

飼育密度と溶存酸素濃度および注水量が サケ稚魚の生理状態，特に海水適応能に与える影響

伴 真俊

062-0922 北海道札幌市豊平区中の島2-2 さけ・ます資源管理センター調査課

キーワード: サケ, 海水適応能, 飼育密度, 溶存酸素濃度, 注水量

はじめに

多くのサケ科魚類は，海洋生活への移行に先だって海水適応能を高める．海水適応能を獲得した魚は，直接海水へ投入されても血中のイオン濃度を短時間で淡水中の値に近づけ，恒常性を維持することができるので死ぬことはない．サケ (*Oncorhynchus keta*) の場合，浮上した時点で既に高い海水適応能を獲得しており (中野ら1985; 伴ら1995)，その能力は淡水飼育を継続した場合でも維持されることが分かっている (Hasegawa et al. 1987)．

このような生態的特徴を示すサケの日本における沿岸来遊数は，1970年代以降急増し，近年では4千万尾を超える回帰が得られるようになった．本邦系サケ資源が増大した要因の一つとして，放流種苗を給餌飼育して大型化させたことがあげられる (Kaeriyama and Urawa 1992)．しかし，飼育用水量と飼育施設に限られたなかでの集約的な給餌飼育は，時として環境の悪化をまねき，魚の正常な生理機能を阻害する恐れがあるので (Patino et al. 1986; Papoutsoglou et al. 1987)，その影響を把握しておくことは健苗を育成するうえで重要である．これまでに，飼育環境要因が種苗に与える影響は，給餌量と成長，あるいは給餌量と海水適応能の関係について調べられている (橋本1966; 伴ら1995)．今回は，飼育密度と溶存酸素濃度および注水量の違いが，サケ稚魚の生理状態，特に海水適応能に与える影響を調べた．

材料と方法

実験魚と飼育環境 1994年4月29日に平均尾叉長が53.1 mmの千歳川産サケ稚魚を6群 (A-F群)に分け，飼育密度と注水量を変えた実験水槽で5月8日まで飼育した．実験水槽は縦43.5 cm，横24.0 cm，水深10.0 cm，容積10 lに設定し，飼育用水として水温が10.2℃，溶存酸素濃度 (DO) が10.9 mg/lの地下水を用いた．飼育密度は5 kg/m³，15 kg/m³，45 kg/m³，注水量は0.4 l/min，5.0 l/min

に設定した。それらの組み合わせと、各水槽の排水部 DO を表1にまとめた。餌として、配合飼料を1日体重当たり2.5%の割合で与えた。また、DOの計測にはDOメーター（Model 58, イエロースプリング社）を使用した。

採集方法 実験開始時の4月29日と終了時の5月8日に、各実験群から無作為に抽出した20個体を麻酔した後、尾叉長（mm）の測定と尾柄部からの採血を行った。採血した血液のうち10個体分は、直ちに平均赤血球ヘモグロビン量（MCH）の分析に供した。残り10個体分の血液は、12,000回転で5分間遠心分離して血清を得た後、血中ナトリウム濃度分析までの間、-40 で凍結保存した。また、同じ個体から鰓を切り出して保存液（250 mM Sucrose, 6 mM EDTA-2Na, 20 mM imidazole）に浸け、 Na^+, K^+ -ATPase 活性分析までの間、-40 で凍結保存した。実験期間中の各水槽における死亡個体数を累積し、死亡率（%）= 総死亡個体数 / 実験開始時の個体数 \times 100 を算出した。

海水移行試験 実験開始時と終了時に、各実験群から無作為に抽出した30個体を、塩分濃度33の海水に投入した。海水移行24時間後まで生き残った個体を用いて、生残率（%）= 生残個体数 \times 100 / 30 を算出するとともに、血清を前述の方法で得た後、血中ナトリウム濃度分析までの間、-40 で凍結保存した。

MCH, 血中ナトリウム濃度および鰓の Na^+, K^+ -ATPase 活性の分析 MCH (10^{-9} mg) は、採血した血液の赤血球数（RBC; $10^3/\text{mm}^3$ ）を Coulter Counter (Model ZF, Coulter Electronics Co.) で測定し、ヘモグロビン濃度（Hb; g/100 ml）をシアンメトヘモグロビン法（ヘモグロビン-テストワコー, 和光純薬）で分析した後、 $\text{MCH} = \text{Hb} \times 10^7 / \text{RBC}$ として算出した。血中ナトリウム濃度（mEq/l）は、血清を溶解し、蒸留水で1,000倍に希釈した後、原子吸光光度計（Shimadzu, AA-640-13）で分析した。鰓の Na^+, K^+ -ATPase 活性（ $\mu\text{mols Pi}/\text{mg pro.}/\text{h}$ ）は、Ban and Yamauchi (1991) の方法で分析した。

統計処理 実験群間における分析値の有意差は、t-検定を用いて検討した。

結果と考察

飼育環境が魚の成長に与える影響 排水部の DO は C 群が最も低い 5.8 mg/l を示したが、それ以外の群では 7.4-10.2 mg/l の範囲だった（表1）。実験期間中の成長は C 群が最も悪く、その平均尾叉長は、成長の良かった A 群および D 群に比べて有意に ($p < 0.05$) 小さかった。MCH は C 群が他の群に比べて有意 ($p < 0.01$) に上昇した。実験期間中の死亡率は C 群が最も高く、12%に達した。

健全なサケ稚魚を育成するための適正な飼育環境として、排水部の DO は

6.0 mg/l 以上、飼育密度は20 kg/m³以下が望ましいとされている(野川・八木沢1994)。これらの基準を何れも下回る環境で飼育された C 群は、他の群に比べて成長が悪く、死亡率も高かった。今回の実験では、給餌率を統一したにもかかわらず高密度で飼育された C 群の成長が悪かったことから、サケ稚魚の成長は単に餌の量だけでなく、1個体が利用可能な生息空間の影響も受けると考えられる。また、一般的に高密度飼育された魚はストレスを受け、餌量効率の低下や摂餌行動障害を起こすので(野村1980; Piper et al. 1982)、C 群においても同様の現象が生じていたことが予想される。さらに、C 群では MCH が上昇していたことから、赤血球1個当たりのヘモグロビン量を増して酸素供給能力を高めることで、低酸素環境に対処したものと思われる。この現象が、C 群と同じ密度で飼育された F 群には認められなかったことから、MCH の上昇は飼育用水の溶存酸素不足が魚に与える一つの生理的な影響といえる。酸素供給能力の低下は、種々の生理機能障害を派生させる危険性も指摘されていることから(川津1980)、高い飼育密度と溶存酸素不足はサケ稚魚に生理的、生態的影響を与え、結果として成長の低下や死亡率の増大をまねく可能性が示唆された。

飼育環境が海水適応能に与える影響 鰓の Na⁺,K⁺-ATPase 活性は、実験開始時(I.C.)の値と、D 群、E 群および F 群の値が12.2-13.4 μmols Pi/mg pro./h の範囲になり、有意差は認められなかった(図1; a)。しかし、A 群、B 群および C 群の値は各々9.8, 8.2, 4.5 μmols Pi/mg pro./h まで低下し、I.C.の値との間に有意差(p<0.05)が認められた。海水移行24時間後の生残率は、I.C.と D 群および E 群が100%だったのに対して、F 群と A 群が各々80%と20%、B 群と C 群は0%となった(図1; b)。海水移行24時間後の血中ナトリウム濃度は、I.C.と D 群および E 群の値が160.3-168.3 mEq/l の範囲内に収まった(図1; c)。しかし、A 群と F 群は有意(p<0.05)な上昇を示し、各々178.5 mEq/l、181.8 mEq/l に達した。B 群と C 群は全個体が死亡したため値を得られなかった。

このように、注水量が少なかった A 群、B 群および C 群の海水適応能は、明らかに D 群、E 群および F 群に比べて劣っていた。その傾向は、排水部の DO が低い群ほど顕著であった。これは、海水中で浸透圧調節の働きをする鰓の Na⁺,K⁺-ATPase 活性の低下と、それともなう血中ナトリウム濃度の増加に起因すると考えられる。環境水中の低酸素は、鰓を含めた様々な器官の代謝活性に影響を与えることから(Davis 1975)、サケ稚魚で観察された海水適応能の低下も溶存酸素不足が一因となった可能性がある。また、ニジマスでは、高密度で飼育された群の鰓の Na⁺,K⁺-ATPase 活性が、低密度群に比べて有意に低下する(Klontz et al. 1985)。今回の実験でも、C 群における

表1. 飼育密度 (kg/m³) と注水量 (l/min) を変えて飼育した A-F 群における、尾又長 (mm), 平均赤血球ヘモグロビン量 (MCH; 10⁻⁹ mg) および死亡率 (%) と、水槽の排水部溶存酸素濃度 (DO; mg/l) . *: 平均値 ± 標準誤差, a, b, c, d: 同じ文字を付した群間には有意差がないこと, 異なる文字を付した群間には有意差 (p<0.05) が認められたことを示す.

実験群	飼育密度	注水量	DO	尾又長	MCH	死亡率
A群	5.0	0.4	9.3	^b 58.4 ± 0.5 [*]	^d 39.8 ± 1.2 [*]	0.0
B群	15.0	0.4	7.4	56.6 ± 0.6	^d 36.9 ± 1.2	0.7
C群	45.0	0.4	5.8	^a 54.4 ± 0.8	^c 54.0 ± 2.9	12.0
D群	5.0	5.0	10.2	^b 57.5 ± 0.8	^d 38.9 ± 0.9	0.0
E群	15.0	5.0	10.2	56.9 ± 1.0	^d 38.1 ± 1.3	0.7
F群	45.0	5.0	9.7	56.7 ± 1.1	^d 38.4 ± 2.1	2.2

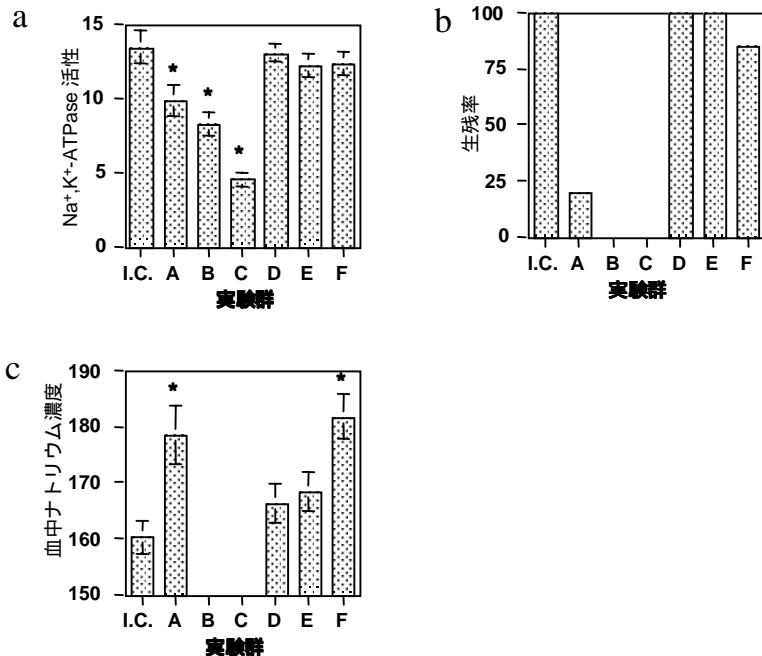


図1. 飼育密度と注水量を変えて飼育したA-F群における 鰓の Na⁺,K⁺-ATPase 活性 (µmol Pi/mg pro./h; a) と, 海水移行24時間後の生残率 (%; b) および血中ナトリウム濃度 (mEq/l; c) . I.C.: 実験開始時の対照群, *: I.C.と比較した際の有意差 (p<0.05) .

Na^+, K^+ -ATPase 活性の低下が最も顕著だったことから、注水量が少ない環境に低酸素条件と高密度条件が重なると、相乗効果としてその影響が増幅されると考えられる。

一方、F 群は鰻の Na^+, K^+ -ATPase 活性が低下しなかったにもかかわらず、D 群や E 群に比べて海水移行後の血中ナトリウム濃度が高く、生残率も低かった。このことは、F 群が高いナトリウム排泄機能を維持していたものの、鰻における何らかの物理的障害等により、実際には体内に流入するナトリウムを排泄できなかったことを示している。D 群、E 群および F 群の注水量は一定であり、排水部 DO もほぼ同一だったことから、F 群にのみ認められた海水適応能の低下は、高い飼育密度が原因と思われる。Klontz et al. (1985) は、高密度飼育されたニジマスの鰻で、上皮細胞が肥高したり分離する現象を報告している。F 群の鰻でも同様の現象が起こり、それがナトリウムの排泄を阻害したのかもしれない。今後、高密度飼育にともなう海水適応能の変化を、鰻の機能面だけでなく、構造や形態の側面からも調べておく必要がある。

飼育密度と DO がサケ稚魚の海水適応能に与える影響は、これまでも調べられた例がある（北海道さけ・ますふ化場，1989; 1990; 1991）。それによると、海水移行後の生残率から判断された海水適応能は、多くの場合、飼育密度や DO の影響を受けていない。これらの実験と今回の実験では、設定された飼育環境条件に大きな違いはないものの、実験水槽が大型で水深が深く、それにとまなう注水量が多い点等で異なっている。両実験にみられた海水適応能の差は、魚が移動可能な空間の広さや、鰻組織への飼育用水の灌流量の違い等によるものかもしれない。このように、飼育密度や DO が同じ条件でも、海水適応能に与える影響は必ずしも一様でない。飼育環境要因とサケ稚魚の海水適応能の関係をより明確にするためには、飼育中の魚の生物情報だけでなく、なるべく多くの物理的、化学的情報も集積しておく必要があるだろう。

まとめ

飼育密度、DO および注水量の違いが、サケ稚魚の生理状態、なかでも海水適応能に与える影響について調べた。魚の成長は高密度飼育により抑制される傾向があり、その影響は DO が低い環境下で増すことが分かった。一方、海水適応能は注水量の少ない環境で低下する傾向があり、その影響は成長の場合と同様、DO が低い環境で増幅されることが分かった。また、これらの環境に高密度条件が重なると、鰻のナトリウム排泄能力等、海水適応能の機能面に致命的な障害が現われることが明らかとなった。何れの場合において

も、低い DO は魚の生理機能に障害を与えている可能性が予想された。今回の実験結果は、健康なサケの放流用種苗を育成するために、飼育密度や DO 等の飼育環境を適切に設定することはもちろん、注水量を十分に確保することも重要であることを示している。

引用文献

- Ban, M., and K. Yamauchi. 1991. Seasonal changes in seawater adaptability of the hatchery reared juvenile sockeye salmon, *Oncorhynchus nerka*. Sci. Rep. Hokkaido salmon Hatchery, 45: 25-33.
- 伴 真俊・長谷川裕康・阿部邦夫. 1995. ふ化場産サケの発育初期段階における摂餌量と健苗性の関係. さけ・ますふ研報, 49: 27-33.
- 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.
- Hasegawa, S., T. Hirano, T. Ogasawara, M. Iwata, T. Akiyama, and S. Arai. 1987. Osmoregulatory ability of chum salmon, *Oncorhynchus keta*, reared in fresh water for prolonged periods. Fish Physiol. Biochem., 4: 101-110.
- 橋本 進. 1966. サケ *Oncorhynchus keta* (Walbaum) の稚魚期における代謝生理学的研究- .人工餌量による飼育稚魚の成長および餌量効率におよぼす注水量 給餌量および魚の大きさの影響について .さけ・ますふ研報 20: 37-45 .
- 北海道さけ・ますふ化場 . 1989. 開発試験結果 (平成元年度). pp. 133-159.
- 北海道さけ・ますふ化場 . 1990. 開発試験結果 (平成2年度). pp. 68-73.
- 北海道さけ・ますふ化場 . 1991. 開発試験結果 (平成3年度). pp. 82-92.
- 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.
- 川津浩嗣 (1980): 魚類健康診断法の検討. 造血機能. 養殖魚における病害の予防に関する研究. 農林水産技術会議事務局, pp. 15-23.
- Klonz, G. W., B. C. Stewart, and D. W. Eib (1985): On the etiology and pathophysiology of environmental gill disease in juvenile salmonids. In Fish and shellfish pathology (edited by Ellis, A. E.). Academic press in London, pp. 199-206.

- 中野 広・安藤義秀・白旗総一郎. 1985. サケ稚魚の Na-K-ATPase 活性の成長
にともなう変化と降海サイズについて. 北水研報告, 50: 93-98.
- 野川秀樹, 八木沢功. 1994. サケ稚魚の適正な飼育環境. さけ・ますふ研報,
48: 31-39.
- 野村 稔. 1980. 流水池の環境と魚類生産. 淡水養魚と用水(日本水産学会編),
水産学シリーズ32, 恒星社恒星閣, 東京, pp. 64-83.
- Papoutsoglou, S. E., E. Papapaskeva-Papoutsoglou, and M. N. Alexis. 1987.
Effects 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.