

総 説

サケ稚魚の適正な飼育環境

野川秀樹*¹・八木沢 功*²

*¹〒062 札幌市豊平区中の島2-2 水産庁北海道さけ・ますふ化場

*²〒066 北海道千歳市蘭越無番地 水産庁北海道さけ・ますふ化場千歳支場

Optimum Environmental Condition for Rearing Juvenile Chum Salmon (*Oncorhynchus keta*) : A Review

Hideki Nogawa*¹ and Isao Yagisawa*²

*¹Stock Management Section, Hokkaido Salmon Hatchery, Fisheries Agency of Japan,
2-2 Nakanoshima, Toyohira-ku, Sapporo 062, Japan

*²Chitose Branch, Hokkaido Salmon Hatchery, Fisheries Agency of Japan,
Mubanchi Rankoshi, Chitose, Hokkaido 066, Japan

Abstract.—Fish reared in intensive culture are usually affected by various stressors such as handling, crowding, chemical treatment, and unfavorable temperature and water chemistry. These environmental stress predispose fish to disease, and can result in reduced survival, growth, and food conversion. This paper deals with the affecting factors on the growth of intensively-reared juvenile chum salmon, especially dissolved oxygen, fish loading, rearing density and ammonia.

はじめに

北海道におけるサケ (*Oncorhynchus keta*) 資源の増大の要因の一つは、1960年代から開始された給餌放流による放流稚魚の大型化と放流時期の適正化による回帰率の向上によると考えられている (Kobayashi, 1980; Mayama, 1985; 梶山 1986; Kaeriyama and Urawa, 1992)。稚魚を大型化し適切な時期に放流するためには、一定期間稚魚を健康な状態で飼育する必要がある。しかし、飼育用水量や飼育面積に限られ、水量と飼育面積を最大限に活用した集約的な飼育が強いられていることから、過剰なストレスが加わり細菌性鰓病などの魚病が発生しやすくなっている。

集約的に飼育された魚は、環境の変化や飼育過程の中で魚の取扱い、飼育密度、運搬、薬物処理および水温変動、水質の変化などの影響を常に受けている。そして、これらのストレスは単一あるいは複合的に魚の恒常性機

構に大きな負荷となって作用し、適応能力を超えたストレスは魚を死に到らしめる。また、軽度なストレスであっても、成長の低下、病原体への感染およびストレスに対する防御能力の低下を招く場合がある (Wedemeyer et al., 1976; Wedemeyer and Mcleay, 1981)。

サケ稚魚の集約的な飼育においても、このような過度のストレスを飼育魚に与える危険性が常にある。また、給餌飼育されたサケ稚魚は、河川に放流され河川生活から海洋生活へと厳しい生理的变化を経験するため、海水適応をするための浸透圧調整機能が備わっている必要がある。このため、給餌飼育に当たっては、適正な環境下で飼育することが重要となる。魚の成長を制限する環境要因としては、水温、魚の収容量、注水量、水質 (溶存塩類の組成およびその濃度、pH、溶存ガスなど) があげられる (千葉 1970) が、本稿ではこれらの要因のうち、サケ稚魚の飼育時における溶存酸素量、魚の飼育量およびアンモニアについて、既往の知見を基に、著者らが事業規模での飼育試験で得たデータを補足しまとめた。

溶存酸素量

魚類が正常に摂餌、成長し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(板沢 1970), 一般的に, 健全臨界値は活動性の少ないコイやウナギなどでは2-3 ml/l (2.9-4.3 ppm) であるのに対し, 活動性の高いサケ・マス類では3.5-4.5 ml/l (5.0-6.4 ppm) とされている(野村 1980). Wedemeyer et al. (1976) はサケ科魚類など活動性の高い魚類は, 5 ppm以下で深刻なストレスを受けるとしている. Herrmann et al. (1962) はギンザケ (*O. kisutch*) で溶存酸素量が4-5 ppm以下で, 野村(1969) はニジマス (*O. mykiss*) で5.7 ppm以下で, Brett and Blackburn (1981) はギンザケ, ベニザケ (*O. nerka*) で5 ppm以下で, それぞれ成長や増重率, 餌料効率の低下を報告している. サケ・マス類がコイやウナギなどに比較して高い健全臨界値を示すのは, 常に遊泳している生息習性や運動習性への適応であり, 血液の酸素解離曲線の性状の違いによると考えられる(尾崎 1970). 血液の酸素解離曲線から得られる P_{50} は, 血液の酸素飽和度が50%に達するのに要する酸素分圧で, この値が低いほど血液の酸素親和性が大きくなるが, サケ・マス類はコイに比較して高く(板沢 1978; Heath, 1990), 酸素の利用率やヘモグロビンの酸素結合能力が低いことも知られている(Randall, 1970). このことは, 尾崎(1970)の指摘しているように, 酸素欠乏に曝されやすい環境に生息するコイと, 常に遊泳し良好な環境に生息するサケ・マス類の生態的適応の違いによると考えられる.

Westers and Pratt (1977) はサケ科魚類を集約的に飼育するふ化場では, 排水部の溶存酸素量は5-6 ppm以上あることが望ましいとしている. また, Davis (1975) は, 魚類の溶存酸素要求量について総説し, 魚類が溶存酸素量に対して示す反応から,

- レベルA: 集団の全ての個体の酸素要求量を満足させる理想的な状態の濃度
- レベルB: 酸素不足に対すストレスの兆候を示し始める濃度
- レベルC: 集団のほとんどの個体が低酸素による深刻な影響を受ける濃度

の3段階に区分した. この区分に従い, McLean et al. (1993) は海洋に放流する質の高いサケ科魚類のスモルトを生産するためには, レベルB以上の溶存酸素量を維持する必要があるとしている. Davis (1975) によれば, その濃度は淡水産サケ科魚類では6 ppmである.

1979年に北海道のふ化場(千歳事業場)の飼育池にお

いて, 排水部の溶存酸素量が給餌期間を通して6 ppm以上であったA池と, 逆に慢性的に排水部の溶存酸素量が6 ppm以下であったB池とでサケ稚魚の成長を比較したところ明らかな差が生じた(Fig. 1). B池では排水部の溶存酸素量が6 ppm以下となる頃より成長が低下し, 5 ppm以下では成長が低下した. 飼育期間中のA池とB池の瞬間成長係数は, それぞれ1.6, 0.5であった. このような事業規模での結果や上記のサケ・マス類に影響を及ぼす溶存酸素量を考えると, サケ稚魚の飼育では, 溶存酸素量を6 ppm以上に保つことが必要と考えられる.

また, 前記A池の排水部の溶存酸素量を連続的に観測した結果, 昼間に最も低くなり, 夜間には上昇するという日変化がみられ, また, 給餌や人の動きによっても溶存酸素量が低下する傾向がみられた(Fig. 2). Whitworth (1968) はカワマス (*Salvelinus fontinalis*) を用いて, 溶存酸素量に大きな日変化(10.6-5.3 ppm, 10.7-3.6 ppm, 10.7-3.5 ppm)がある場合と溶存酸素量が一定の場合(11 ppm)の成長を調べ, 溶存酸素量の日変化は成長の減少をもたらすことを報告している.

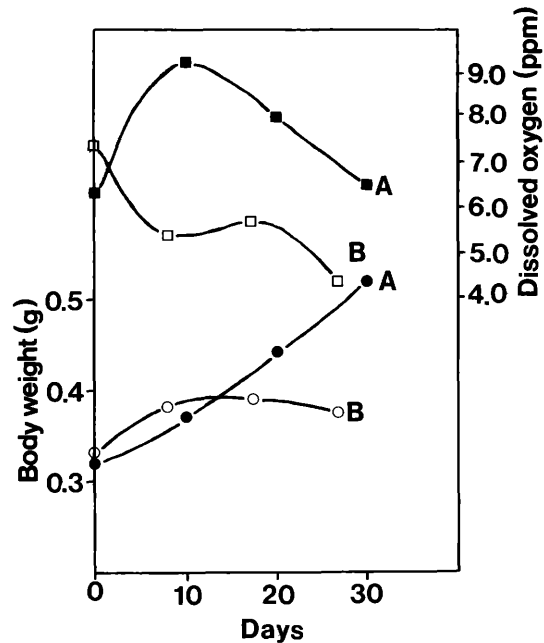


Fig. 1. Change in mean body weight of juvenile chum salmon (circles) and dissolved oxygen (squares) in pond A (closed symbols) and pond B (open symbols) at Chitose Hatchery, 1979.

図1 サケ稚魚の飼育池における成長と溶存酸素量の変化.

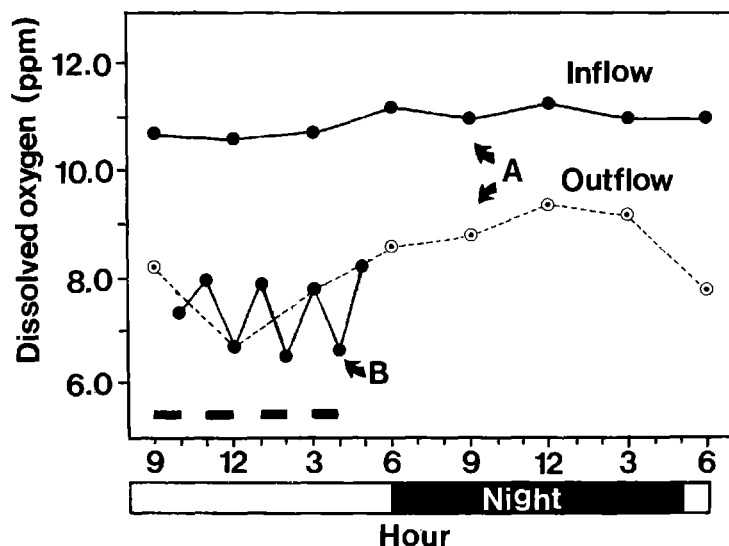


Fig. 2. Daily change of dissolved oxygen (A) and change of dissolved oxygen affected by feeding (B) in a pond. Black bars indicate feeding time.

図2 サケ稚魚の飼育池における溶存酸素量の日変化(A)と給餌による変化(B). 黒い横棒は給餌時間を示す。

適正飼育量

利用可能な用水量に対して、最高どの程度まで魚を飼育可能かを知ることは、用水の有効利用の面からも、養魚技術の面からも重要である。

適正飼育量は注水量中の利用可能な溶存酸素量を魚類の酸素消費量で除して求めることができる。魚が安静にしている状態での酸素消費量を標準代謝量、巡航遊泳速度における酸素消費量を活動代謝量と呼んでいる(板沢1970)。なお、遊泳速度と酸素消費量の関係から、遊泳速度が0の点に外挿することにより求められる値が基礎代謝量と呼ばれ、これは生命を維持して行く上で必要な最小限のエネルギー量である(能勢1985)。Brett(1964)はベニザケ幼魚(体長18cm, 体重50g)を用いて遊泳速度と酸素消費量の関係を詳細に調べ、その基礎代謝量は、0℃の水温水条件下で最小(39mg/kg/h)であり、15℃以降急激に増加し25℃では220mg/kg/hに達すると報告している。一方、活動代謝量は、5℃で514mg/kg/h、10℃で627mg/kg/hと水温の上昇とともに増加し、水温15℃(流速が体長の4.1倍/秒)で最大(895mg/kg/h)に達する。また、Puckett and Dill(1984)はベニザケ幼魚で瞬発遊泳時の酸素消費量は巡航遊泳速度における酸素消費量の40倍に達するとしている。このように、魚の酸素消費量は水温や遊泳状態などによって大きく変化し、食物

を摂取することによっても代謝量が増加することが知られている(能勢1985)。

サケ稚魚の標準代謝量については、栗倉(1963)が水温8.6-9.0℃で188ml/kg/h(=269mg/kg/h)としている(魚体重0.26g)。また、佐々木・菊池(1982)は海中飼育サケ稚魚の酸素消費量(Y)と水温(X)の関係を調べ、平均体重5g以下の稚魚では魚体重と酸素消費量の間(4.8-18.0℃)には有為な差が認められないことから、次のような関係式を求めている。

$$\log Y = 0.0433X + 1.9165 \dots \dots (1)$$

これから計算される酸素消費量は水温8-9℃で261.8-289.2mg/kg/hであり、栗倉(1963)とほぼ同程度の値である。塩分に適応しうる魚は海水中でも酸素消費量は正常値に戻りうるとみられることから(尾崎1970)、酸素消費量は海水、淡水においても同じ傾向を示すと推定される。(1)式から注水部の酸素量を飽和度95%、排水部の酸素量を6ppmとして水温別の注水量1ℓ/minあたりの飼育可能重量を求めると、水温5-10℃の範囲で0.8-1.8kgが飼育可能となる。しかし、これらは安静時の酸素消費量、すなわちほぼ基礎代謝量に近い値に基づく結果である。実際の飼育での飼育量を考える場合は、上述のように遊泳活動や餌の摂取により酸素消費量が大きくなることから、実際の飼育環境下における酸素消費量に基づいて飼育量を求める必要がある。

なお、飼育池の溶存酸素の収支は、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、池面からの拡散溶入、消費面では残餌やプランクトンの死骸などの有機堆積物を含む底土、および水表面からの拡散損失があるが、通常、清涼な水が多量に注水されている場合は、これらの供給量および消費量は無視できる(野村 1980)と考えられる。飼育量を求める際に、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、厳密には区別されずに使用されている場合も多い(大渡・山崎 1976; 大渡 1982; McLean et al., 1993)。しかし、実際の飼育環境下における酸素収支から計算された値を、酸素消費量と表現することは適切でないことから、本稿では酸素減少量と記した。

北海道のふ化場(釧路事業場)において、1,500-2,000千尾のサケ稚魚を収容している飼育池で、通常の飼育時間帯(午前10時)に注水部と排水部の溶存酸素量の差と幼稚魚の飼育重量、注水量から酸素減少量を求めたところ、酸素減少量は286-415 mg/kg/h(平均360 mg/kg/h)となった。

McLean et al. (1993) は事業規模で、サケ、ギンザケ、ベニザケおよびマスノスケ(*O. tshawytscha*)の酸素減少量を調べ(体重0.65-33.30 g)、酸素減少量の平均は245.5 mg/kg/hであり、最大酸素減少量は平均酸素減少量の 1.2048 ± 0.075 倍であったと報告している。更に、酸素減少量と魚体重、水温および給餌率の関係を応答曲面分析(Response surface analysis)により求めている。この関係式に釧路事業場における水温、給餌率および魚体重の平均値を入れて計算すると、平均酸素減少量は293.0 mg/kg/h、最大酸素減少量は353.0 mg/kg/hとなり、最大酸素減少量は、釧路事業場における酸素減少量の平均値(360 mg/kg/h)とはほぼ等しい値となった。酸素減少量のピークは給餌を開始した時間に認められることが知られており(Brett and Zala, 1975; Kindshi et al., 1991)、釧路事業場での測定時間が給餌を開始してから1時間後であることを考慮すると、McLean et al. (1993)の示した魚体重、水温および給餌率から計算される酸素減少量は、事業規模での酸素減少量を良く反映していると思われる。なお、給餌率2.4%、魚体重1 gとして注水量1 l/minあたりの適正な飼育量をMcLean et al. (1993)により計算すると、平均値から計算された収容量は水温5-10℃の時に0.8-1.3 kg/l/min、最大値から計算された収容量は0.7-1.0 kg/l/minとなった(Table 1)。

北海道においてサケ稚魚の飼育に使用されている用水の平均水温は約7.5℃であるが、この水温における適正な飼育量は0.9-1.0 kg/l/minとなり(Table 1)、実際の飼

育では、最大で1.0 kg/l/minを目安とすることが望ましいと考えられる。北海道さけ・ますふ化場では、事業規模での基準として1.0 kg/l/minを用いているが、これは上述の結果を考慮するとほぼ妥当な基準であると考えられる。

飼育密度

飼育密度は、魚の成長に影響を及ぼし(Refstie, 1977; Papoutsoglou et al., 1987)、過度の飼育密度は生理的な面(Fagerlund et al., 1981; Patiño et al., 1986)や回帰率(Martin and Wertheimer, 1989)などに影響を及ぼすことが知られており、健康な魚を生産する上で重要な要素の一つである。『飼育密度』は飼育池の容積と魚の飼育量との関係であり、注水量に対する『飼育量』とは異なる。注水量が十分供給されていても、ある密度(極限量)以上に魚を飼育すると、摂餌率、成長量、餌料効率が低下することが報告されている(野村 1980)、これは1尾の魚が占める生活空間の狭さに由来するストレスや摂餌行動の障害などに起因すると考えられている(野村 1980; Piper et al., 1982)。

飼育密度が魚類の成長や生残に及ぼす影響について、野村(1969)によればニジマス(平均体重20 g)を用い

表1 McLean et al. (1993)の応答曲面分析によるサケ稚魚の水温の違いによる酸素減少量および飼育量の試算。

Table 1. Oxygen reduction rates (R) calculated by Response Surface Analysis model of McLean et al. (1993) and fish loading (kg/l/min) of juvenile chum salmon (1 g weight) at various temperature. Max and safe levels of fish loading are calculated from Mean R and Max R, respectively. Ration, 2.4 % fish weight/day; dissolved oxygen, 95 % saturation in inflow and 6 ppm in outflow.

Temperature (°C)	R(mg/kg/h)		Fish loading (kg/l/min)	
	Mean	Max*	Max	Safe level
5.0	273.7	329.8	1.3	1.0
5.5	275.7	332.1	1.2	1.0
6.0	278.0	335.0	1.2	1.0
6.5	280.8	338.4	1.1	0.9
7.0	284.1	342.3	1.1	0.9
7.5	287.9	346.9	1.0	0.9
8.0	292.2	352.1	1.0	0.8
8.5	297.1	357.9	1.0	0.8
9.0	302.6	364.5	0.9	0.8
9.5	308.7	371.9	0.9	0.7
10.0	305.4	380.0	0.8	0.7

* Max R = Mean R \times 1.2048.

た飼育試験で、26.8 kg/m³までは成長率、餌料効率、摂餌率の低下はみられないが、34.4 kg/m³以上で低下を観察している。同様にニジマス（体長 10-13 cm）を用いた試験で、Wedemeyer (1976) は16.7 kg/m³以上の密度で平常の摂餌行動に変化はみられないものの生理的なストレスを受けると報じている。また、1 gサイズのニジマスを用いた試験では飼育密度48.9 kg/m³で、歩留、餌料効率および増重率が最もよかったとしている（大渡・山崎 1976）。このように同じ魚種でも異なった値が報告されている。飼育極限量は魚のサイズが大きくなるほど高い値となることが知られているが（野村 1980; Piper et al., 1982）、大渡・山崎 (1976) の結果は試験魚の魚体重が小さいにもかかわらず、飼育極限量は逆に一番高い値となっている。このことは、単に生活空間の狭さに由来する影響の他に、高密度下における魚同士による相互関係（塚本 1989）および後述するように換水率などが影響していることも考えられ、飼育密度が成長などに及ぼす影響については、これらの要因も含めて検討する必要があると考えられる。

なお、Martin and Wertheimer (1989) はマスノスケを12ヵ月間飼育した結果、放流時の飼育密度が小型のスマルト（平均体重10 g）では18.6 kg/m³以上で、大型のスマルト（平均体重30 g）では飼育密度20.3 kg/m³以上で、それ以下の密度に比較して生残率に差は認められないが、成長は悪く体重は有意に小さかったと報じている。Banks (1992) はギンザケを同様に12ヵ月飼育し、放流時（平均体重23-24 g）での飼育密度が13.4-14.8 kg/m³、27.0-32.0 kg/m³、37.2-46.1 kg/m³の3群を比較すると、放流時における平均体重は飼育密度が最も小さい群が僅かに小さかったが、放流後の生残率は逆に他の2群に比較して高かったとしている。

サケ稚魚の飼育密度について、北海道のふ化場における様々な飼育密度での飼育結果では、約30 kg/m³（魚体重0.8-1.0 g）以上の飼育密度の時に胸鰭の欠損が多数観察された。飼育密度と鰭の欠損の関係に触れた研究は少なく、知る限りでは僅かにWedemeyer (1976) およびSchneider and Nicholson (1980) により高密度による影響の可能性が指摘されているに過ぎない。

Piper et al. (1982) は飼育池の容積と魚の飼育量および体長の関係を密度指数（density index, pounds/cubic foot/fish length in inches）として表現し、サケ・マス類では0.5が望ましいとしている。これからサケ稚魚の飼育サイズである体長5-7 cm（魚体重1-3 g）の飼育密度を計算すると16.0-23.2 kg/m³となる。

一方、Westers (1970) およびWesters and Pratt

表2 サケ稚魚の飼育池の換水率の違いによる飼育密度（適正飼育量は1 kg/ℓ/minとした）。

Table 2. Optimum rearing densities of juvenile chum salmon calculated by Westers and Pratt (1977) at various water exchange rates in pond. Fish loading is 1 kg/ℓ/min.

Water exchange rate	Rearing density(kg/m ³)
1.0	16.7
1.2	20.0
1.4	23.3
1.6	26.6
1.8	30.0
2.0	33.3

(1977) は飼育密度には換水率も密接に関係しており、換水率が高いほど飼育に必要な容積は少なくなり、一時間あたりの換水率 (R) と飼育密度 (D) の関係を次式で示している。

$$D(\text{kg/m}^3) = R/0.06 (\text{kg/ℓ/min}) \dots\dots\dots (2)$$

Westers (1970) は1時間当たり1回以上の換水が望ましいとしていることから、換水率を1以上、前述の適正飼育量から飼育量を1 kg/ℓ/minとして、換水率 (R) の違いによる飼育密度 (kg/m³) を (2) 式から求めTable 2に示した。

1993年に北海道における国立の29ふ化場の換水率の実態を調査したところ、換水率が1以下と低いふ化場が3カ所、一方1.5以上と高いふ化場が4カ所あったが、全体の3/4にあたる22ふ化場が換水率1.0-1.5であった。この換水率1.0-1.5から(2)式により計算される飼育密度は16.7-25.0 kg/m³である。Piper et al (1982) の密度指数やWesters and Pratt (1977) の換水率から計算される飼育密度はほぼ同程度の数値となった。北海道さけ・ますふ化場では、20 kg/m³をサケ稚魚の飼育における一応の基準として使用しているが、これは上述の値のほぼ中間値であり、ふ化場における用水の使用実態を考慮するとほぼ妥当な基準であると考えられる。

アンモニア

アンモニアおよび尿素は、魚類の窒素代謝の最終生産物であり (Burrows, 1964; 小栗 1970; Brett and Zala, 1975; Piper et al., 1982)、鰓や尿から排泄され、尿素も水中で分解されアンモニアとなる (Fig. 3)。これらのアンモニアは魚類に対して毒性を持ちアンモニアのうち粘膜上皮細胞を容易に透過できる非解離のアンモニア (NH₃) の毒性が高いことが知られている (Burrows, 1964; 板沢1970; Wedemeyer et al., 1976; Smart, 1981;

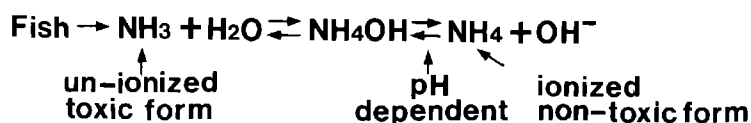


Fig. 3. Reaction of ammonia excreted into water by fish.

図3 水中におけるアンモニアの状態.

Piper et al., 1982). 水中における非解離アンモニアの割合は、水温、pHが高いほど増加することが知られており (Trussell, 1972; Emerson et al., 1975), 水中のpHが高いほど血中に入るアンモニア量が多くなる (杉浦・板沢 1971)*. また、アンモニアの毒性は、溶存酸素量が低い時には増加することも報告されており (Downing and Merkens, 1955; Thurston et al., 1981; Morrison and Piper, 1988), 白旗 (1964) はニジマスで0.5 ppm程度のアンモニア態窒素が存在しても、溶存酸素が十分あれば血球抵抗値の低下は認めらず、生理的な影響は受けないとしている。また、Larmoyeux and Piper (1973) もニジマスで溶存酸素が5.0 ppm以下になると、アンモニア態窒素が0.5 ppm程度の濃度でも成長の低下や鰓の損傷を招くが、溶存酸素が7.0 ppm以上あれば、アンモニア態窒素が0.8-1.0 ppmあっても成長は低下しないとしている。溶存酸素が少ない場合にアンモニアの毒性が増すというメカニズムは、酸素が減ると鰓から排泄されるCO₂も減少し、その結果、鰓の表面と接触している水のpHが上昇し、非解離アンモニアの割合が増すためと説明されている (Lloyd and Herbert, 1960; Wedemeyer et al., 1976).

Smart (1976) はニジマス (体重35-85 g) を非解離のアンモニア0.25-0.30 ppmに2週間浸漬したところ、鰓上皮の異常増殖と出血がみられたと報告している。Thurston et al. (1978) はカットスロート・トラウト (*O. clarkii*) を0.34 ppmの非解離アンモニア濃度で29日間飼育し (体重1-3 g), 鰓、腎臓、肝臓の変性をみている。このように、アンモニアは濃度や暴露時間にもよるが、鰓上皮の異常増殖や腎臓、肝臓の変性などの生理的な変化をもたらすことが知られている。

アンモニアの安全濃度について、Smith and Piper (1975) は、ニジマスを12ヵ月間飼育した結果から非解離アンモニアの最高安全濃度は0.0125 ppmとしている。Buckley (1978) はギンザケ (平均体重6 g) での、非解

離アンモニア96h LD₅₀濃度0.45 ppmから、安全な非解離アンモニアの濃度は0.023 ppmと推定している。また、Wedemeyer et al. (1976) は、0.02 ppm以下の非解離アンモニアが健康な魚を生産する上で望ましく、サケ科魚類では0.005 ppm以下がより望ましいとしている。しかしながら、Burrows (1964) はマスノスケの幼魚を用いた試験で、非解離のアンモニア濃度0.003 ppm (水温6.1°C, pH 7.8, アンモニア態窒素で0.3 ppm) の低濃度でも、6週間連続暴露されると鰓上皮の異常増殖を招くとしている。また、Westers and Pratt (1977) も同様の指摘をしている。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 (1975) の示した非解離アンモニア濃度0.0125 ppmが最高安全濃度として、多くの文献に引用されている (Westers and Pratt, 1977; 野村 1980; Piper et al., 1982; Alaska Department of Fish and Game, 1983; Banks, 1992 など)。

1981年に北海道のふ化場で実際の飼育環境下でアンモニア態窒素を測定したところ、その濃度は0.3 ppmを上回ることはなかったが、飼育量が増加するとアンモニア態窒素が増加する傾向が認められた (Fig. 4)。なお、飼育量 (L, kg/ℓ/min) とアンモニア態窒素 (N, ppm) の間には、次のような関係式が認められた。

$$N = 0.1806L - 0.0209 \dots \dots (3)$$

$$(r = 0.8401)$$

前述の適正飼育量から、飼育量をℓ/min当たり1 kgとして(3)式から計算すると、アンモニア態窒素は0.160 ppmとなり、水温7.0-8.0°C, pH 7.2としてTrussell (1972) により非解離のアンモニアを計算すると0.0004 ppmとなる。これはSmith and Piper (1975) の示した非解離アンモニア濃度0.0125 ppmの1/30以下の濃度であり、また、Wedemeyer et al. (1976) がサケ科魚類にとって望ましいとした0.005 ppmの1/10以下の値である。このことから、サケ稚魚の飼育に当たっては、少なくとも現状では、アンモニアについては問題となる濃度にはならないと思われる。

しかし、前述したように低濃度でも長期間暴露されると影響がでること、また、溶存酸素が少ない場合に毒性

* 杉浦正悟・板沢靖雄 (1971): 水中のアンモニアに対する毒作用機構-V. アンモニアの透入に対する環境水pH値の影響(予報). 日本水産学会春季大会講演要旨, p. 10.

が増加することなどが指摘されているが、サケ稚魚に及ぼすアンモニアの影響については今だ十分に解明されていないことから、これらの関係の解明は重要な課題である。

まとめ

サケ稚魚の集約的な飼育条件下において、できるだけ環境に起因するストレスを排除し、健康な放流種苗を生産するには、成長などに影響を及ぼす飼育密度や水質などの制限要因を明らかにすることが重要となる。本稿ではこれらの制限要因について、サケ科魚類に関する種々の報告や北海道における事業規模での飼育試験結果に基づいて考察した。サケ稚魚の飼育にあたっては、次のことを基本に実施することが望ましいと思われる。

1. 用水中の溶存酸素量を常に6.0 ppm以上に保つ。
2. 注水量1 ℓ/minあたりの最大飼育量は1 kg程度を限度とする。
3. 飼育密度については、最大20 kg/m²とする。

謝辞

本稿のとりまとめの機会を与えられた北海道さけ・ますふ化場広井修調査課長および薫田道雄事業管理課長に謝意を表すると共に、校閲の労と種々有益な助言を頂いた下村政雄場長、真山 紘博士および浦和茂彦博士に深謝いたします。なお、大熊一正氏には貴重な文献の提供を頂いた。また、資料収集に協力頂いた北海道さけ・ますふ化場の千歳事業場、釧路事業場の関係各位に感謝いたします。

引用文献

- Alaska Department of Fish and Game (1983): Fish culture manual. Division of Fisheries Rehabilitation, Enhancement and Development. 90 p.
- 栗倉輝彦(1963): 産卵期における魚類の生理生態学的研究 (I) 遡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.
- Banks, J. L. (1992): Effects of density and loading on coho salmon during hatchery rearing and after release. *Prog. Fish-Cult.*, **54**, 137-147.
- Brett, J. L. (1964): The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. *J. Fish. Res. Board Can.*, **21**, 1183-1226.
- Brett, J. R., and C. A. Zala (1975): Daily pattern of nitrogen excretion and oxygen consumption of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) under controlled condi-

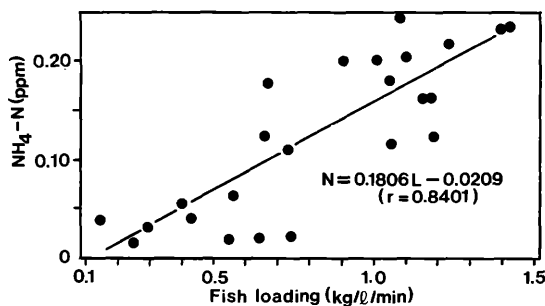


Fig. 4. Relation between loading (kg/ℓ/min) of juvenile chum salmon and total ammonia concentration in a rearing pond. Number of juveniles, about 4.5 million; Water in flow, about 2,000-4,000 ℓ/min; Ration, 1.8-2.4% weight/day; exchange of water per hour, about 2 times; pond size, 5.4 m×30 m; pond depth, 0.37 m; water temperature, 7.0-8.0°C; pH, 7.2.

図4 サケ稚魚の飼育池における飼育量 (kg/ℓ/min) とアンモニア態窒素 (NH₄-N) の関係。飼育尾数、約4,500,000尾; 注水量、2,000-4,000 ℓ/分; 給餌率、1.8-2.4%; 換水率、約2回/時間; 飼育池、5.4 m×30 m; 平均水深、0.37 m; 水温、7.0-8.0°C; pH、7.2。

- tions. *J. Fish. Res. Board Can.*, **32**, 2479-2486.
- 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.
- Buckley, J. A. (1978): Acute toxicity of un-ionized ammonia to fingerling coho salmon. *Prog. Fish-Cult.*, **40**, 30-32.
- Burrows, R. E. (1964): Effects of accumulated excretory products on hatchery-reared salmonids. *U.S. Fish and Wildlife Service, Research Report*, **66**, 1-12.
- 千葉健治(1970): II. 魚類の生長に関する諸要因. II-1. 流水養鯉池における環境とコイの生長。日水試, **36**, 297-303.
- 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.
- Downing, K. M., and J. C. Merckens (1955): The influence of dissolved-oxygen concentration on the toxicity of un-ionized ammonia to rainbow trout (*Salmo gairdnerii* Richardson). *Ann. appl. Biol.*, **43**, 243-246.
- Emerson, K., 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.
- Fagerlund, U. H. M., J. R. McBride, and E. T. Stone (1981): Stress-related effects on hatchery rearing density on coho salmon. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **110**, 644-649.
- Heath, A. G. (1990): Water pollution and fish physiology. CRC Press, Boston. 245 p.
- 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.
- 板沢靖雄 (1970): 呼吸. 魚類生理(川本信之編), 恒星社 恒星閣. pp. 45-88.
- 板沢靖雄 (1978): 呼吸の生理. 水産学シリーズ 24. 魚の呼吸と循環 (日本水産学会編), 恒星社 恒星閣. pp. 20-36.
- 梶山雅秀 (1986): サケ *Oncorhynchus keta* (Walbaum) の初期生活史に関する生態学的研究. さけ・ますふ研報, (40), 31-92.
- Kaeriyama, M., and S. Urawa (1992): Future research by the Hokkaido Salmon Hatchery for the proper maintenance of Japanese salmonid stocks. In Proceeding of International Workshop on Future Salmon Research in the North Pacific Ocean (edited by Y. Ishida, K. Nagasawa, D. W. Welch, K. W. Myers, and A. P. Shershnev). National Research Institute of Far Sea Fisheries, Shimizu, Japan. pp. 57-62.
- Kindshi, R. A., C. E. Smith, and R. F. Koby, Jr. (1991): Oxygen consumption of two strains of rainbow trout reared at four densities with supplemental oxygen. *Prog. Fish-Cult.*, **53**, 210-215.
- Kobayashi, T. (1980): Salmon propagation in Japan. In Salmon ranching (edited by J. E. Thorpe). Academic Press, London. pp. 91-107.
- 小栗幹郎 (1970): 排泄. 魚類生理(川本信之編), 恒星社 恒星閣. pp. 167-177.
- Larmoyeux, J. D., and R. G. Piper (1973): Effects of water reuse on rainbow trout in hatcheries. *Prog. Fish-Cult.*, **35**, 2-8.
- Lloyd, R., and D. W. M. Herbert (1960): The influence of carbon dioxide on the toxicity of un-ionized ammonia to rainbow trout (*Salmo gairdneri* Richardson). *Ann. app. Biol.*, **48**, 399-404.
- Martin, R. M., and A. Wertheimer (1989): Adult production of chinook salmon reared at different densities and released as two smolt sizes. *Prog. Fish-Cult.*, **51**, 194-200.
- Mayama, H. (1985): Technical innovations in chum salmon enhancement with special reference to fry condition and timing of release. In Proceeding of the Eleventh U.S.-Japan Meeting on Aquaculture, Salmon Enhancement, Tokyo, Japan, October 19-20, 1982. *NOAA Tech. Rep. NMFS*, **27**, 83-86.
- McLean, W. E., J. O. T. Jensen, and D. F. Alderdice (1993): Oxygen consumption rates and water flow requirements of Pacific salmon (*Oncorhynchus* spp.) in the fish culture environment. *Aquaculture*, **109**, 281-313.
- Morrison, J. K., and R. G. Piper (1988): Effect of reused water on Atlantic salmon. *Prog. Fish-Cult.*, **50**, 110-112.
- 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回養殖部会要録, 29-35.
- 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. pp. 64-83.
- 能勢健嗣 (1985): 魚類のエネルギー代謝. 魚類の栄養と餌料 (萩野珍吉編), 恒星社 恒星閣. pp. 61-80.
- 大渡 斉・山崎隆義 (1976): 適正収容量と飼育環境. 養鱒の研究, 緑書房. pp. 20-30.
- 大渡 斉 (1982): 4.1.10 ニジマス. 淡水養殖技術 (野村稔編), 恒星社 恒星閣. pp. 268-291.
- 尾崎久雄 (1970): 呼吸の生理 III. 魚類生理学講座第2巻. 緑書房. pp. 101-309.
- Papoutsoglou, S. E., E. Papaparaskeva-Papoutsoglou, and M. N. Alexis (1987): Effect of density on growth rate and production of rainbow trout (*Salmo gairdneri* Rich.) over a full rearing period. *Aquaculture*, **66**, 9-17.
- Patino, R., C. B. Schreck, J. L. Banks, and W. S. Zaugg (1986): Effects of rearing conditions on the developmental physiology of smolting coho salmon. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **115**, 828-837.
- Piper, R. G., I. B. McElwain, L. E. Orme, J. P. McCraren, L. G. Fowler, and J. R. Leonard (1982): Fish hatchery management. U.S. Fish and Wildlife Service, Washington, D.C. pp. 1-517.
- Puket, K. J., and L. M. Dill (1984): Cost of sustained and burst swimming to juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *Trans. Am. Fish. Soc.*, **113**, 101-107.

- rhynchus nerka*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **41**, 1546-1551.
- Randall, D. J. (1970): Gas exchange in fish. *In* Fish Physiology, Vol. 4 (edited by W. S. Hoar, and D. J. Randall). Academic Press, London. pp. 253-292.
- Refstie, T. (1977): Effect of density on growth and survival of rainbow trout. *Aquaculture*, **11**, 329-334.
- 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との関係. 別枠研究さけ・海中飼育放流昭和56年度報告, 東北水研. pp. 89-93.
- Schneider, R., and B. L. Nicholson (1980): Bacteria associated with fin rot disease in hatchery-reared Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **37**, 1505-1513.
- 白旗総一郎 (1964): 食用マス生産における水質の問題. 長崎大学水産学部研究報告, (17), 68-82.
- Smart, G. (1976): The effect of ammonia exposure on gill structure of the rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *J. Fish Biol.*, **8**, 471-475.
- Smart, G. (1981): Aspects of water quality producing stress in intensive fish culture. *In* Stress and Fish (edited by A. D. Pickering). Academic Press, London. pp. 277-292.
- Smith, C. E., and R. G. Piper (1975): Lesions associated with chronic exposure to ammonia. *In* The Pathology of Fishes (edited by W. E. Ribelin, and G. Migaki). Univ. Wisconsin Press, Madison. pp. 497-514.
- Thurston, R. V., R. C. Russo, and C. E. Smith (1978): Acute toxicity of ammonia and nitrite to cutthroat trout fry. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **107**, 361-368.
- Thurston, R. V., G. R. Phillips, R. C. Russo, and S. M. Hinkins (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.
- Trussell, R. P. (1972): The percent un-ionized ammonia in aqueous ammonia solutions at different pH levels and temperatures. *J. Fish. Res. Board Can.*, **29**, 1505-1507.
- 塚本勝巳 (1989): 仔稚魚の成長. 水産養殖学講座 4. 水族繁殖学(隆島史夫・羽生 功編), 緑書房. pp. 239-289.
- Wedemeyer, G. A. (1976): Physiological response of juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) and rainbow trout (*Salmo gairdneri*) to handling and crowding stress in intensive fish culture. *J. Fish. Res. Board Can.*, **33**, 2699-2702.
- Wedemeyer, G. A., and D. J. Mcleay (1981): Methods for determining the tolerance of fishes to environmental stressors. *In* Stress and Fish (edited by A. D. Pickering). Academic Press, London. pp. 247-275.
- Wedemeyer, G. A., F. P. Meyer, and L. Smith (1976): Environmental stress and fish diseases, Book 5. *In* Diseases of Fishes (edited by S. F. Snieszko, and H. R. Axelrod). T. F. H. Publ., New Jersey. pp. 1-192.
- Westers, H. (1970): Carrying capacity of salmonid hatcheries. *Prog. Fish-Cult.*, **32**, 43-46.
- Westers, H., and K. M. Pratt (1977): Rational design of hatcheries for intensive salmonid culture, based on metabolic characteristics. *Prog. Fish-Cult.*, **39**, 157-165.
- Whitworth, W. R. (1968): Effects of diurnal fluctuations of dissolved oxygen on the growth of brook trout. *J. Fish. Res. Board Can.*, **25**, 579-584.