examines the history of these technical developments.

2010年10月22日受付, 2010年12月23日受理

1. サケ稚魚への飼育の導入

放流するサケ (*Oncorhynchus keta*) 稚魚への給餌は、本格的なサケの人工ふ化放流の幕開けとなった千歳中央孵化場の開設(1888年)の頃から既に行われていた。しかし、給餌の目的や方法は現在のものとは大きく異なっていた。当時は、放流時における河川環境が増水などで稚魚を放流するには適切でないため、増水が収まるまで餌を与えて体力を保持したい、あるいは、池中での共食いや稚魚がピンヘッド(頭でっかちで痩せた状態の稚魚)になるのを防ぎたいというような、人工ふ化事業に携わる技術者が自然に思いつくような動機から行われたと推察される。このような給餌も1910年頃には行われなくなり、その後、給餌の必要性について論議があったものの、1930年前後には河川の天然餌料の豊富な時期

に放流することが最善であるとの見解から、臍囊^{*3}を吸収して浮上した稚魚から順次放流するようになった¹⁾。

現在のような事業規模での大量の稚魚の飼育は、三原²⁾によれば1963年春に当時の北海道さけ・ますふ化場において開始された。飼育を導入した理由については、「放流したサケ稚魚の減耗は、河川内での餌料不足による減耗が最も大きいと推定されるが、最近の河川は汚濁によって天然餌料は少なく、また、一時に多くの稚魚を放流することから、その付近の水域では天然餌料が少なくなるという研究結果が出たことから、この間の減耗を少なくするという最大の課題を解決するために稚魚の飼育を行うことにした。」とある²⁾。飼育により河川内の餌不足による減耗を少なくし、そのことにより回帰効果を高めるといように、その目的を明確にして、人

*1 独立行政法人水産総合研究センター さけますセンター

〒062-0922 北海道札幌市豊平区中の島2条2丁目4-1

National Salmon Resources Center, FRA 2-2 Nakanoshima, Toyohira, Sapporo, Hokkaido, 062-0922 Japan

nogawa@affrc.go.jp

*2 独立行政法人水産総合研究センター さけますセンター渡島事業所

*3 卵黄囊(yolk sac)のこと。仔魚は稚魚期まで卵黄をエネルギー源として発育する。

工ふ化放流に飼育が導入された。

飼育導入当初に使用された飼料は、スケトウダラや粉末肝臓などを混ぜた生配合飼料（冷凍）であった。この飼料を稚魚に約30日間給餌し、飼育開始時の約2倍の魚体重にして放流することを目標とした。このような方法を使った経過については、小林¹⁾によれば「放流サイズは当初、ベニザケやサクラマスのスモルトの降海サイズを参考に、一定の大きさ（5g以上）に成長させての放流という意見もあったが、ふ化場の飼育水温条件から判断して短期間に5g前後の成長量を望むことは困難であることや稚魚の降海生態を度外視した放流は行うべきではないとの判断から、1カ月を基本として、稚魚の実験飼育の成長度合いを参考に放流目標サイズを飼育開始時の魚体重（0.3～0.4g前後）の2倍程度で放流することとなった。」とある。

事業規模のサケ稚魚の飼育が、上述したような目的や方法で人工ふ化放流に導入されたが、現在行われている飼育では、放流する河川の水温や降海時における沿岸環境を考慮して、飼育期間が数カ月間にわたる。また、その放流サイズも1g以上を目標とするなど、飼育期間、放流サイズ、飼育方法などが飼育開始当時と比較して大きく異なってきており、その飼育技術も大きく変遷してきているが、その発展の歴史はおおよそ次のように大別され、第Ⅰ期から第Ⅱ期、第Ⅱ期から第Ⅲ期に移る前後に様々な技術開発が試みられている。

第Ⅰ期 [千歳中央孵化場の設置（1888年）～本格的な飼育の開始（1963年）まで]

・河川の増水時における放流の回避や池中の共食い防止などを目的に小規模な給餌が行われていたが、基本的には卵黄を吸収して浮上してきた稚魚から順次放流していた。

第Ⅱ期 [本格的な飼育の開始～適期放流技術の導入（1977年）まで]

・本格的な飼育が導入されるとともに、乾燥配合飼料の導入、飼育専用池の設置などの画期的な技術開発などが行われたが、期間も短く粗放的な飼育が行われていた。

第Ⅲ期 [適期放流技術の導入～現在まで]

・適期放流、適期・適サイズ放流技術の導入により、飼育期間も長期となり、集約的な飼育が行われ、健苗放流のために様々な技術開発が行われた。

飼育技術に関しては、このような段階を経て現在に至るが、これまでに取り組まれた技術開発の内容やその必要性などについて、発展の歴史や技術的な要点に沿って、以下に記述する。

なお、わが国のさけます類の人工ふ化放流技術は、千歳中央孵化場（1901年に北海道水産試験場千歳分場、1924年に北海道庁千歳鮭鱒孵化場、1934年に北海道鮭鱒孵化場、1941年に北海道水産孵化場と組織名が変わる）、や1952年に設置された「北海道さけ・ますふ化

場」による様々な調査研究や技術開発により、現在のものが形づくられてきた。北海道さけ・ますふ化場はサケ資源の安定化などの状況を踏まえ、1997年に「さけ・ます資源管理センター」に、2006年には水産総合研究センターと統合し現在の「さけますセンター」へと組織名が変わった。本稿で使用する組織名は現在の名称に置き換えず、記述する事実には該当する時期の組織名を用いた。また、技術開発が行われた場所などとして本稿に出てくる事業場（所）名は、その当時の組織に所属する事業場（所）のことである。水産庁や公設の水産試験場の名称についても当時の組織名を使用した。

2. 飼料の種類および給餌方法

(1) 飼料の種類

人工ふ化放流の幕開けとなった千歳中央孵化場の人工ふ化放流に関する手引書と考えられる「鮭鱒人工孵化法（1891年に編纂）」に、給餌に関する記述があり、一時的な給餌に用いる飼料として、牛馬鶏などの肝臓の細切りや蚕蛹を蒸したものが稚魚に好まれるとの記述がある³⁾。また、1900～1902年に蚕蛹、鶏卵、麦粉、鯨白子、えび、コウナゴ、鯨搾粕などを用いてサケ稚魚の成長や死亡率を調べる試験が行われており、えび、鶏卵、蚕蛹はサケ稚魚の飼料に適するが、その他については不適であるとの結果が報告されている⁴⁾。このように、この頃の飼料には主に牛馬鶏の肝臓、蚕蛹粉末、イサダ粉末、えび粉末などが使用されていた。

その後、本格的な飼育が導入される1963年までの給餌に関して、小林¹⁾から引用すると、明治末期までは増水時期を避けるなど、放流時期の調整のために一時的な給餌が行われていたが、1910年頃から卵黄を吸収した段階で一斉に放流されるようになったとある。また、1928～1930年に天然餌料や稚魚の食性調査が行われた結果、卵黄を吸収した稚魚はできるだけ早く放流することが、栄養価の高い天然餌料を十分に摂取するなどの利点があることから、やむを得ない限り給餌は避けるべきとの結論になり、1930年前後に稚魚に給餌すべきか否かの問題は終止符が打たれたとある。このことから、本格的な飼育が導入される1963年までは、大部分の稚魚は浮上後、給餌されることなく放流されたものと考えられる。それを裏付けるように、1928年に人工ふ化放流の近代的な管理技術を体系付けた「人工孵化事業要綱」に、放流に関して、卵黄吸収後またはほぼ卵黄を吸収したのから放流するとの記述がある⁵⁾。1993年に発刊された「鮭鱒人工繁殖論」には、稚魚を飼育して放流することの有利なのは確かではあるが、その適切な方法が確立されていないことから、現状では浮上期に達したものを放流するのが最良の策とある⁶⁾。また、「鮭鱒彙報第38号」（1938年）には、害敵に対する抵抗力増大から給餌していたが、これは卵黄吸収後河川に流下して天

然餌料を摂餌するという自然状態に反するとともに、不自然な人工餌料が原因の疾病などによる減耗が大きいことから、現在は卵黄吸収後一気に放流する方法を採るに至ったとの記述がある⁷⁾。さらに、1950年に改正された「鮭鱒人工孵化事業要綱」⁸⁾においても、浮上期に達したものを放流することを原則とする記述されている。ただし、河川の増水で放流ができない場合や池中の稚魚の成長に著しい差があり共食いが懸念される場合などには投餌することは可とするとの記述もあることから⁶⁻⁸⁾、状況に応じて一部の稚魚には給餌が行われていたと考えられる。

この間の飼料に関して、半田・菊池は1910～1911年に鶏卵、イサダ、両者を混合したものなどを用いて飼料試験を行い、イサダを魚体重の5%給餌したものが成長面から良好であったと報告している⁹⁾。「鮭鱒孵化事業報告」には、1933年に牛肝臓で餌付けを開始し、その後、養魚池（仔魚を浮上まで管理する池）で牛肝臓・小麦粉・アミ粉・魚粉・蛹粉などの混合飼料を用いて飼育試験を行ったことが記述されている¹⁰⁾。1935～1936年にはニジマスを用いて、アミ粉・鰯粉・粉末昆布・米糠・鮭肝臓・スケトウダラ卵の混合飼料やホタテ乾燥ウロまたは塩蔵ウロに鮭肝臓・スケソウタラ卵などを混ぜた混合飼料を用いて飼料の開発試験が行われ、ホタテウロは飼料として有効であるが他は不相当と報告されている¹⁰⁾。「鮭鱒人工蕃殖論」には鶏卵の黄味を茹でて細粒にしたものが最も良いが、価格や供給面から実用的でない、魚粉、えび粉、血粉を与えるのが良いとの記述がある⁶⁾。

1940年頃からは戦争中の飼料不足や価格高騰から代用飼料の開発が行われ、馬鈴薯を蒸して潰したものに豆腐・米糠・魚粉を混合したものや、イサダ・米糠・魚粉・小麦粉を混ぜたものなどが試験に用いられたが、いずれも良好な成績は得られていない。また、ビートパルプなどの飼料開発も試みられたが、餌料効率は不良であったと報告されている。いずれにしてもこの時期は、本格的な飼育は行われなかったものの、放流の調整のために使用する飼料に関しては、動物の肝臓や魚粉などの混合割合を変えたりしながら給餌に適した飼料の模索は行われていた。

1963年に飼育が本格的に導入されるが、後述するように、飼育のための専用池は整備されておらず、養魚池において、仔魚の卵黄の吸収が80～90%程度進み、養魚池に収容された仔魚の70%程度が浮上した頃から、養魚池の水深を20～50cmに深くして飼育が行われた。用いられた飼料は冷凍されたスケトウダラや粉末肝臓などを混ぜた生配合飼料であり、これを養魚池の流水中に吊すか置かして、自発的に摂餌を促すという方法で行われた。生飼料を使用した理由について、サケの食性は動物性であることから動物性の生鮮飼料を与えることが原則的に正しいと考えられること、置餌とする給餌法は

人手を要しないことなどから、このような生の飼料の給餌体制としたとある¹¹⁾。また、餌付用として生タラ卵を用いた理由について、餌付け当初には稚魚は未だ卵黄を有している、卵黄と似た栄養成分を与えるのが自然であると同時に、経口摂取の習性を喚起させるためとある¹¹⁾。生配合飼料の成分は、スケソウタラすり身40%、粉末肝臓10%、脱脂粉乳5%、ビール酵母5%、水分40%となっていた。スケトウダラすり身は北海道で大量に漁獲されタンパク質20%を含み、特に肝臓を補助餌料として共に用いると良いこと、粉末肝臓は以前よりさけます類の餌料に最も用いられているものの一つであること、脱脂粉乳はタンパク質37%、脂肪1%、炭水化物49%を含んでおり、さけます類が吸収しやすいこと、ビール酵母はビタミンB群の良い補給源で蛋白効率を向上させることなどから、これらをその成分として用いた、とその理由が記述されている¹¹⁾。

しかしながら、1966年に飼料の冷凍保存の不備によるスポンジ化の問題が起きた。また、海水移行への抵抗力を調べたところ、乾燥配合飼料では抵抗力に変化は認められなかったが、冷凍の生配合飼料の給餌群に冷凍過程における脂質の変性による抵抗力の低下が確認されたこと¹⁾から、1967年度からは市販の養鱒用飼料（乾燥配合飼料）に全面的に切り替わる。1967年度の北海道さけ・ますふ化場の事業成績書には、冷凍飼料の変性による稚魚の生理障害および飼育事業の合理化の観点から生配合飼料の使用を全面的に止め、乾燥配合飼料に統一

表1. さけ・ます稚魚用飼料基準

品質形状:乾燥配合飼料(クランブル)			
粒 状	S号	(餌付用)	0.3～0.5 m/m
	A号	(前期給餌用)	0.5～1.0 m/m
	B号	(後期給餌用)	1.0～1.5 m/m
成 分	粗蛋白	46.0～49.0%	
	粗脂肪	4.0～6.0%	
	粗繊維	7.0%以下	
	粗灰分	16.0%以下	
	水分	10.0%以下	
配合原料	フィッシュミール, 酵母, 脱脂粉乳, 小麦粉, 混合ミネラル, 混合ビタミン, その他微量添加物		

ビタミン(1 kg中の含有量)			
A	4,400 IU	ナイアジン	450 mg
B ₁	30 mg	パントテン酸	200 mg
B ₂	90 mg	パラアミン安息香酸	200 mg
E	180 mg	コリン	4,000 mg
B ₆	30 mg	イノシトール	600 mg
B ₁₂	0.05 mg	ピオミン	2.5 mg
K	20 mg	葉酸	10 mg
D	1,000 IU		
C	1,000 mg		
水溶性ビタミンは上記数値以上を含有すること			

したとある¹²⁾。

現在、さけますセンターで使用している「さけ・ます稚魚用飼料基準」は表1のとおりである。成分の割合が若干異なるものの、その他の基準については全く同じ数値が1969年度の事業成績書¹³⁾に記述されており、飼料の粒径をA号（粒径0.1 mm以下）、B号（同0.5～1.0 mm）、C号（同1.0～1.5 mm）の3種類に区分したこと、ビタミン含有の最低基準値を定めて品質の改善を図ったことから、1969年に現在のさけ・ます稚魚用の飼料基準が定められたものと考えられる。また、ビタミン含有量については、当時の飼料会社の含有量を参考にして決めたとある¹⁴⁾。

配合原料に関しては、2004年にホワイトフィッシュミールから単にフィッシュミールに変更している。これは、安価で供給の安定しているブラウン・フィッシュミールを用いてサケ稚魚の成長を調べたところ、成長においてホワイトと有意な差は見られなかったことなどによる¹⁵⁾。

なお、1997年に北海道さけ・ますふ化場がさけ・ます資源管理センターへ改組し、資源造成の役割を終えるまでは、官民一体となった増殖事業が展開されていた。そのため、民間ふ化場も、北海道さけ・ますふ化場と同規格の飼料を使用していたが、現在では市販の養鱒用飼料を使用する民間ふ化場がほとんどである。

(2) 給餌方法 第I期では、蚕蛹粉末、イサダ粉末などの粉末類は水で練って蒸してものを再び粉末にして少量ずつ数回に分けて与えていた⁶⁾。第II期に入ってから生タラ卵および生配合飼料の給餌方法は、養魚池での吊下式または置餌式で給餌が行われた。餌付け用の生タラ卵は自然に池内に拡散し、稚魚の餌付きの点では優れていたようであるが、生配合飼料は冷凍保存中の変成（スポンジ化）により水中への拡散が十分でなく、まんべんなく稚魚に餌を与えるには不向きで、餌を置く方法に苦労したようである¹⁶⁾。1967年に全面的に乾燥配合飼料に切り替わってからは、人手による撒布で給餌が行われるようになった。

給餌を開始する時期については、1933年にサケ稚魚を用いて、ふ化後22日目より給餌した群と無給餌群との成長の比較を行い、給餌した群の成長は著しく良好であり、早期の給餌が必要との報告がある⁹⁾。また、ニジマスを用いて、給餌開始時期をふ化後23日目（卵黄吸収1/2）、ふ化後34日目（卵黄吸収2/3）、ふ化後44日目（卵黄全吸収）とした3群について成長比較を行い、給餌開始時期が早いほど成長が良く、卵黄吸収前の給餌が必要ないとの認識は誤りであるとの報告も見られる¹⁰⁾。この時期は浮上後に無給餌で放流するのが主体ではあったが、給餌を開始する時期に関する検討も行わ

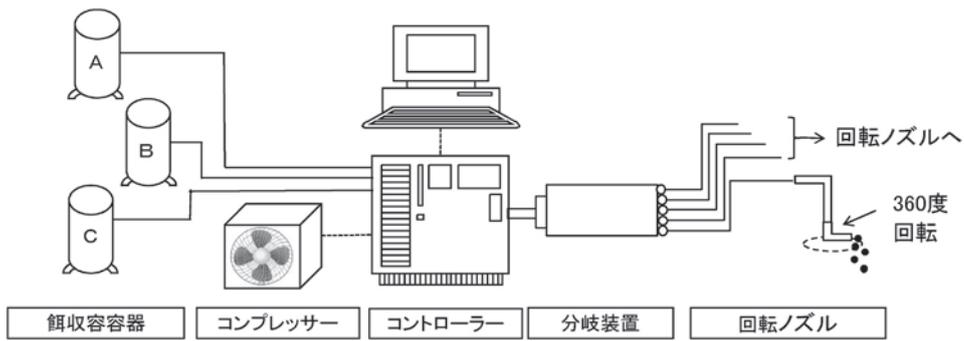
れていたようである。

1963年に本格的な飼育が導入された際には、80～90%程度卵黄の吸収が進み、養魚池に収容された仔魚の70%程度が浮上した頃から給餌が開始された。しかし、1980年代後半に、仔魚を安静な状態で管理し、仔魚が高い残存エネルギーをもって浮上させることが、その後の外部栄養の獲得に有利であることが示され¹⁷⁾、卵黄の吸収がほぼ完全に進んだ頃（積算水温^{*}900～1,000℃・日）に、養魚池の水深を深くし浮上させてから給餌を開始するようになった。その後、佐々木¹⁸⁾により、給餌開始時期が早い試験区（積算水温860～928℃・日で給餌を開始）は遅い試験区（積算水温967～1,063℃・日で給餌を開始）と比較して成長が良く、試験終了時の魚体重が大きいと報告されたが、現状においても、外部栄養の獲得に有利な積算水温900～1,000℃・日を目安に給餌が開始されている。

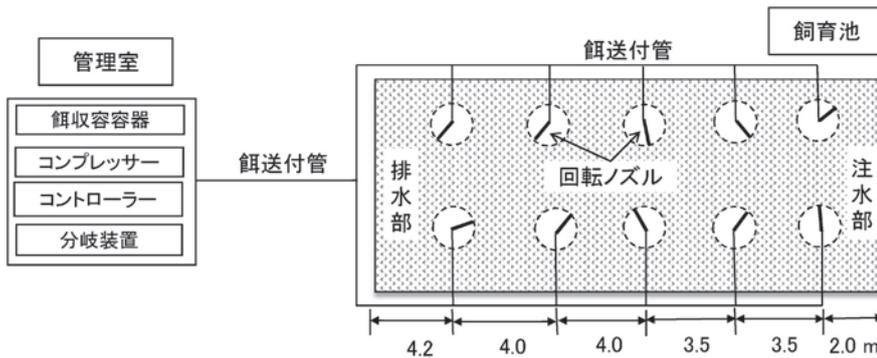
機器の開発としては自動給餌機の開発がある。これは多くのふ化場は僻地にあり、給餌作業に必要な労働力の確保が難しいこと、また、北海道では厳冬期から飼育が開始され、厳しい労働環境にあることなどから、人に頼らない方法として給餌作業の機械化が試みられた。ここでは、1993年に千歳事業場において実際の飼育池を用いて事業規模で行われた試験の結果を紹介する¹⁹⁾。従来の方法の手撒き群（対照区）と自動給餌群（試験区）を設定して、ほぼ同数の稚魚を収容し、稚魚の成長、歩留まり、餌料効率の比較を行った。使用した自動給餌システムは、飼料を入れておく容器、コンプレッサー、分岐装置、回転ノズル、制御装置などからなり、給餌時間、給餌量などをコンピューターに記憶させ自動的に圧縮空気により給餌するシステムである（図1）。給餌ノズルは10本配置し、10本同時に作動するのではなく、池下流部から3本、3本、4本の3系統で順次作動するようにした。給餌量や注水量、飼育池の水深などの環境は同一となるように設定した。

成長は図2に示すとおりで、飼育試験終了時における尾叉長、体重、肥満度に有意な差は認められなかった（ $p > 0.05$ ）。餌料効率（%：増重量÷給餌重量×100）は試験区で82.7%、対照区で84.8%とほぼ同じ値であった。生残率は試験区、対照区とも99.5%と同じであった。このようなことから、自動給餌システムは、事業的に十分活用可能なシステムであり、操作性に関しても、凍結や着雪によるノズル回転や飼料の詰まりなどのトラブルは生じず、寒冷地でも十分使用可能なことが確かめられた。しかしながら、現状においては人手による給餌が主流であり、さけますセンターの事業所においても導入が進んでいない。その大きな理由は、千歳事業場では大きなトラブルは生じなかったものの、試験的に導入した一部事業場において、稚魚へ餌を撒く回転ノズルに至

* 積算水温：一日の平均水温の総和



(A)システムの構成図



(B)回転ノズルの配置位置

図1. 自動給餌システム
システムの構成図はイメージ的に表したものであり、試験に使用した実際のシステムの仕様（外観）とは同一ではない

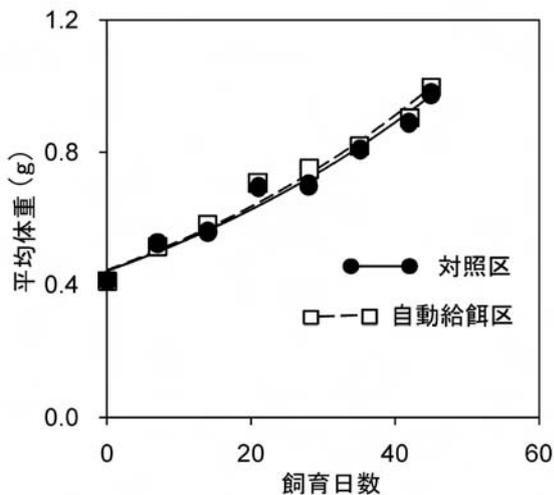


図2. 自動給餌区と対照区の稚魚の成長
飼育試験終了時の両者の平均体重に有意差なし ($p>0.05$, t検定)

るまでの餌の送付パイプ内で餌が詰まり、これを修理するのに専門業者の対応が必要となること、専門業者が事

業場の付近にないことから迅速な対応が困難であり、その間、給餌を停止しなければならないこと、飼育池の魚の分布に応じて給餌量を変えるというようなきめ細かな設定ができないことなどが考えられる。この技術開発を行った頃から既に20年近く経過しており、新たな技術の導入による改良も可能と考えられる。それによってこれらの問題の解決が可能となれば、自動給餌システムの導入は進むものと考えられる。

(3) 飼育期間 第I期においては、放流の調整などを目的に一時的な給餌が行われていただけであり、明確な飼育期間というものにはなかったと考えられる。第II期においては、先に述べたように、30日を限度として飼育が導入されたが、乾燥配合飼料に切り替わった1967年度からは、飼育事業の実施方針に飼育期間の設定はなくなり、2年後の1970年の飼育の実施方針に、稚魚を一定期間給餌して健康な稚魚を育成し降河以降の減耗を少なくすること、さらに河川、沿岸域の生育環境が整った時期に放流し回帰効果の向上を図る¹³⁾、との記述がある。この頃から30日という期間にこだわることなく、生育環境を考慮した飼育期間の設定になったと考えられる。

その後、適期放流の導入によりさらに長期にわたって飼育が行われるようになるが、そのことについては後述する。

飼育が開始された頃から、稚魚への給餌が休むことなく毎日行われていたかどうかの記録は見つからないが、少なくとも北海道さけ・ますふ化場の事業場では、1994年に、当時の北海道さけ・ますふ化場傘下の事業場に対して、日曜日は統一的に給餌を行わないとの指示が出されるまで、稚魚への給餌は毎日原則に行われていた。この指示は、休日の給餌に必要な労働力の確保や省力化の観点から出されたものである。給餌方法に関する技術開発が試みられ、毎日給餌しなくとも餌の量を調整することなどにより、毎日給餌した稚魚と変わらない成長が得られるような給餌方法が開発され、それが省力化につながるようになったことから、これが行われた。

この技術は、サケ、サクラマスおよびカラフトマス稚魚について開発されたが、ここでは北見事業場で実施されたサケ稚魚の飼育試験の結果を紹介する。試験は毎日給餌群（A区：対照区）、週6日給餌1日無給餌群（B区、給餌量はA区と同じ）、週5日給餌2日連続無給餌群（C区、給餌量はA区と同じ）、週5日給餌2日連続無給餌群（D区、給餌率はA区と同じ）の4群を設定した。水槽ごとに1,000尾のサケ稚魚を入れ、成長や健苗の指標として海水適応能（人工海水、塩分33%に48時間浸漬した後の生残率）を比較した。試験開始時の平均尾叉長と平均体重は、各群とも3.62 cm、0.39 gであった。試験は1993年3月1日～4月19日の50日間実施した。期間中の水温は8.3～9.4℃であった。試験終了時の尾叉長、体重などは表2のとおりである。

毎日給餌群とB区では、尾叉長、体重、肥満度（体

重÷（尾叉長）³×1000）に有意差は認められなかった。その他の区ではA区と同じ給餌率で週2日無給餌だったD区の肥満度を除いて、有意に小さい結果となった。試験期間中の餌料効率率はほぼ同一の値となり、また、海水適応能にも大きな差はなかった。このように週6日給餌、1日無給餌でも、毎日給餌と同じ成長をさせることができるため、2004年から日曜日に給餌しない方法が導入された。その後、隔日（1日置き）の給餌でも毎日給餌と同様に成長をさせることが可能との報告が出されているが²⁰⁾、現状においては人の雇用形態などの関係もあり、週6日給餌1日無給餌が一般的である。

(4) 給餌率 第I期においては、前述したように半田・菊池が1910～1911年に鶏卵、イサダ、両者を混合したものなどを用いて試験を行い、魚体重の5%、2.9%、1.7%の給餌率で成長や死亡率の違いを調べ、魚体重の5%のイサダを給餌するのが成長面から良好であったとしている⁹⁾。第II期に入った1968年、全面的に乾燥配合飼料に切り替わる前の生タラ卵、生配合飼料の飼育では、1日当たりの給餌量は、魚体重の5～7%であった^{11,21)}。乾燥配合飼料に切り替わってからは、Leitritzの水温別給餌率（表3）を目安として給餌が行われるようになる。Leitritzはこの給餌率について、給餌率は実際のニジマスの生産記録から導き出したものであり、飼料の栄養価を考慮したものではないことから、個々の生産現場の実態に応じて多少の調整が必要であると述べているが²²⁾、この給餌率は50年以上を経過した現在においても、サケ科魚類の事業規模での飼育や水槽試験での給餌において目安となっており、これに魚の摂餌状況、残餌の量などの観察結果を加味して給餌率が決められて

表2. 試験終了時における尾叉長、体重等の比較

試験区	尾叉長 (cm)	体重 (g)	肥満度	餌料効率 (%)	海水適応 (%)
A	5.15 ± 0.27	1.44 ± 0.23	10.47 ± 0.59	102.2	98.0
B	5.14 ± 0.29	1.46 ± 0.26	10.65 ± 0.64	102.1	97.0
C	5.02 ± 0.29 *	1.28 ± 0.21 *	10.06 ± 0.53 *	84.2	96.0
D	4.72 ± 0.31 *	1.10 ± 0.23 *	10.28 ± 0.65	117.3	100.0

*p<0.05でA区に対して有意差あり（Scheffeの方法による多重比較により検定）

試験終了日時に60尾の稚魚を無作為に抽出して測定

尾叉長、体重、肥満度は平均値±標準偏差

表3. Leitritzの給餌率（稚魚の体重に対する割合）

水温(℃)	4	5	6	7	8	9	10	11
(改正前)								
給餌率(A, %)	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.2	4.5
(改正後)								
給餌率(A×0.8, %)	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.4	3.6

いる。

第Ⅲ期に入り集約的な飼育が行われることになってからは、それまでの給餌率では稚魚に利用されない無駄な餌が多く出るとの現場技術者の意見を踏まえ、この率の8割(表3)を目安とするよう1996年のマニュアルで給餌率を変更している。これを目安に、それまでの当該ふ化場における給餌記録、稚魚の摂餌状況、残餌の具合、ピンヘッドの出現状況、天候などを加味して、その日の給餌率を決めている。

3. 飼育池について

(1) 飼育池の構造 飼育池は養魚池で浮上した稚魚を收容して放流まで給餌する池のことであり、一般的に養魚池(仔魚を浮上まで管理する池)の下流部に設置される(図3)。浮上した稚魚は養魚池を降下し、自然に飼育池に收容される。この飼育専用の飼育池が初めて設置されたのは、1971年に千歳事業場に建設された近代的ふ化場の施設整備の際であった。その後、この施設をモデルに、各地にふ化場が建設されることになった。この整備は、適期放流技術が導入され集約的な飼育が行われるようになる6年程前に行われたことになる。この施設はふ化室(ふ化槽が設置され、受精卵を收容し、ふ化するまで管理する場所)、養魚池、飼育池からなり、飼育池だけが屋外に設置された。それまでは、ふ化室と養魚池で構成されているのが一般的であり(図3)、飼育専用の池はなく、仔魚が浮上したら、養魚池の水深を高くして飼育池として使用していた。

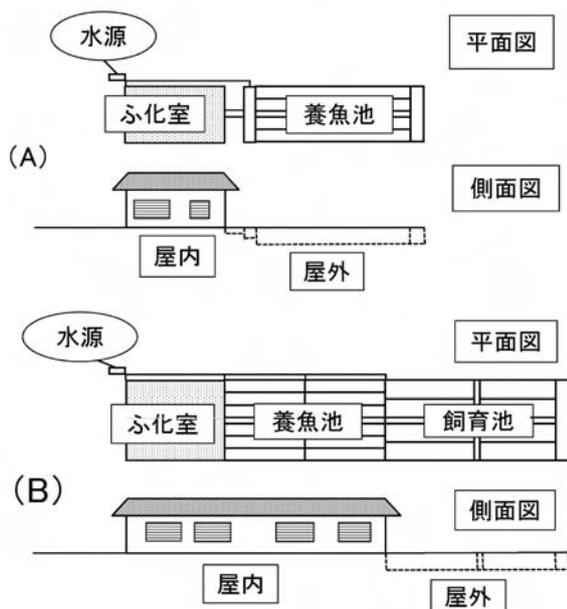


図3. 飼育専用池が整備される前のふ化場(A)と飼育専用池が整備された近代的なふ化場(B)

この千歳事業場の飼育池は全部で4面あり、1面の構造は(幅)5.4m(長さ)30m(深さ)1mの池であった。この飼育池1面には養魚池3面に收容された450万尾の稚魚が飼育される構造となっていた。当時の飼育方法を考えると、この池構造は稚魚の收容密度や飼育池内の水の流れなどを考慮して決められたものではなく、養魚池1列の池幅が日本建築の基本である1間(1.8m)であったことから、この3列分に相当する池幅として設定されてものであり、稚魚の飼育にはこの池幅は広過ぎて、池内の水の流れを均一にするのは非常に難しい池であった。このような使いづらい構造であることについて、技術者からの問題提起を受けて、北海道さけ・ますふ化場の施設設計担当部署でも検討がなされ、1985年頃の施設整備から、養魚池2列を1列の飼育池とする3.6m×20~30m×1mの飼育池が整備されることになる。Westers and Pratt²³⁾は短冊形の飼育池(Flow-Through Type)の幅・長さ・深さの総体的な寸法は、3.0m×30.0m×1.0mが集約的な飼育を行う場合に良いとしており、Stickney²⁴⁾は、最も一般的な短冊形(Raceway Type)の飼育池の構造は3.0m×25.0m×1.2mであるとしている。上に述べた北海道さけ・ますふ化場の飼育池の池幅は、アメリカの集約的な飼育で一般的に使用されているものに比較して若干広いものの、これにやや近いものとなっている。

飼育に必要な面積(容積)は後述するように、飼育尾数、利用可能な水量、放流サイズなどを考慮して厳密に算出するのが理想であるが、施設設計においては一定の基準が必要なことから、一般的に1m²当たり1万尾を目安に飼育面積が設計されている。しかしながら、立地条件により敷地面積が制約を受ける場合も多々あり、必ずしも基準どおりの面積となっていないふ化場もある。近代的な施設として建設された千歳事業場の飼育池は、1m²当たりの飼育尾数を計算すると3万尾という数値になり、一般的な設計基準に比較しても少な過ぎる面積であった。これは敷地的な制約もあったが、当時行われていた飼育方法、すなわち、飼育池排水部に金網を設置して稚魚を強制的に飼育池に留めるのではなく、飼育池から河川へ降下しようとする稚魚はそのまま降下するにまかせるという粗放的な飼育方法も関係していたと考えられる。

(2) 飼育池で使用する用水 専用の飼育池が整備されるまでは、養魚池を用いて飼育が行われていたことは前述したとおりであるが、短冊型の大規模な養魚池が作られたのは1898年の千歳中央孵化場での敷設が最初である。この整備に関する記録の中に用水に関する記述があり、卵の管理には清潔な用水が必要であるが、稚魚には天然餌料を多く含む用水が必要なことは明らかとある⁴⁾。「鮭鱒人工蕃殖論」には、湧水が水温変化も濁りもないことから最適であるが、それが難しく別な用水を用いる

のが一般的であり、湧水中には稚魚の天然餌料となる生物が少ないという欠点があるとの記述がある⁶⁾。また、1963年に本格的な飼育が導入されてからも、天然餌料の不足分を人工餌料で補うという考え方があった。ふ化場の養魚池は大部分が河川水を導水し、池底にも河川と同様に砂利が敷き詰められていたので、天然餌料の発生が河川と同様に期待できる²⁵⁾などとして、1970年頃までの養魚池での飼育に天然餌料を含んだ河川水を使用することが望ましいと考えられていたと推察される。

現在では、受精卵や仔魚の管理と同様に稚魚の飼育にも、基本的には湧水や地下水が用いられている。このような管理方法に変わっていったのは、サケは河床内に湧水が湧く場所で発育し、その水温が6～11℃であることが小林²⁶⁾によって報告されたこと、1971年の近代的なふ化施設の整備により、ふ化室・養魚池・飼育池という一連のつながりでの施設が完成し、ふ化室で使用された湧水が養魚池や飼育池でも使用可能となったことなどによる。さらに、この頃から揚水ポンプや自家発電装置の設置が進み、それまで落差の関係で湧水の導水が困難であった養魚池や飼育池にも、揚水による導水が可能となったことも要因の一つと考えられる。ちなみに、千歳事業場では1971年の近代的な施設整備により当該施設においては湧水での飼育が可能となったが、1898年に千歳川をはさんで対岸に整備された屋外養魚池では、揚水ポンプの設置により湧水の導水が可能となる1977年まで河川水で飼育が行われていた。

なお、飼育期間が長期化し、稚魚の大型化により大量の飼育用水が必要となってからは、湧水のみでは水量が不足することから、河川水が利用可能なふ化場では飼育当初は湧水を使用し、その後、稚魚の成長にともなって河川水の量を増やしていく、というような使用方法により飼育が行われている。

4. 飼育池環境について

1963年にサケ稚魚の本格的な飼育が開始された当初は、飼育期間は約30日間を目標として実施された。その飼育方法は、稚魚が飼育池から河川へ降下するのを人為的に妨げるのは望ましくないとの考えから、飼育池の排水部に金網を設置せず、稚魚の飼育池から河川への降下を自然にまかせていた。このように、その飼育方法は極めて粗放的であり、後に大きな問題となるような飼育池の溶存酸素量や飼育密度などを考慮する必要はなかった。筆者が千歳事業場で勤務を開始した1976年頃には実際にそのような飼育が行われており、飼育池に稚魚が濃密に分布するというようなことはなく、飼育池の糞や残餌の清掃も数日置きに行うというような状況であった。

その後、1977年の適期放流技術の導入や農林水産技術会議の別枠研究「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」(以下「サケ別枠研究」という)の成果などから、沖合移行する時期をベースにおき、必要な成長が前浜で見込める放流サイズを念頭においた放流方法(適期・適サイズ放流)が重要であることが示された。つまり、沿岸の表面水温が12～13℃となる時期までに、体長7cm、魚体重3g前後まで成長したサケ稚魚は、母川周辺の沿岸域から順調に沖合回遊に移行することが可能であり、生残率も高いことが明らかとなったのである。千歳事業場においては、それまでは早いものは2月くらいから川に降りていた稚魚を、飼育池の排水部に金網を設置し、4月頃から放流を開始するというように、飼育期間が大幅に延びることになった。

千歳事業場においていち早く適期放流やサケ別枠研究の成果がフィードバックされ、先駆的な取り組みが開始されたのは、サケ別枠研究の中の大課題「河川型放流技術を基盤とした稚魚減耗の抑制」の一部が、石狩川と石狩湾をフィールドとして、千歳事業場から標識放流された稚魚の追跡調査が行われたこと、この調査に千歳事業場の技術者も参画したことによる。

この長期にわたる飼育の取り組みは、前述したように千歳事業場の飼育池4面(648m²:162m²×4面)と飼育用水量が約6,000ℓ/minで1,800万尾の稚魚を飼育するというで開始された。飼育用水量から計算される飼育可能量は、後述する適正飼育量から計算すると約6,000kgであり、これを飼育尾数で除すと平均魚体重が0.32gとなる。浮上時の平均魚体重が約0.30gであることを考慮すると、長期飼育は不可能であり、結果的に飼育池環境の悪化を招き、特に1979年級群には細菌性鰓病が頻繁に発生し、塩水消毒を行うもの的高密度な飼育条件下では消毒の効果も少なく、結果的に不健康な稚魚を放流することになった。この稚魚は放流後の沿岸域での追跡調査でほとんど採捕されなかった。

1979年級群では約2,900万尾の稚魚の飼育が行われたが、そのうち、石狩川水系千歳川に遡上した親魚から9月下旬から10月中旬にかけて採卵された卵を起源とする約1,800万尾の稚魚に細菌性鰓病が発生した。残りの約1,100万尾(10月中旬以降に採卵された群:盛期群の一部と後期群)にはそれが発生しなかった。真山²⁷⁾によれば、不健康な状態で放流された前期群と盛期群の一部は、ほとんど河川内に留まることなく降下し、沿岸生活への移行時に大部分が死亡したものと判断されたという。

当時、筆者はこの稚魚の飼育を担当していたが、知識と経験不足から飼育池で何が起きているのかも理解できず、連日、ひたすら細菌性鰓病に対する塩水消毒と死亡した稚魚の取り上げと計測に追われ、肉体的にも精神的にも非常に辛い経験をしたことを鮮明に記憶している。このような細菌性鰓病により多くの死亡を招いたことからの反省から、翌年の飼育に当たっては、様々な改善を講じ、細菌性鰓病の発生を招くこともなく、健康な稚魚を

適期に放流することができた。この稚魚の沿岸帯での追跡調査の結果について、真山²⁷⁾は前年と異なり石狩湾での巻網の採捕数は5月に高い分布量が示され、石狩川河川水の影響を受ける水域に濃密に分布し、順調に降海していることが知られ、採集された稚魚も大型であったと報告している。

この年級群は3年魚で1983年に回帰したが、その年の石狩川の捕獲数は前年より9万尾多い27万尾であり、年齢構成は2年魚0.2%、3年魚73.7%、4年魚16.9%、5年魚9.2%であった²⁸⁾。同様に4年魚で回帰した1984年では、石狩川の捕獲数は14万尾で2年魚0.5%、3年魚5.8%、4年魚83.1%、5年魚2.6%であり²⁹⁾、この年級群の生残率が高かったことが、捕獲実績や年齢構成からも分かる。1979年級群の飼育において細菌性鰓病の発生を招いたことを受けて行った改善内容を、飼育における主な制限要因に沿って記述する。

(1) 溶存酸素量 初めに着目したのは飼育池の溶存酸素量であった。1979年級群の排水部の溶存酸素量と成長の関係を調べたところ、排水部の溶存酸素量が6 ppmを下回る頃から成長の停滞が起こっていることが確認された(図4)³⁰⁾。また、この飼育池ではこの成長の停滞が起こってから程なくして、細菌性鰓病の発生が観察されていた。

魚類の飼育に当たって最初に考慮しなければならない要因は、水中の溶存酸素量であるとされている。魚類が健全な生活をするために必要な最小限の環境水中の酸素

量は健全臨界値と言われ³¹⁾、活動性の高いさけます類では5.0～6.4 ppmとされている³²⁾。溶存酸素量が、魚が必要とする量より少ない場合は、魚は餌料を効率的に使用可能なエネルギーに変換できず、成長率、食物効率、遊泳力の低下をもたらす³³⁾。さけます類の幼稚魚の成長、餌料効率、生残に及ぼす溶存酸素の影響に関しては数多くの報告がある。Herrmann *et al.*³⁴⁾はギンザケ(*O. kisutch*)で4～5 ppm以下、野村³⁵⁾はニジマス(*O. mykiss*)で5.7 ppm以下、Brett and Blackburn³⁶⁾はギンザケ、ベニザケ(*O. nerka*)で5 ppm以下で、それぞれ成長や餌料効率の低下を報告している。Davis³⁷⁾は多くの魚類の酸素要求量について総説し、さけます類では6.5 ppmで酸素不足に対するストレスの兆候を示すとしている。ニジマスに関しては最も多く研究されており^{38,39)}、健康な状況を保つためには5～6 ppmが最小の溶存酸素量として望ましいとされている⁴⁰⁾。1979年級群の飼育で観察された排水部の溶存酸素量と成長の関係³⁰⁾、さらにはサケ稚魚以外のさけます類の成長などに及ぼす溶存酸素量の影響に関する報告を踏まえ、健全な成長を確保するためには最低でも溶存酸素量を5 ppm以上に保つことが重要と考えられた。また、給餌の際や人が動いた際等に急な動きをしたサケ稚魚の酸素消費量が増加する³⁰⁾ことや、5～6 ppmという値は遊泳活性の増加、給餌などによる一時的な酸素消費の増加を考慮すると必ずしも安全な濃度と言えないとの報告⁴¹⁾も考慮すると、排水部は少なくとも溶存酸素量を6 ppm以上に保つことが重要であると考えられた。

1980年級群の開始に当たっては、当時はここに記述した全ての情報があつたわけではないが、排水部の溶存酸素量を5 ppm以上とすることが望ましいとの多くの文献^{23,42-44)}を目にしたことから、給餌や人の動きによるサケ稚魚の酸素消費量の増加も考慮して、6 ppmを飼育池の排水部における溶存酸素量の基準として定め、毎日排水部の溶存酸素量を測定し、6 ppmを下回る場合には注水量を増やすか、注水量の増量が行えない場合は他の池に稚魚を移すことで飼育重量を減少させる対応を採ることにした。具体的には、前年の飼育において用水量や飼育面積が絶対的に不足していることが明確になったことから、1980年級群の飼育に間に合うように新たに河川水の導水が可能な仮設池を構内に新設し、その池に稚魚を移動させた。

なお、当時の溶存酸素量の測定は、持ち運びが可能なハンディタイプの溶存酸素計は市販されていたものの、キャリブレーションが煩雑で精度も低かったことから、酸素を酸素瓶に固定してウインクラー法で測定するのが主流であった。この方法は測定箇所が多い場合には大変な作業であった。しかしながら、1980年級群の飼育では当時1台50万円以上と高価ではあったが、キャリブレーションが容易で、精度の高いYSI社製のハンディタイプの溶存酸素計が現場にも配備されることに

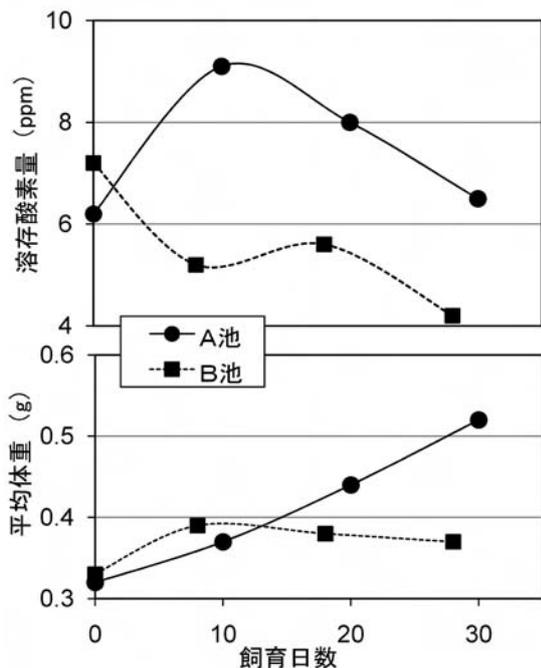


図4. 排水部の溶存酸素量と成長(野川・八木沢(1994)から)
A池: 排水部の溶存酸素量が常に6 ppm以上
B池: 排水部の溶存酸素量が慢性的に6 ppm以下

なり、測定作業の効率化が進むとともに、測定結果に基づく迅速な対処が可能となるなど適正な環境の保持に大きく貢献した。その後、この溶存酸素計は民間ふ化場も含めて広く増殖現場に普及することになる。

(2) 飼育池の水の流れの均一化 次に着目したのは、飼育池の注水部から排水部にかけての水の流れである。集約的な飼育においては、限られた飼育用水を最大限に活用することが重要である。そのためには注水された飼育用水が効率的に利用されて排水されるような環境をつくることが重要であるが、このことの重要性を指摘したのが Westers and Pratt の論文²³⁾であった。集約的な飼育においては、注水部から排水部にかけて水質の傾斜をつけることが重要であり、そのためには短冊形の池が望ましく、円形池では注水部で水の混合が起きて水質の傾斜ができないので望ましくないとしている(図5)。この報告をもとに、飼育池の注水部から排水部にかけて水質の傾斜をつけるようにした。まず、注水部に整流板を取り付け、次に注水部の3箇所の注水口からの注水量を調整して、水の流れを注水部から排水部にかけて図6のように水の滞留するような部分をつくらず均一にした。これにより、注水部に近いほど酸素は多くてアンモニアは少なく、排水部に向かうほど酸素量は少なく逆にアンモニアは多くなるという環境がつけられることになり、排水部での溶存酸素量やアンモニアのチェックで飼育池全体の環境が把握できるようになる。それとともに、稚魚により良い環境を選択させることで、稚魚の飼育池におけ

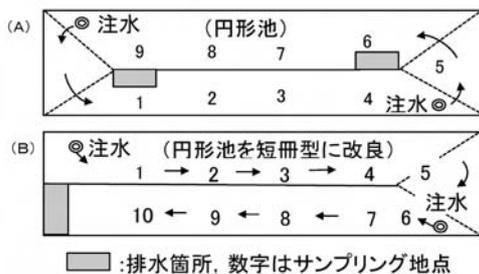
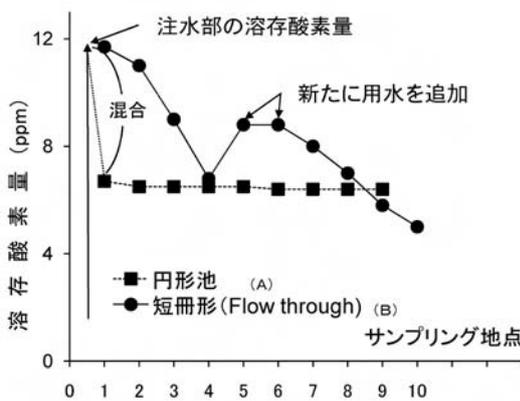
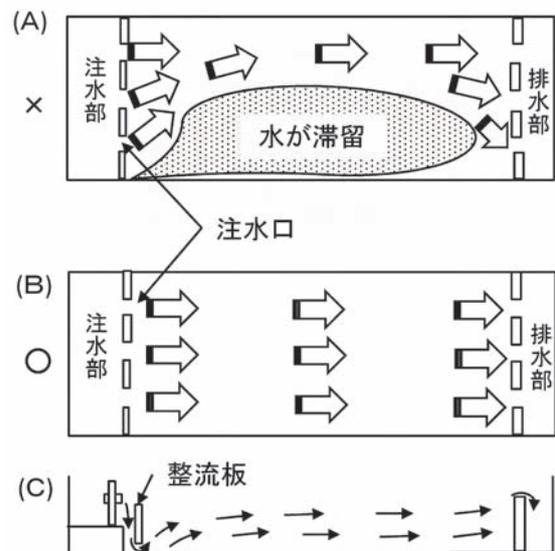


図5. 短冊型と円形池における水質の傾斜 (Westers and Pratt (1977) を改変)

る分布状況から稚魚の健康状態を推察することも可能となった。つまり、通常では稚魚は注水部付近に集まり、排水部付近には痩せて遊泳力のない稚魚が分布することになるが、そこに通常と異なり、大型の稚魚が分布するようになると、稚魚の健康状態や環境に何か起きていると考えられ、変化にいち早く気づくことができる。また、痩せた稚魚の割合から給餌や摂餌状況を推察することもできる。

現在では、飼育池の注水部への整流板の設置や注水方法を工夫するなどして、注水された用水が効率的に利用されて排水されるよう、飼育池の環境づくりが普通に行われているが、何故そのような環境づくりが必要なのかを理解することは、病気を発生させないためにも重要である。

(3) アンモニア 細菌性鰓病の発生原因としてアンモニアの影響が考えられた^{45,46)}。このため、1980年級群の飼育では、飼育池におけるアンモニア濃度を調べることにした。その結果に関しては後述するが、その前にアンモニアの魚類への影響に関して記述する。アンモニアは魚類の窒素代謝の最終生産物であり約80%以上が鰓から排泄され、環境水に拡散する^{47,48)}。排泄されたアンモニアは水中でアンモニウムイオン (ammonium: NH_4^+) と非解離アンモニア (un-ionized ammonia: NH_3) となり、次のような平衡状態となる⁴⁹⁾。



(A): 池底の傾斜等が原因で均一な流れとならない場合
(B): 注水部から排水部にかけて均一な流れ
(C): 整流版の設置位置

図6. 飼育池の水の流れ
A, B: 平面図, C: 側面図

$$K = \frac{[\text{NH}_3][\text{H}^+]}{[\text{NH}_4^+]}$$

平衡定数 (K) は温度 (T °C) に依存し、次のように表すことができる⁵⁰⁾。

$$pK = 0.09018 + \frac{2729.92}{273.2 + T} \quad (pK = -\log_{10} K)$$

また、これらの式から 総アンモニア ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) に占めるそれぞれの割合は次式により求めることができる^{49,50)}。

$$f_{\text{NH}_3} = \frac{1}{1 + 10^{pK-pH}} \quad f_{\text{NH}_4^+} = \frac{1}{1 + 10^{pH-pK}}$$

$$f_{\text{NH}_3} + f_{\text{NH}_4^+} = 1$$

非解離アンモニアとアンモニウムイオンの割合は水温と pH によって大きく変わり、例えば、水温 8°C、pH 8 の場合、 pK は 9.80 と見積もられ、総アンモニアに占めるアンモニウムイオンの割合は 98.4%、非解離アンモニアの割合は 1.6% と計算される。北海道における飼育水温の上限と考えられる 13°C (pH 8) では、アンモニウムイオンの割合は 97.7% で、非解離アンモニアの割合は 2.3% となり、水温が高くなってもアンモニウムイオンが大部分を占める。しかしながら、pH に関しては、1 上昇して pH 9 になると、水温 13°C では非解離アンモニアの割合は 19.0% と約 10 倍近く増加する。このように、両者の割合は pH により大きな影響を受け一般的に、非解離アンモニアのアンモニウムイオンに対する割合 ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) は pH が 1 増加すると 10 倍、水温が 10°C 上昇 (0 ~ 30°C の範囲内) すると 2 倍増加するとされる⁵¹⁾。魚類にとって有毒なのは非解離アンモニアであり、アンモニウムイオンに比較して 50 倍毒性が高いと言われている⁵²⁾。非解離アンモニアがより有毒なのは、それが中性分子でアンモニウムイオンより水生生物の上皮膜から容易に体内に侵入し拡散するためとされる⁴⁹⁾。

アンモニアの魚類への毒性に関しては多くの報告がある⁴⁹⁾。毒性には急性毒性 (Acute toxicity) と慢性毒性 (Chronic toxicity) があり、急性毒性に関しては 96 時間 LC_{50} (半数致死濃度：供試魚の半数が死亡する濃度) または EC_{50} (半数影響濃度：供試魚の半数に影響を及ぼす濃度) が調べられ、この数値が飼育池におけるアンモニアをコントロールする指標として用いられている。

USEPA⁴⁹⁾に記載されているサケ属魚類の急性毒性値としての総アンモニア態窒素の値 (pH 8 に標準化した数値) は、カットスロート・トラウト (*O. clarki*) で 21.76 ~ 30.81 ppm (幾何平均, $n=4$, で 25.80 ppm), カラフトマス (*O. gorbuscha*) で 38.33 ~ 42.07 ppm (幾何平均, $n=2$, で 42.07 ppm), ギンザケで 19.10 ~ 23.86 ppm (幾

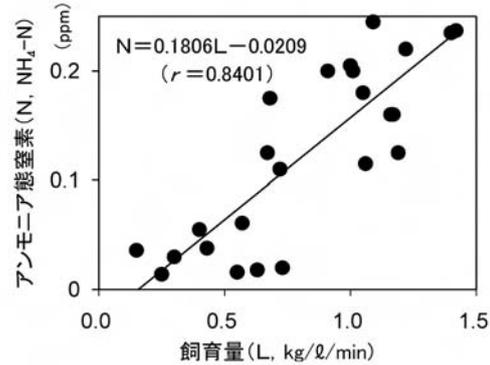


図7. 飼育量 (kg/ℓ/min) とアンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) の関係

何平均, $n=6$, で 20.27 ppm), ニジマスで 7.33 ~ 48.41 ppm (幾何平均, $n=112$, で 19.67 ppm), マスノスケ (*O. tshawytscha*) で 14.50 ~ 19.53 ppm (幾何平均, $n=3$, で 17.33 ppm) であり、さらにこれらの全ての幾何平均値は 23.71 ppm と計算される。

1980 年級群の飼育池で実際に測定したサケ稚魚の飼育におけるアンモニア態窒素については、飼育量が増加するとアンモニアが増加する傾向が認められ、飼育量 (L : kg/ℓ/min) とアンモニア態窒素 (N : ppm) との間には次のような関係が認められた (図7)。

$$N = 0.1806L - 0.0209 \quad (r = 0.8401)$$

適正な飼育量 (注水量 1 ℓ/min 当たり 1 kg) であればアンモニア態窒素は約 0.2 ppm 程度であり³⁰⁾、上記のような高濃度の急性毒性値を観測することはないと考えられる。加賀⁵³⁾は岩手県におけるふ化場の実態調査を行い、同様に飼育量とアンモニアとの関係を調べ、適正飼育量であれば、その濃度は 0.2 ppm と同様の報告をしている。適正飼育量については後述する。

慢性毒性は仔稚魚の生残や成長に及ぼす影響である。その影響に関しては、ニジマスに関して多くの報告があり、アンモニアへの慢性暴露の影響として、鰓の損傷 (膨張, 粘液生産, 上皮細胞の増生, 二次鰓弁の柱細胞組織の損傷, 鰓薄板の融合), 肝機能障害, 腎機能障害, 食物摂取量の低下, 成長の低下, 餌料効率の低下, 鱗の損傷などが報告されている^{45,54-57)}。慢性毒性の代表的な研究として常に引用されるのが Thurston et al.⁵⁷⁾ のニジマスを用いて 3 世代にわたってアンモニアの影響を調べた研究である。この研究では非解離アンモニア 0.07 mg/L 以上の濃度で鰓と腎臓に損傷を発見したが、成長などへの影響はなかったとしている。一方, Daoust and Ferguson⁵⁸⁾は、同じくニジマスで 90 日間 0.4 mg/L 以上の非解離アンモニア濃度に暴露しても鰓への損傷はなかったとしている。このような違いが生じる理由として、アンモニア濃度以外の水質が影響しているとの指摘⁵⁹⁾もなされているが、溶存酸素が十分にあれば影響を受けないとの報告もある^{54,60)}。例えば、ニジマスで溶存酸素

5 ppm 以下ではアンモニア態窒素が 0.5 ppm 以上になると、成長低下や鰓の損傷を招くが、溶存酸素が 7 ppm 以上では、アンモニア態窒素が 0.8 ~ 1.0 ppm あっても影響を受けないとしている⁵⁶⁾。

アンモニアの安全濃度に関しては、Hampson⁶¹⁾は非解離アンモニアの最高安全濃度 0.3 ppm を、Wedemeyer⁴¹⁾は 0.02 ~ 0.03 ppm を推薦している。Smith and Piper⁶²⁾はニジマスに 12 カ月飼育した結果から非解離アンモニアの最高安全濃度を 0.0125 ppm としている。このように安全な濃度についても異なった評価がなされているが、Smith and Piper が示した非解離アンモニア濃度 0.0125 ppm が多くの文献で最高安全濃度の指標として引用されている^{23,32,48,59,63)}。

前述のとおり、適正飼育量でのアンモニア態窒素は 0.2 ppm 程度と計算されるが、これから北海道における一般的な水温 5.0 ~ 10.0°C、pH 7.0 ~ 8.0 として非解離アンモニア濃度を計算すると pH 8.0、水温 10°C の時が最も高く 0.004 ppm と計算される。この値は Smith and Piper の 0.0125 ppm、Hampson の 0.3 ppm、Wedemeyer の 0.02 ~ 0.03 ppm より低く、適正飼育量で飼育している限りでは問題ないと考えられた。このように、アンモニアについてはあまり神経質になる必要がないことが分かったが、高い pH や水温の場合は、非解離アンモニア濃度が高くなることから、定期的にアンモニア濃度を測定することは必要と考えられる。

(4) 適正飼育量 酸素消費量は稚魚の成長にしたがって増大し、それとともに必要な用水量も増大する。しかしながら、排水部の溶存酸素量を 6 ppm 以上に保つために必要な用水量を常に注水できる施設は少なく、使用可能な用水量には限りがあることから、使用可能な用水量でどの程度の稚魚を飼育することができるか（適正飼育量）を知ることは、用水の有効利用や健苗を育成する上で極めて重要となる。この適正飼育量は、飼育池に注水される用水によって供給される利用可能な溶存酸素量を、稚魚の酸素消費量で除して求めることができる。サケ稚魚の酸素消費量については、栗倉⁶⁴⁾、佐々木・菊池⁶⁵⁾に報告されているが、いずれも安静時における酸素消費量である。増殖現場での実際の飼育における適正飼育量を考える場合には、遊泳や摂餌により酸素消費量が増大することから、飼育環境下における酸素消費量に基づいて求められた飼育量が実際には有効であると考えられる。

飼育池の溶存酸素の収支は、稚魚による酸素消費の他に、供給面では植物プランクトンの光合成、池表面からの拡散溶入、消費面では有機懸濁物を含む用水、残餌および池表面からの拡散損失があるが、通常、清浄な用水が多量に注水されている場合は、これらの要素による供給量や消費量はほとんど無視できる³²⁾。適正飼育量を求める際に、実際の飼育環境下における酸素収支から計

算された酸素減少量を酸素消費量として、厳密に区別せずに使用している場合も多い^{66,67)}。ここでは実際の飼育における酸素収支から計算された値を酸素減少量とした。

ここに示すデータは千歳事業場のものではなく、1985 年頃に事業規模での飼育における酸素減少量についての知見を得たく、しかも給餌により酸素消費量が増加している時間帯（午前 10 時）における酸素減少量を釧路事業場で測定した。その結果、酸素減少量は 4.8 ~ 6.9 mg / kg / min（平均 6 mg / kg / min）となった³⁰⁾。魚が利用できる流入水中の溶存酸素量を酸素消費量（ここでは酸素減少量）で除することにより飼育量を求める方法で、次式によって求めることができる。

$$W = (O_i - O_o) V / K$$

W : 飼育量 (kg), O_i : 注水部の溶存酸素量 (mg / l),

O_o : 溶存酸素の健全臨界値 (mg / l),

V : 注水量 (l / min), K : 酸素減少量 (mg/kg/min)

この式に注水量を 1 l / min, O_i を水温 5 ~ 10°C における溶存酸素量（酸素飽和度を 100% とした）, O_o を 6 mg / l, K を 6 mg / kg / min とし飼育量を計算すると 0.8 ~ 1.1 kg / l / min となる。このことから、実際の飼育においては、1.0 kg / l / min を適正飼育量の目安とすることが望ましいと考えられる。

(5) 飼育密度 適正飼育量の計算式からも分かるように、注水量が多いほど飼育量は増加するが、そこには飼育密度の概念が入っていない。飼育密度は飼育容積と飼育量の関係であり、注水量が十分に供給されていても、ある飼育密度（極限量）以上で飼育すると、摂餌、成長などが低下することが知られている³²⁾。これは魚が占める空間の狭さに由来するストレスに起因すると考えられている^{32,48)}。1980 年頃には飼育密度に関して具体的な問題が生じていなかったが、非常に高密度 (30 kg/m³) の飼育池で胸鰭にスレが生じた稚魚が多数観察されたことがあり、適正な飼育密度の基準について検討し、現状のふ化場の換水率などを考慮してサケ稚魚の飼育では 20 kg / m³ を基準にするのが望ましいと考えられた³⁰⁾。

この根拠として、適正な飼育密度については、魚種や魚体重により多くの報告が見られるが、飼育密度は換水率から飼育量を換算することができ、次のような関係にある⁶⁸⁾。

$$Ld = (D \times 0.06) / R, \quad D = (Ld \times R) / 0.06$$

ここで、 Ld : 飼育量 (kg / l / min), R : 換水率, D : 飼育密度 (kg/m³) であり、換水率は 1 時間に飼育池の水が入れ換わる回数で、例えば、注水量 500 l / min, 飼育池容積が 30 m³ とすれば、 $R = 1$ (0.5 m³/min × 60 ÷ 30 m³) と計算される。したがって、換水率が分かれば飼育量と飼育密度を求めることができる。1993 年に北海道さけ・ますふ化場の換水率を調査したところ、多くのふ化場では $R = 1.0 \sim 1.5$ であった³⁰⁾。

$Ld = 1.0 \text{ kg} / \ell / \text{min}$ として計算すると、飼育密度は $16.7 \sim 25 \text{ kg/m}^3$ と計算される。このことから、飼育密度 20 kg/m^3 程度とするのが望ましいと考えられた。なお、 $R=2$ の時は、 $Ld = 1.0 \text{ kg} / \ell / \text{min}$ あれば、飼育密度は 33.3 kg/m^3 となり、 $R=1$ の時の2倍となる。換水率が高ければ飼育密度を高くすることが可能となり、Westers and Pratt²³⁾が優れた飼育環境であるとする $R=4$ では、飼育密度は 66.7 kg/m^3 となる。

八重樫・佐々木⁶⁹⁾は、飼育開始時の飼育密度がⅠ区： 11.0 kg/m^3 、Ⅱ区： 21.9 kg/m^3 、Ⅲ区： 32.9 kg/m^3 、Ⅳ区： 54.8 kg/m^3 の4群を設定し、37日間飼育して成長や死亡率を比較した。終了時の飼育密度はⅠ区： 24.7 kg/m^3 、Ⅱ区： 47.4 kg/m^3 、Ⅲ区： 76.6 kg/m^3 、Ⅳ区： 121.0 kg/m^3 となったが、最も飼育密度が高いⅣ群を除いて、成長や死亡率に差がなかったとしている。換水率を計算してみるとⅠ～Ⅲ区で4～12回であり、換水率が高ければ相当の高密度まで問題ないと考えられる。しかしながら、換水率が1程度である現状においては、収容密度を 20 kg/m^3 を目安とするのが妥当と考えられる。なお、実際に千歳事業場での飼育において 30 kg/m^3 になると稚魚の胸鰭にスレが観察された。飼育密度試験に使用した塩化ビニール製の水槽は表面が滑らかなのに対して、実際の飼育池の表面は粗いコンクリート製であるとの違いも考えられるが、高い換水率が得られる場合でも、稚魚のスレなどを観察しながら密度を調整することが重要である。

(6) 飼育基準の設定 1979年級群の飼育において、細菌性鰓病の発生を招いたことの反省から、さけます類の飼育に関する文献のレビューを行うとともに、実際の飼育池で成長や水質に関するデータの収集を行い、そこから得られた知見に基づいて上述したような飼育環境の改善を図り、1980年級群の飼育においては、魚病の発生を見ることなく健康な稚魚を放流することができた。この稚魚の生残に関しては上述したとおり、石狩沿岸での追跡調査や回帰したときの年齢構成から生残が高かったことが確かめられた。適期放流が導入されることで、それまでの粗放的な飼育から集約的な飼育へ移行し、飼育期間も長い場合は100日以上になったが、これらの結果から、健康な稚魚を放流するためには、少なくとも次のような環境のもとで飼育することが望ましいと考えられる。

- ① 飼育池排水部の溶存酸素量を6 ppm以上に保つ。
- ② 注水量 $1 \ell / \text{min}$ 当たりの飼育量は1 kgを目安とする。
- ③ 飼育密度は 20 kg/m^3 を目安とする。
- ④ 飼育池の注水部から排水部に向かって、水質の傾斜ができるような環境をつくる。

このような基準に基づく飼育が幅広く増殖現場で行われるようになるのは1985年以降であり、このような基

準をもとにした実際の増殖現場における飼育量の具体的な放流方法なども紹介されるようになる⁷⁰⁾。また、1996年に北海道さけ・ますふ化場によって作成された「さけ・ますふ化事業実施マニュアル」に、①～③の項目が、飼育管理における基準として設定されることになった⁷¹⁾。

5. 魚 病

栗倉⁷²⁾は北海道におけるサケ科魚類の増殖事業において発生した魚病について、細菌性疾病3種、カビおよび酵母などによる疾病3種、ウイルス性疾病2種、寄生虫病7種、その他疾病7種の合計22種を報告している。また、「さけ・ますふ化事業実施マニュアル」にも、原虫病3種、細菌性疾病5種、ウイルス性疾病5種など、栗倉⁷²⁾とほぼ同様の17種の魚病が記載されているが⁷¹⁾、本格的な飼育が開始された第Ⅱ期以降で、北海道さけ・ますふ化場の事業成績書、情報誌「魚と卵」に初めて魚病や魚病が原因と考えられるサケ稚魚の死亡が報告されたのは、1967年に中川事業場で起きた多量に溶存した窒素ガスが原因と考えられる死亡である¹²⁾。しかしながら、この報告には具体的な症状や病名は記述されていない。その2年後の1969年には伊茶仁事業場で原虫病であるトリコジナ症（原文ではサクロキータ (*Trichodina domerguei*) が発生とある）による死亡が⁷³⁾、1980年には民間のふ化場で中川事業場と同様に窒素ガスに起因する水腫と考えられる死亡が報告されている⁷⁴⁾。また、この頃から細菌性鰓病の発生状況や診断法^{75,76)}、寄生虫に関する報告⁷⁷⁾が見られるようになり、飼育が本格的に行われるようになってから、サケ稚魚の魚病が増殖現場で問題となっていったことが分かる。近年、サケ稚魚の飼育において問題となる魚病の主なものは、細菌性鰓病、鞭毛虫類のイクチオボド (*Ichthyobodo* sp.) の寄生によるイクチオボド症、繊毛虫類のトリコジナ (*Trichodina truttae*) の寄生によるトリコジナ症、キロドネラ (*Chilodonella piscicola*) の寄生によるキロドネラ症および水腫症である。

細菌性鰓病は、適期放流技術の導入による長期間飼育が行われるようになった1980年代初めに多くのふ化場で発生し問題となったもので、その原因は高アンモニア濃度^{41,45,46)}、低酸素濃度⁴¹⁾などの環境悪化によるとされている。現在では、原因菌の *Flavobacterium branchiophilum* が鰓の表面を覆い、鰓上皮細胞が増殖し、やがて鰓薄板の相互の癒着、鰓弁の棍棒化が起これ、これらの病変が呼吸を妨げて死亡に至らしめることが知られているが⁷⁸⁾、当時、原因菌は粘液細胞の一種 *Cytophaga* sp. と考えられ、病原性、発生機序、治療予防の時期など不明な点が多かった⁷²⁾。前述したように当時の千歳事業場では飼育量に対して用水が絶対的に不足していたこと、また、排水部の溶存酸素量を6 ppm以上に保つ

という基準も設定されていなかったことから、結果的に稚魚を低酸素濃度の環境に曝すことになった。

低酸素濃度の環境下におかれた稚魚は、狂奔するような遊泳行動を示すが、そのような状況が見られて1週間程度経過してから、急に遊泳行動が鈍くなり、池の側壁にもたれかかるような稚魚が多く見られるようになって、細菌性鰓病に罹っているのに気づくというのが実態であった。しかし、この時期には既に末期的な場合が多く、塩水消毒を行っても回復させることは難しいことから、稚魚を低酸素濃度の状況下に曝さないことが一番の予防であることが分かり、実際に排水部の溶存酸素量を6 ppm以上に保つという基準が守られるようになって、細菌性鰓病の発生はほとんど観察されなくなった。また、飼育池内の流速や水の流れを改善することにより細菌性鰓病の発生を防いだとの報告⁷⁹⁾もあるように、最大の対策は適正な環境下で飼育することであると言える。Wedemeyer⁴¹⁾も集約的な飼育における細菌性鰓病の発生は、多くの場合、過密収容、低酸素、注水量の不足、高アンモニア濃度など管理者（技術者）のミスに関係していると指摘している。

イクチオボドは北日本のふ化場の約40%で発生が見られ、寄生により稚魚の皮膚や鰓が損傷を受け、海水中に移行すると浸透圧調整ができず大量に死亡することが確認されている^{80,81)}。トリコジナは体表や鰓に寄生することにより、キロドネラは鰓に寄生することにより起こり、成長の低下や死亡を起こす。キロドネラとトリコジナは河川水を用いたふ化場で頻繁に発生し、天然魚が主な感染源と推定されている。外部寄生する原虫は、この3種類がほとんどであるが、集約的な飼育を行っているため、これらの原虫が稚魚に寄生した場合は、飼育池のほとんどの稚魚に寄生が広がり、薬浴により原虫を駆除しないと、稚魚は池の底や側壁に体を擦りつける行動を繰り返し、やがて死亡に至る。原虫の種類と分布、その病害性などについては、Urawa^{80,81)}が詳しく報告している。ホルマリンが原虫の駆除に極めて有効であったため、それが1980年代後半から広く使用されてきたが、薬事法の改正により2005年から使用が禁止された。現状では原虫の駆除に有効な水産用医薬品がないことから、原虫の駆除が増殖現場で大きな課題となっている。

水腫症は、上記の報告の他、筆者の経験では原因は不明であるが、1980年代に数カ所のふ化場で観察されている。その発生規模も数十万尾規模での発生から数万尾の規模まで様々であった。発生たびにその原因が検討されたが、多くの場合は導水方式の不備による高窒素ガス圧が原因と考えられ、主に曝気などによりその改善が図られた。その対策により解決する場合と解決に至らない場合が見られた。また、この病気の特徴として、突然として発生し数年連続するが、対策の効果によるものなのか明確な判断がつかない前に発生しなくなることもあった。水腫症が大規模に発生し問題となったのは、虹

別事業所のサケ仔魚で2003年に発生したものである。水腫症の外観症状、疫学検査の結果、病理組織学的な検討結果などに関しては、野村⁸²⁾が報告している。当時も原因不明とされたが、現在でも未だ解明されていない。なお、対策としては塩水浴が有効であることが知られている^{83,84)}。

6. 機器の開発

(1) 飼育池自動清掃機 稚魚の飼育に使用された機器の中で、作業の軽減や飼育環境の良好な保持に大きく貢献しているものに飼育池自動清掃機がある。飼育池の池底には、稚魚が排泄した糞や残餌（以下「排泄物等」という。）が溜まる。これを放置すると池環境の悪化につながるため、自動清掃機が開発されるまでは、少なくとも1日1回、人力により飼育池の注水部から排水部に向かってデッキブラシで排泄物等を飼育池外に出す作業を行っていた。この作業は飼育池の水が冷たいこと、および飼育池の流速が小さいことから、清掃に時間がかかる肉体的に相当大変な作業であり、これを無人化する機器の開発は、増殖現場の職員の誰もが望むものであった。このため、真空圧を利用して排泄物等を吸引する清掃システム⁸⁵⁾や水流噴射式の清掃機⁸⁶⁾などの開発が試みられたが、いずれも実用化に至らなかった。現在広く増殖現場で用いられている自動清掃機は、飼育池の注水部から排水部に向かって清掃用ブラシを池底に押しつけながら、飼育池の流速に合わせてゆっくりとモーターで牽引する方式のものである。

この方式の自動清掃機を製品化したのは有限会社タカツ電気商会であるが、この製品化の過程でアイデアを提供し、種々のアドバイスをを行い、製品化に大いに貢献したのは、1983～1988年頃に北海道さけ・ますふ化場渡島支場に勤務していた小林明弘氏である。小林氏はそのもととなる試みを1979年に千歳事業場において行った。その試みは、アイデアを製品化するまでには至らなかったものの、この取り組みが渡島支場での製品化に向けた取り組みに大いに貢献することになったのであり、筆者も千歳事業場での試みに参画したことから、当時を思い起こしながら記述する。

千歳事業場の飼育池の清掃は、水温が8℃と冷たいこと、1面を清掃するのに2時間近くを要することなどから大変厳しい作業であった。また、飼育期間中毎日のことであり、この作業の効率化・省力化は大きな課題であった。考えた方法は、基本的には現在普及している自動清掃機と同様であり、清掃用ブラシをL字型の鋼材に固定し、鋼材の重さでブラシを池底に押しつけ、それをモーターで引っ張るといったものである。その速度はブラシで集められた排泄物等が水中に舞わないようにゆっくりと引っ張るといったものであった（図8、写真1）。試作は民間の鉄工所の協力を得ながら、L字鋼を取り付けたブ

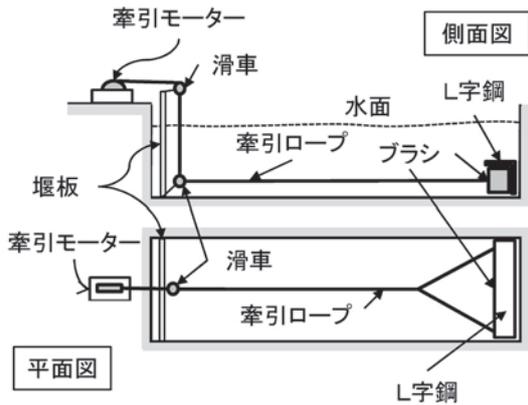


図 8. 試作した自動清掃機の仕組み

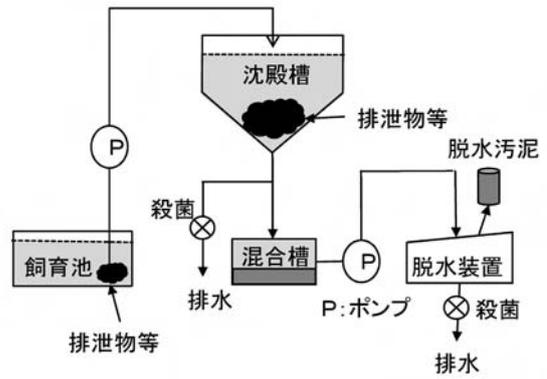


図 9. 汚泥脱水処理装置のシステム



写真 1. 試作した自動清掃機のブラシと牽引モーター



写真 2. タカツ式自動清掃機

ブラシを製作し、モーターは小林氏が一定の速度で引っ張るための基本的な構造を考え、実際に使用しては改良するという試行錯誤を繰り返しながら完成品を目指した。しかしながら、ブラシを牽引するのに使用したクレモナ・ロープ（ビニロンとポリエステル混紡糸を使って作られたロープ）のたわみから一定の速度で引っ張るのに難があり、また、L字鋼の重さだけではブラシを池底に強く押しつけることができず、期待した清掃効果が得られないという難点を克服できなかった。2年ほど試行錯誤を繰り返したが、人事異動もあり完成品に至らず1980年に試作を終えることになった。

小林氏は1983年に渡島支場に異動となり、そこでタカツ電気商会にその開発途中であったアイデアを提供し、難点であった課題の解決を図り、実際の増殖現場での使用試験も試み、製品化につながるようになった。特に千歳事業場で開発のネックとなった牽引ロープは、伸縮しないステンレスのワイヤーロープになり、このロープでブラシを強く飼育池底に押しつけることで解決が図られた（写真2）。この清掃機は1987年に八雲事業場に初めて設置されることで増殖現場での使用が開始され、実際に使用する中で改良が行われた。さらにタイマーにより自動的に稼働する機能も付加され、1997年にタカツ電気商会は特許を出願、1999年には特許を取得して自動清掃機「タカツ式ポンドクリーナー」として販売され、北海道、本州のふ化場に広く導入されることになった。本機器は増殖現場において欠くことのできない画期的な開発となった。

(2) 排泄物処理装置 サケ稚魚から排泄される排泄物等は、清掃機で飼育池の排水部まで集め、河川に流出させていたが、さけます増殖事業においても、河川環境へ及ぼす影響を少なくすることが重要であるとの認識から、サケの飼育排水の処理施設の設置や浄化処理に関する技術開発が試みられた。

さけ・ます資源管理センターの事業所に初めて試験的に処理施設が導入されたのはサクラマスの幼魚生産を行

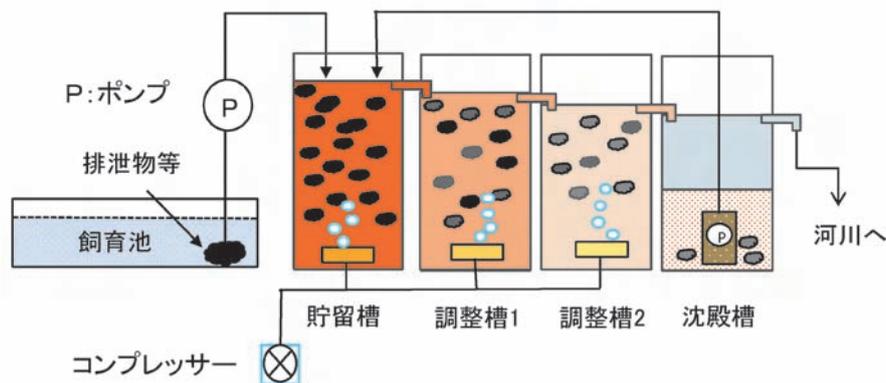


図 10. 微生物消化処理装置システム



手前から奥に向かって貯留槽, 調整槽1~2, 沈殿槽

写真 3. 排水処理施設
使用期間が冬場のため、施設内の気温を高め、微生物の活性を促進するためにビニールハウス仕様となっている

っていた屎別事業所であり、1997年のことである。そのシステムは、汚泥脱水処理装置と言われ、飼育池の排泄物等を水と一緒に貯留槽に回収し、貯留槽で3～7日間かけて沈降させた後、混合タンクへ沈殿物のみを送る。そこで脱水効果を高めるために高分子凝集剤を添加し凝集させた後、脱水装置により排泄物等と水を分離し、分離された水は紫外線殺菌して河川に戻し、排泄物等は固化して一般のゴミ焼却炉で焼却するというものである(図9)。

しかしながら、このシステムは排泄物等の効率的な収集や処理過程で悪臭が発生するなどの問題点もあり、さらに効率的な処理方法を求めて開発が行われることになる。その処理方法が微生物処理による微生物浄化システムと呼ばれるものである。排水処理の流れは、①飼育池に溜まった排泄物等をポンプで吸い上げ貯留槽に移し、②貯留槽では土壌微生物群(土壌菌)が排泄物等を分解する。③貯留槽から順に複数の貯留槽に移る間に排泄物等のほとんどは分解され、④最後に沈殿槽へ移し、処理できない沈殿物は再度貯留槽へポンプで移し、浄化された上澄み水のみを排水するシステムである(図10, 写真3)。2002年から2カ年かけて伊茶仁事業所において試験規模で有効性を確かめる試験が行われた。その結果、表5に示すように水質改善に一定の有効性が確かめられたことから⁸⁷⁾、2002年に同事業所に事業規模での実証施設を設置し、さらに効果の検証を行うことになった。

表 4. 処理前、処理後及び河川水の水質

項目	貯留槽(処理前)	沈殿槽(処理後)	河川水
SS(mg/l)	3,500~5,800	680~770	7~17
COD(mg/l)	890~1,600	180~230	1.5~8.7
NH ₄ -N(mg/l)	3.2~13.0	0.12~2.9	0.07~0.12

SS: Suspended Substance (懸濁物質)
COD: Chemical Oxygen Demand (化学的酸素要求量)

表5. 1962～1996年級におけるサケ稚魚の放流数、給餌割合、放流時の体重等

年級	放流数(千尾)			給餌割合 (%)	平均体重(g)		給餌量 (kg)	餌料効率 (%)	生残率 [*] (%)
	給餌	無給餌	合計		飼育開始時	放流時			
1962	26,804	253,939	280,743	9.5	0.38	0.79	14,429	75.0	99.3
1963	72,222	199,883	272,105	26.5	0.37	0.72	40,020	61.0	96.5
1964	103,644	230,818	334,462	31.0	0.37	0.65	45,000	60.0	99.0
1965	121,274	428,004	549,278	22.1	0.37	0.68	65,000	52.0	94.5
1966	157,492	114,544	272,036	57.9	0.36	0.90	75,974	107.0	95.2
1967	223,568	211,161	434,729	51.4	0.35	0.82	68,477	136.4	94.7
1968	192,143	15,295	207,438	92.6	0.34	1.05	62,386	216.1	98.5
1969	276,519	85,052	361,571	76.5	0.33	0.89	102,458	144.2	98.3
1970	321,033	121,068	442,101	72.6	0.33	1.07	113,817	200.6	96.6
1971	435,615	140,371	575,986	75.6	0.33	1.02	106,111	275.1	95.8
1972	376,969	98,836	475,805	79.2	0.32	0.95	109,890	210.3	96.4
1973	344,178	101,332	445,510	77.3	0.33	0.77	82,567	182.6	97.4
1974	350,700	134,149	484,849	72.3	0.34	0.93	61,694	329.4	96.5
1975	554,034	247,957	801,991	69.1	0.30	0.86	77,585	368.3	97.0
1976	432,156	91,205	523,361	82.6	0.30	0.69	68,983	233.5	97.4
1977	603,352	89,249	692,601	87.1	0.34	0.65	92,874	188.4	97.2
1978	665,212	114,049	779,261	85.4	0.32	0.63	125,249	155.0	97.3
1979	806,888	66,691	873,579	92.4	0.32	0.65	154,352	160.9	97.8
1980	944,716	86,003	1,030,719	91.7	0.33	0.65	205,095	143.2	97.3
1981	945,270	103,877	1,049,147	90.1	0.34	0.64	255,742	110.5	95.5
1982	1,000,553	84,606	1,085,159	92.2	0.35	0.76	298,464	136.2	97.3
1983	1,042,240	82,242	1,124,482	92.7	0.33	0.67	300,029	102.0	97.2
1984	1,043,906	73,002	1,116,908	93.5	0.33	0.71	351,199	101.0	97.8
1985	1,051,358	52,776	1,104,134	95.2	0.34	0.75	402,517	104.0	96.3
1986	1,007,423	37,762	1,045,185	96.4	0.34	0.81	443,518	106.5	96.5
1987	1,001,358	29,590	1,030,948	97.1	0.35	0.83	460,902	105.6	97.4
1988	1,028,173	49,102	1,077,275	95.4	0.34	0.89	510,189	105.7	96.6
1989	1,067,780	45,825	1,113,605	95.9	0.36	0.96	583,454	107.9	97.0
1990	1,062,434	38,523	1,100,957	96.5	0.37	1.03	652,292	105.5	97.2
1991	1,025,941	27,932	1,053,873	97.3	0.37	1.08	676,059	104.6	97.4
1992	981,613	27,137	1,008,750	97.3	0.36	1.07	643,504	105.8	98.4
1993	1,043,738	40,216	1,083,954	96.3	0.38	1.10	692,438	106.6	98.1
1994	1,032,861	30,570	1,063,431	97.1	0.37	1.14	627,391	110.9	96.5
1995	1,017,495	18,838	1,036,333	98.2	0.38	1.12	710,925	103.3	97.8
1996	988,451	10,399	998,850	99.0	0.37	1.10	702,031	99.9	98.1

※生残率(%)=100×放流数/飼育尾数 放流数は飼育尾数から飼育期間中の死亡尾数を差し引いたもの
 注:数値は事業成績書(北海道さけ・ますふ化場)から引用したもの 平均体重、給餌量、餌料係数、生残率は飼育重量、飼育尾数、死亡数などのデータのそろっているふ化場から算出した

ここに2004年度の結果⁸⁸⁾を引用すると、処理前の水質はSS(懸濁物質)が3,500～5,800 mg/ℓ、COD(化学的酸素要求量)が890～1,600 mg/ℓ、アンモニア態窒素が3.2～13 mg/ℓと非常に高い数値であったが、処理後にはSSは処理前の10～20%に、CODは15～25%に、アンモニアは5～30%に減少した。また、この処理水は他の事業用の用水により希釈されて河川に排水され、その河川ではSSが7～17 mg/ℓ(処理前の約0.2%)、CODが1.5～8.7 mg/ℓ(同0.3～0.5%)、アンモニア態窒素が0.07～0.12 mg/ℓ(同0.9～2.2%)と低くなっていた(表4)。このシステムで処理し、希釈して排水することにより、河川への負荷は大幅に軽減されるものと考えられる。このような結果を踏まえ、さけますセンターでは計画的にこのシステムを施設整備と併せて設置してきている。

7. 放流数、給餌割合、放流サイズ等の推移

北海道さけ・ますふ化場では、サケ稚魚の飼育が本格的に開始されてから、1997年にさけ・ます資源管理センターに改組するまでの間、民間ふ化場も含めて北海道におけるサケ稚魚の飼育に関するデータについて、毎年、北海道さけ・ますふ化場の事業成績として、施設ごとにとりまとめてきた(表5)。

飼育後に放流される稚魚の割合は、当初全放流数の10%以下であったが、5年後には50%を超え、10年後には70%を、1980年以降は90%を超えた。その10年後の1990年代以降は、ほぼ全数に近い稚魚が飼育後に放流されるようになった。放流サイズは年々大型化し、1985年には0.7gを超え、1990年以降は1.0gを超える体重で放流されるようになる。

表 6. 1997～2004 年級におけるサケ稚魚の放流時の魚体重

年級	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
平均体重 (g)	1.19	1.13	1.20	1.34	1.33	1.27	1.31	1.26

餌料効率を見ると、飼育開始当初は養魚池での吊下式または置餌式で給餌が行われたことから、その効率も悪かったようであるが、その後は増加し高い値を示している。しかしながら、1975 年頃までの数値は実際以上に高い数値と考えられ、飼育群全体の平均魚体重などが正確に把握されていなかったことが原因と推察される。適期放流の導入などで飼育池における飼育尾数、飼育稚魚の平均体重などの飼育状況が正確に捉えられるようになってから、数値は低下傾向を示し、1980 年以降の数値は実態を反映しているのではないかと考えられる。

生残率は、当初から 97% 以上の高い数値を示しており、飼育で大きな減耗が生じているような数値は見られない。乾燥配合餌料に切り替わる時期には 95% を下回るような数値が見られた。これは生飼料の冷凍保存の不備によるスポンジ化等の飼料の変性の問題などに起因する死亡と推察される。一方、適期放流が導入されて細菌性鰓病による死亡が問題となった 1979 年から 1985 年頃の生残率はそう低い数値となっていないことから、死亡には至っていないものの、不健康な状態で放流された稚魚が多かったのではないかと推察される。1998 年以降については、飼育状況に関する詳細なデータはないが、北海道における放流サイズについて社団法人北海道さけ・ます増殖事業協会できりまとめている（表 6）⁸⁹⁾。放流サイズは大型化しており、2004 年級は平均 1.3 g で放流されている。

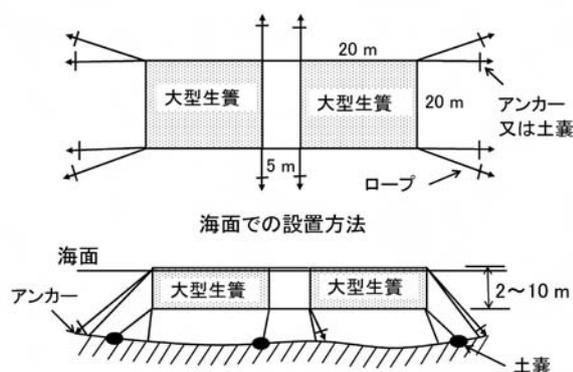


図 11. 一般的な海中飼育用生簀の構造と海面での設置方法（菅野（1981）を改変）

8. 海中飼育

海中飼育は、サケ稚魚を早期に海水適応させて飼育する方法で、陸上の飼育池から直接河川に放流せずに、海水適応能力を備えるようになった 0.6 g 以上の稚魚を、海面に設置した図 11 に示すような網生簀に収容し、一定期間給餌した後、沿岸水温 13℃ を指標に放流する技術で、サケ稚魚の河川滞泳期、河口滞泳期と沿岸帯泳期の食害などによる減耗を防ぐ放流方法である⁹⁰⁾。

この海中飼育の技術の発展経過について、菅野⁹¹⁾は次のように書いている。1970 年から 1972 年にわたって水産庁研究部の企画、水産庁東北区水産研究所増殖部、岩手・宮城県両水産試験場への委託研究により、岩手県山田湾において有用魚類大規模養殖実験事業、サケ養殖技術開発企業化試験が実施された。これが 1973 年度からの水産庁の回遊性重要資源開発費補助金による岩手県水産試験場「サケの回帰率向上に関する種苗育成放流技術開発試験」、さらに 1977 年から 5 カ年間にわたるサケ別枠研究の中の大課題「海中飼育放流技術による稚魚の減耗抑制」のプロジェクト研究へと発展し、これらの一連のサケ増殖の技術開発研究が、この地域のサケ増殖生産技術を発展させる大きな原動力となった。また、佐藤⁹²⁾もこれらの経過について詳述している。

この海中飼育の回帰効果は、表 7 のとおりである。1973 年級群と 1976 年級群は河川放流群、海中飼育放流群とも高回帰率を示した。河川放流群は 1.3 g 以上でかつ海中飼育が行われた山田湾外への移動期の魚体重が 8 g 以上の場合 6% 以上の回帰率となり、海中飼育放流群も 8 g 以上の放流サイズの場合、河川群と同様に 6% 以上の回帰率となったとしており⁹³⁾、海中飼育群におい

表 7. 河川および海中飼育放流群の回帰率

年級群	河川放流群		海中飼育放流群	
	放流体重 (g)	回帰率 (%)	放流体重 (g)	回帰率 (%)
1972	1.3	3.43	4.3	1.84
1973	2.0	8.52	10.5	7.58
1974	0.9	3.69	5.0	3.96
1975	1.3	6.11	4.9	4.38
1976	1.3	9.47	8.3	10.74

でも河川放流群と同様に高回帰率を得ることが確かめられた。

1980年代の岩手県における海中飼育尾数は、多い年級群では7,000～8,000万尾にもなっていたが、近年では3,000万尾以下の状況となっている。しかしながら、海中飼育の有効性については、2007年から3年間さけますセンターが中核機関となって、農林水産技術会議の「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」の一環として、岩手県の田老沿岸において海中飼育施設を活用したサケ稚魚放流技術の高度化に関する技術開発で検証された。海中飼育施設は、海中に敷設されているため、網目を通過して動物プランクトンも自由に入出入りできる環境にあるので、配合飼料から動物プランクトン食への切り替え訓練も自然に行われること、潮汐の変化などもあるため海洋環境への順応も促進されることから、海中飼育は放流後の稚魚の減耗抑制に有効であることなどが確かめられている⁹⁴⁾。現状においては、海中飼育尾数が減少傾向にあるが、資源の増大に向けてその有効性を再認識し、その活用を図ることが期待される。このことは、陸上の飼育池への負担の軽減にもつなり、相乗的に回帰率の向上に貢献するものと考えられる。

海中飼育技術は岩手県を中心に発展してきたが、北海道においても岩手県での成果を受けて、1979年春に初めて根室地区で約250万尾の海中飼育が行われた。翌年の1980年からは北海道の各地で行われるようになり、海中飼育される尾数も年々増加し、10年後の1990年には5,000万尾を超え、近年では北海道の総放流数の10%程度に相当する約9,000万尾が海中飼育されている⁸⁹⁾。

9. カラフトマス稚魚の飼育

これまで、サケ稚魚の飼育技術について記述してきたが、ここで記述した給餌方法、飼育池環境などに関する技術はカラフトマスの稚魚の飼育に当たってもほとんど利用可能な技術である。カラフトマスはサケと異なり、河川水が浸透している場所に産卵し²⁶⁾、産卵床から浮上した稚魚は直ちに降河を開始することが知られており^{95,96)}、サケ科魚類の中で最も河川内の滞留時間が短いとされる⁹⁷⁾。このような生態的な特徴のためか、サケのように人工飼料へ馴れるのに時間を要することや、浮上時の魚体重がサケに比較して小さいことからピンヘッドになりやすいといった特徴がある。

サケと同様に、民間ふ化場も含めて北海道におけるカラフトマス稚魚の飼育に関するデータを、北海道さけますふ化場の事業成績から、表8にとりまとめた。飼育されて放流される稚魚の割合は、1990年代までは半数程度であるが、それ以降は放流される稚魚の80%近くが給餌放流されている。放流体重は1990年までは、大半が0.4g以下であるが、それ以降は大型化し0.5gを超えるまでになっていた。しかし、2003年、2004年と給

餌されて放流される稚魚の割合が低くなるとともに、放流体重も0.5gを下回る状況となっている。餌料効率を見ると、1980年までは実態を反映していないような数値が見られているが、サケと同様に飼育群全体の平均体重が正確に反映されていないことによると考えられる。それ以降は、飼育状況が正確に捉えられるようになって、数値は低下傾向を示し、1980年以降の数値は実態を反映しているのではないかと考えられる。生残率については、当初から97%以上の高い数値を示しており、飼育で大きな減耗が生じているような数値は見られない。1997年以降のデータについては、(社)北海道さけます増殖事業協会できりまとめている成績⁸⁹⁾からの抜粋である(表9)。

なお、サクラマスおよびベニザケの飼育については、両魚種の人工ふ化放流に関する技術史において記述されることになっている。

10. 今後の課題 ～さらなる高度化を目指して～

適正な時期に適正なサイズで放流するという技術の導入が、今日のサケ資源の増大に大きく貢献した。その前提として、少なくとも健康な稚魚を生産することが必要なことから、そのための様々な技術開発が行われてきた。それは健康な稚魚を放流するために、いかに適正な環境下で飼育するかという技術開発であったとも言える。

現在では、適期放流技術が導入され、集約的な飼育が開始された頃に悩まされた細菌性鰓病もほとんど見られなくなるほど、その技術は完成されつつある。しかしながら、飼育基準を満足している環境下で飼育してさえいれば、放流される稚魚は全て健康な稚魚と言えるのであろうか。また、技術普及のために民間ふ化場を見て回っている中で、毎年大型の稚魚を適期に放流しているにもかかわらず、期待するほど河川に回帰しない。あるいは、大型の稚魚を適期に放流しているが、その飼育状況は非常に高密度であり、飼育池の換水率を高めるために飼育池内の流速が早く稚魚は常に遊泳を強いられている状況も散見される。このような環境下で飼育された稚魚の健苗性に問題はないのであろうか。過度の飼育密度や流速は稚魚にストレスとなって健苗性を低めてはいないか。

近年、適期・適サイズ放流が行われるようになり、飼育技術の向上も相まって放流稚魚の大型化が進み、放流魚体重が3g近い稚魚が飼育池で普通に見られるようになってきている。この魚体重は沿岸域から沖合域へ移行する時期のサイズである。3gの稚魚でも海水適応の面からは問題ないことは確かめられており⁹⁸⁾、小林¹⁾は健苗性については客観的な明確な基準はないものの、健全に成長した稚魚であれば海の生活にスムーズに移行することから、稚魚の健苗性は海水適応度合いのチェック

表8. 1962～1996年級におけるカラフトマス稚魚の放流数、給餌割合、放流時の体重等

年級	放流数(千尾)			給餌割合 (%)	平均体重(g)		給餌量 (kg)	餌料効率 (%)	生残率 [※] (%)
	給餌	無給餌	合計		飼育開始時	放流時			
1962	168	14,535	14,703	1.1	0.25	0.36	71	26.0	98.9
1963	219	18,775	18,994	1.2	0.23	0.32	80	24.6	99.5
1964	0	14,982	14,982	0.0	-	-	-	-	-
1965	0	17,592	17,592	0.0	-	-	-	-	-
1966	325	10,948	11,273	2.9	0.23	0.27	-	-	99.4
1967	0	28,083	28,083	0.0	-	-	-	-	-
1968	9,680	11,789	21,469	45.1	-	-	2,110	-	99.1
1969	27,314	37,242	64,556	42.3	0.23	0.79	5,880	260.8	98.9
1970	8,185	7,688	15,873	51.6	0.22	0.82	4,725	101.9	98.6
1971	38,981	100,706	139,687	27.9	0.24	0.48	5,290	145.2	96.7
1972	10,197	10,193	20,390	50.0	0.24	0.59	760	140.7	96.8
1973	38,387	50,704	89,091	43.1	0.20	0.53	7,426	160.0	90.0
1974	25,845	26,615	52,460	49.3	0.21	0.52	4,831	165.2	96.7
1975	33,134	32,730	65,864	50.3	0.19	0.43	3,179	240.4	96.8
1976	6,472	2,828	9,300	69.6	0.19	0.45	3,847	156.1	96.9
1977	27,616	22,774	50,390	54.8	0.19	0.35	2,907	146.4	98.1
1978	13,167	10,231	23,398	56.3	0.22	0.51	5,756	55.7	97.1
1979	42,424	27,009	69,433	61.1	0.21	0.32	3,108	135.2	98.6
1980	21,925	5,993	27,918	78.5	0.20	0.44	2,293	232.1	98.4
1981	73,943	28,760	102,703	72.0	0.22	0.31	7,020	88.4	97.5
1982	37,551	19,726	57,277	65.6	0.21	0.31	3,754	93.3	96.5
1983	73,574	79,226	152,800	48.2	0.22	0.31	6,228	93.8	98.2
1984	59,160	41,130	100,290	59.0	0.22	0.33	7,805	84.7	97.9
1985	68,431	55,313	123,744	55.3	0.22	0.36	9,456	96.1	97.4
1986	58,648	66,490	125,138	46.9	0.23	0.33	6,191	90.8	98.1
1987	55,561	79,862	135,423	41.0	0.23	0.33	5,721	96.4	97.2
1988	57,989	74,101	132,090	43.9	0.23	0.35	6,915	97.9	97.9
1989	90,509	48,008	138,517	65.3	0.24	0.39	11,453	97.8	97.8
1990	102,839	31,759	134,598	76.4	0.24	0.44	23,535	86.8	86.8
1991	108,155	32,699	140,854	76.8	0.24	0.49	29,820	90.6	97.7
1992	113,148	24,699	137,847	82.1	0.24	0.53	33,984	93.0	98.4
1993	117,064	22,757	139,821	83.7	0.26	0.52	32,989	93.5	98.5
1994	102,261	15,659	117,920	86.7	0.23	0.57	30,850	109.7	98.5
1995	123,186	14,503	137,689	89.5	0.23	0.57	31,412	108.7	98.2
1996	118,470	18,236	136,706	86.7	0.24	0.51	38,497	80.8	98.2

※生残率(%)=100×放流数/飼育尾数 放流数は飼育尾数から飼育期間中の死亡尾数を差し引いたもの
 注:数値は事業成績書(北海道さけ・ますふ化場)から引用したもの 平均体重, 給餌量, 餌料係数, 生残率などは飼育重量, 飼育尾数, 死亡数などのデータのそろっているふ化場から算出した
 「-」はデータの記載がなかったもの

表9. 1967～2004年級におけるカラフトマス稚魚の放流数、給餌割合、放流時の体重

年級	放流数(千尾)			給餌割合 (%)	平均体重(g)	
	給餌	無給餌	合計		飼育開始時	放流時
1997	120,615	19,937	140,552	85.8	0.25	0.48
1998	121,031	21,058	142,089	85.2	0.23	0.46
1999	118,941	20,128	139,069	85.5	0.24	0.51
2000	107,686	30,517	138,203	77.9	0.25	0.53
2001	112,403	27,330	139,733	80.4	0.27	0.52
2002	115,353	27,715	143,068	80.6	0.24	0.52
2003	110,274	34,821	145,095	76.0	0.24	0.43
2004	104,219	41,684	145,903	71.4	0.25	0.39

で容易に判定できるとしている。現在のところ、健苗性に関する客観的で明確な基準がないことから、海水適応度合いが健苗性の指標として増殖現場で広く用いられているが、最近の放流稚魚の大型化や飼育実態を考えると、適期・適サイズという指標以外に、新たな指標として、健苗性も念頭においた飼育技術の開発が必要ではないかと考えられる。また、放流サイズの大型化、適期・適サイズ放流の厳格な実施にともない、短期間に相当数の大型の幼稚魚が沿岸域に滞泳することになり、一時的な餌生物の不足も懸念されることから、飢餓耐性を向上させるような飼育技術の開発も必要と考えられる。

本稿では筆者の知識不足や技術の未熟さが招いた失敗についても紹介したが、今後も環境の変化や効率化・コスト低減など時代のニーズに応じた技術開発は必要と考えられる。特に若い技術者におかれては、失敗を恐れずに実際の業務に取り組む中で、現状の技術に甘んじることなく、さらなる技術の高度化に取り組むことを期待したい。また、近年、新たな給餌方法の導入なども行われているところであるが、これら技術の評価を行い、次のステップ（第Ⅲ期から第Ⅳ期）に向けて着実に歩みを進めることにも期待したい。

最後に、本技術史を記述するに当たって古い文献に接する機会を得たが、特に、明治期から昭和初期にかけて開発の進んでいない北海道の山間僻地のふ化場の厳しい生活環境の中にあつて、さけます類の資源増大に情熱を傾け、現在の人工ふ化放流技術の礎を築いた先輩諸氏に改めて深甚なる敬意を表して稿を終える。

謝 辞

本稿の執筆に当たり、写真の提供などにご協力いただいた水研センター本部経営企画部江連展示係長、鮭鱒彙報などの古い文献の提供にご協力いただいたさけ・ます友の会坂野栄市氏並びに中央水研水産経済部清水水産政策研究員に感謝申し上げます。また、統計分析に関してご教示いただいたさけますセンター技術開発室高橋係員に感謝申し上げます。本稿は筆者が職を得て初めて勤務した千歳事業場での経験が根底となっているが、その当時、初学で若輩の筆者にさけます類の人工ふ化放流技術の手ほどきをいただくなど公私にわたってお世話になった沢柳源一郎氏、早坂誠一氏（故人）、小林明弘氏そして種々の環境測定などにご協力いただいた当時の同僚各位に深謝申し上げます。また、当時、北海道さけ・ますふ化場の調査課におられ、人工ふ化放流事業の実施や技術の高度化に関して多くの有益なご助言やご協力をいただいた真山 紘博士、帰山雅秀北海道大学大学院水産科学研究教授に深謝申し上げます。

文 献

- 1) 小林哲夫（2009）日本サケ・マス増殖史. 北大出版会, 札幌, 305 p.
- 2) 三原建夫（1969）稚魚の飼育をはじめた頃のあれこれ。「さけます増殖のあゆみ」（日本鮭鱒資源保護協会），東京, 229-231 pp.
- 3) 北海道庁第二部水産課（1891）鮭鱒人工孵化法.（藤村信吉編）, 25-27 pp.
- 4) 秋葉鉄之（1988）千歳. 北海道さけ・ます友の会, 61-112 pp.
- 5) 北海道経済部水産課（1928）人工孵化事業要綱. 北海道庁, 12 p.
- 6) 半田芳男（1933）鮭鱒人工蕃殖論. 北海道鮭鱒孵化事業協会, 札幌, 279 p.
- 7) 北海道鮭鱒保護協会（1938）鮭鱒彙報, 38, 27 p.
- 8) 北海道水産孵化場（1950）鮭鱒人工孵化事業要綱. 魚と卵, 6, 27-30.
- 9) 半田芳男・菊池覺助（1917）鮭稚魚の餌料試験. 鮭鱒人工蕃殖及試験報告, 北海道水産試験場, 47-58 pp.
- 10) 北海道庁（1933-1943）昭和8年～18年度鮭鱒孵化事業報告.
- 11) 日本鮭鱒資源保護協会（1967）第4回さけ・ます増殖研究協議会議事録, 9-21 pp.
- 12) 北海道さけ・ますふ化場（1967）昭和42年事業成績書, 120-121 pp.
- 13) 北海道さけ・ますふ化場（1969）昭和44年事業成績書, 180 p.
- 14) 日本鮭鱒資源保護協会（1969）第6回さけ・ます増殖研究協議会議事録, 101-109 pp.
- 15) 伊藤二美男・野本具視（2002）ホワイトフィッシュミールとブラウンフィッシュミールを使用した配合飼料により飼育されたサケ稚魚の成長と脂質含量の変化. 魚と卵, 168, 19-28.
- 16) 日本鮭鱒資源保護協会（1967）第2回さけ・ます増殖研究協議会議事録, 69-75 pp.
- 17) 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. 北海道さけ・ますふ化場研究報告, 40, 31-92.
- 18) 佐々木正吾（1989）サケの餌付け時期に関する検討. 魚と卵, 158, 17-22.
- 19) 八木沢功・伊藤洋満（1994）自動給餌システムを用いたサケ飼育試験. 魚と卵, 163, 13-16.
- 20) 内藤一明・成田正直（2005）サケの給餌は月・水・金. 北海道栽培漁業振興公社, 育てる漁業, 3-7.
- 21) 日本鮭鱒資源保護協会（1967）第1回さけ・ます増殖研究協議会議事録, 23-30 pp.
- 22) LEITRITZ, E. (1959) Trout and salmon culture. *Calif. Dept. Fish and Game, Fish. Bull.* 107, 196 p.
- 23) WESTERS, H. and K. M. PRATT (1977) Rational design of hatcheries of intensive salmonid culture, based on metabolic characteristics. *Prog. Fish-Cult.*, 39, 157-165.
- 24) STICKNEY, R. R. (1991) Culture of salmonid fishes. CRC Press, Florida, 189 p.
- 25) 長沢有晃（1967）北海道におけるサケ稚魚の餌付け. 魚と卵, 123, 26-33.
- 26) 小林哲夫（1968）サケとカラフトマスの産卵環境. 北海道さけ・ますふ化場研究報告, 22, 7-13.

- 27) 真山 紘・関 二郎・清水幾太郎 (1983) 石狩川産サケの生態調査 - I. 1980年と1981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, **37**, 1-22.
- 28) 北海道さけ・ますふ化場 (1983) 昭和58年事業成績書, 30-31 pp.
- 29) 北海道さけ・ますふ化場 (1984) 昭和59年事業成績書, 30-31 pp.
- 30) 野川秀樹・八木沢功 (1994) サケ稚魚の適正な飼育環境. 北海道さけ・ますふ化場研究報告, **48**, 31-39.
- 31) 板沢靖雄 (1970) 呼吸. 魚類生理 (川本信之編). 恒星社恒星閣, 45-88 pp.
- 32) 野村 稔 (1980) 流水池の環境と魚類生産. 水産学シリーズ **32**. 淡水養魚と用水 (日本水産学会編), 恒星社恒星閣, 64-83 pp.
- 33) JONES D. R. (1971) The effect of hypoxia and anemia on the swimming performance of rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *J. Exp. Biol.*, **55**, 541-551.
- 34) HERRMANN, R. B., C. E. WARREN, and P. DOUDOROFF (1962) Influence of oxygen concentration on the growth of juvenile coho salmon. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **91**, 155-167.
- 35) 野村稔 (1969) 流水池の生産力と注水量, 密度効果との関係について. 全国湖沼河川養殖研究会第26回養鱒部会要録, 29-35.
- 36) BRETT, J. R. and J. M. BLACKBURN (1981) Oxygen requirements for growth of young coho (*Oncorhynchus kisutch*) and sockeye (*O. nerka*) salmon at 15°C. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **38**, 399-404.
- 37) DAVIS, J. C. (1975) Minimal dissolved oxygen requirements of aquatic life with emphasis on canadian species: a review. *J. Fish. Res. Board Can.*, **32**, 2295-2332.
- 38) LIAO, P. B. (1971) Water requirements of salmonids. *Prog. Fish-Cult.*, **33**, 10-215.
- 39) SMART, G. R. (1981) Aspects of water quality producing stress in intensive fish culture. in "Stress and fish" (ed. by PICKERING, A.D.) Academic Press, London, UK, 277-293 pp.
- 40) COLT, J. E. and J. R. TOMASSO (2001) Hatchery water supply and treatment. in "Fish Hatchery Management. 2nd Edition." (ed. by WEDEMEYER, G. A.) Am. Fish. Soc., Maryland, USA, 91-186 pp.
- 41) WEDEMEYER, G. A. (1996) Physiology of fish in intensive culture systems. Chapman & Hall, New York. 232 p.
- 42) BURROWS, R. E., and B. D. COMBS (1968) Controlled environments for salmon Propagation. *Prog. Fish-Cult.*, **30**, 123-136.
- 43) WILLOUGHBY, H. (1968) A method for calculating carrying capacities of hatchery troughs and ponds. *Prog. Fish-Cult.*, **30**, 173-174.
- 44) ELLIOTT, J. W. (1969) The oxygen requirements of chinook salmon. *Prog. Fish-Cult.*, **31**, 67-73.
- 45) BURROWS, R. E. (1964) Effects of accumulated excretory products on hatchery reared salmonids. *U.S. Fish Wildl. Serv. Res. Rep.*, **66**, 1-12.
- 46) BULLOCK, G. L. (1972) Studies on selected myxobacteria pathogenic for fishes and on bacterial gill disease in hatchery-reared salmonids. *U.S. Fish Wildl. Serv. Tech. Pap.*, **86**, 1-30.
- 47) 小栗幹郎 (1970) 排泄. 魚類生理 (川本信之編), 恒星社恒星閣, 167-177 pp.
- 48) PIPER, R., I. MCELWAIN, L. ORME, J. MCCRAREN, L. FOWLER, and J. LEONARD (1982) Fish Hatchery Management. U. S. Fish Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington DC, 517 p.
- 49) USEPA (1999) 1999 Update of Ambient Water Quality Criteria for Ammonia. EPA-823-R-99-014. USEPA, Washington DC, USA. 147 pp.
- 50) EMERSON, K. R., R. C. RUSSO, R. E. LUND, and R. V. THURSTON (1975) Aqueous ammonia equilibrium calculations: effect of pH and temperature. *J. Fish. Res. Board Can.*, **32**, 2379-2383.
- 51) ERICKSON, R. J. (1985) An evaluation of mathematical models for the effects of pH and temperature on ammonia toxicity to aquatic organisms. *Water Res.*, **19**, 1047-1058.
- 52) THURSTON, R. V., R. C. RUSSO, and K. EMERSON (1979) Aqueous ammonia equilibrium - tabulation of percent unionised ammonia. EPA. 6000/3-79-091. USEPA. DC, USA.
- 53) 加賀克昌 (1997) 溶存酸素を使用したシロザケ稚魚飼育環境の簡易モニター法について. 岩手県水産技術センター研究報告, **NO.1**, 59-64.
- 54) LARMOYEUX, J. D. and R. G. PIPER (1973) Effects of water reuse on rainbow trout in hatcheries. *Prog. Fish-Cult.*, **36**, 2-8.
- 55) SMART, G. (1976) The effect of ammonia exposure on gill structure of the rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *J. Fish Biol.*, **8**, 471-475.
- 56) THURSTON, R. V., R. C. RUSSO, and C. E. SMITH (1976) Acute toxicity of ammonia and nitrite to cutthroat trout fry. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **107**, 361-368.
- 57) THURSTON, R. V., R. C. RUSSO, R. J. LUEDTKE, C. E. SMITH, and E. L. MEYN (1984) Chronic toxicity of ammonia to rainbow trout. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **113**, 56-73.
- 58) DAOUST, P-Y. and H. W. FERGUSON (1984) The pathology of chronic ammonia toxicity in rainbow trout, *Salmo gairdneri*, Richardson. *J. Fish Dis.*, **7**, 199-205.
- 59) MEADE, J. W. (1985) Allowable ammonia for fish culture. *Prog. Fish-Cult.*, **47**, 135-145.
- 60) THURSTON, R. V., G. R. PHILLIPS, and R. C. RUSSO (1981) Increased toxicity of ammonia to rainbow trout (*Salmo gairdneri*) resulting from reduced concentrations of dissolved oxygen. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **38**, 983-988.
- 61) HAMPSON, B. L. (1976) Ammonia concentration in relation to ammonia toxicity during a rainbow trout rearing experiment in a closed freshwater-seawater system. *Aquaculture*, **9**, 61-70.
- 62) SMITH, C. E. and R. G. PIPER (1975) Lesions associated with chronic exposure to ammonia. in "The pathology of fishes" (ed. by W. E. RIBELIN, and G. MIGAKI) University of Wisconsin Press, Madison, 497-514 pp.
- 63) Alaska Department of Fish and Game (1983) Fish culture manual. Division of Fisheries Rehabilitation, Enhancement and Development, 90 p.
- 64) 栗倉輝彦 (1963) 産卵期における魚類の生理生態学的研究 (I) 週上サケ親魚の酸素消費量について. 北海道立水産孵化場研究報告, **18**, 1-9.
- 65) 佐々木 実・菊池省吾 (1982) 海中飼育シロザケの酸素消費量と温度の関係. 別枠研究さけ海中飼育放流 昭和56年度報告, 東北区水産研究所, 89-93.
- 66) 大渡 齊・山崎隆義 (1976) 適正収容量と飼育環境. 養鱒の研究, 緑書房, 20-30 pp.
- 67) 大渡 齊 (1982) ニジマス. 淡水養殖技術 (野村稔編), 恒

- 星社恒星閣, 268-291 pp.
- 68) WESTERS, H. (2001) Production. in "Fish Hatchery Management. 2nd Edition." (ed. by WEDEMEYER, G. A.) Am. Fish. Soc., Maryland, UAS, 31-89 pp.
- 69) 八重樫博文・佐々木正吾 (1992) サケ稚魚の成長に及ぼす飼育密度の影響. 魚と卵, **161**, 69-72.
- 70) 千歳事業場 (1985) さけ稚魚の飼育と調整放流. 魚と卵, **155**, 35-42.
- 71) 北海道さけ・ますふ化場 (1996) さけ・ますふ化事業実施マニュアル. 128 p.
- 72) 粟倉輝彦 (1975) 北海道におけるサケ科魚類の疾病とその対策研究の将来展望. 魚と水, **12**, 1-8.
- 73) 武田金太郎・野村 毅・原田 実・佐藤昭弘 (1969) 飼育さけ稚魚に付着したサイクロキータ. 魚と卵, **130**, 15-18.
- 74) 富岡啓二 (1982) 現場における調査考. 清部ふ化場用水の改善対策から. 魚と卵, **152**, 43-47.
- 75) 北海道さけ・ますふ化場 (1979) 昭和54年事業成績書. 228 p.
- 76) 野村哲一 (1980) 細菌性鰓病の簡易診断法. 魚と卵, **149**, 44-46.
- 77) 浦和茂彦 (1985) サケ・マスの寄生虫 (1) コスチア症について. 魚と卵, **155**, 43-48.
- 78) 若林久嗣 (1996) サケ科魚類および淡水魚の細菌病. 「魚病学概論」(室賀清邦, 江草周三編集), 恒星社恒星閣, 51-58 pp.
- 79) 平澤勝秋 (2009) 最適な飼育池環境を目指して. SALMON 情報, **3**, 14-15.
- 80) URAWA, S. (1996) The pathobiology of ectoparasitic protozoans on hatchery-reared Pacific salmon. *Sci. Rep. Hokkaido Salmon Hatchery*, **50**, 1-99.
- 81) 浦和茂彦 (2003) さけ・ます類に外部寄生する原虫類の病理と対策. さけ・ます資源管理センターニュース, **11**, 1-6.
- 82) 野村哲一 (2003) 虹別事業所におけるサケさいのう水腫症について. さけ・ます資源管理連絡会議配布資料, さけ・ます資源管理センター.
- 83) 川西一彦・長谷川敦子・福田穎穂 (1991) イワナ稚魚のいわゆる水腫症の原因に関する予報. 魚病研究, **26** (1), 21-28.
- 84) 石川孝典・生方秀典 (2009) ニッコウイワナ養殖技術実用化試験 塩水浴及びアスコルビン酸 (AsA) の高濃度投与による水腫症対策試験. 栃木県水産試験場研究報告, **52**, 67-68.
- 85) 戸叶 恒 (1985) 飼育池の清掃システム. 魚と卵, **155**, 52-57.
- 86) 田窪達彦・野本具視・八木沢功・和田有正 (1996) 水流噴射式の全自動飼育池清掃機の実用化試験. 魚と卵, **165**, 9-17.
- 87) さけ・ます資源管理センター (2002) 業務報告書, 54-55 pp.
- 88) さけ・ます資源管理センター (2005) 業務報告書, 138-140 pp.
- 89) 北海道さけ・ます増殖事業協会 (2006) さけ・ます増殖事業成績書 (平成9~16年度), 212 p.
- 90) 佐々木 実・小金澤昭光 (1985) シロサケ (*Oncorhynchus keta*) 稚魚の海中飼育による放流技術の開発. 日本水産資源保護協会, 漁政叢書, **15**, 71-82.
- 91) 菅野 尚 (1981) 本州太平洋沿岸のサケ増殖の現状. 別枠研究さけ・海中飼育放流. 昭和55年度報告. 東北区水産研究所, 141-149 pp.
- 92) 佐藤重勝 (1986) サケ-つくる漁業への挑戦-. 岩波新書, 96-133 pp.
- 93) 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. 東北区水産研究所, 35-46 pp.
- 94) 長谷川英一 (2009) 海中飼育施設を活用したサケ稚魚放流技術の高度化. 月刊養殖, **583**, 68-70.
- 95) NEAVE, F. (1955) Notes on the seaward migration of pink salmon fry. *J. Fish. Res. Board Can.*, **12**, 369-374.
- 96) HOAR, W. S., M. H. A. KEENLEYSIDE, and R. G. GOODALL (1957) Reaction of juvenile Pacific salmon to light. *J. Fish. Res. Board Can.*, **14**, 815-830.
- 97) HEARD, W. R. (1991) Life history of pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*). in "Pacific salmon life histories" (ed. by C. GROOT, and L. MARGOLIS), UBC. Press, Vancouver, 119-230 pp.
- 98) 中野 広・安藤義秀・白旗総一郎 (1985) サケ稚魚の浸透圧調節能力について. 北海道水産研究所研究報告, **50**, 87-92.