

## 研究成果情報

## サケ稚魚の質を評価する試み

ばん まさとし

伴 真俊 (北海道区水産研究所 さけます資源部)

## はじめに

北日本の主要な水産資源であるサケ (*Oncorhynchus keta*) の来遊数は、1970 年代の約 6 百万尾から 2010 年代の約 4 千万尾まで、年変動を繰り返しながらも劇的に増加しました。この大幅な資源の増大には、サケの増殖事業が北日本の広い地域で展開されたことと、それにもなって開発された給餌放流や適期放流等の技術が貢献していると考えられています (Mayama 1985, 帰山 1986)。また、種苗の育成方法についても多くの知見が蓄積され、飼育密度や溶存酸素量 (Wedemeyer 1976, McLean et al. 1993)、換水率 (Westers and Pratt 1977)、アンモニア濃度 (Smith and Piper 1975) 等に関する基準値が定められてきました (野川・八木沢 1984)。しかし、育てた種苗の質を評価する手法は不十分なのが現状です。

サケの増殖事業に限らず、種苗生産現場に求められることは、先ず健康な放流効果の高い魚を育てることといえるでしょう (塚本 1990)。そのため、現場の担当者が毎日行う重要な作業は、飼育魚の様子を観察することだと思います (福田 2010)。しかし、観察だけでは一見すると正常な魚が本当に健康なのかどうかの見極めが難しく、判断に個人差が生じることもあります。そこで、魚の健康状態を客観的に評価し、数値化する試みが古くから続けられてきました。本稿では、種苗の質を評価するこれまでの取組みについて紹介します。

## サケ科魚類で用いられる海水適応能試験

種苗の状態を調べる際、魚をあえて不適な環境に曝し、それらの生体反応を検査する耐性試験を用いることがあります。淡水で飼育したサケ科魚類の幼稚魚を直接海水に移し、海水中における生存能力を調べる“海水適応能試験 (Seawater challenge tests)”もその一つです。この試験は、元々ニジマス幼魚 (*O. mykiss*) のスモルト化にともなう海水適応能力を調べるために開発されました (Conte and Wagner 1965)。スモルト化とは、サケ科魚類の幼稚魚が海洋生活への移行に先立って降海型に変態する現象ですが、その際に浸透圧調節機能も淡水型から海洋型へ変化します。スモルト化する前の幼稚魚を海水に移すと体液のナトリウム濃度が上昇して死に至ることもありますが、スモルト化した魚は生存に適した値を維持できます。また、変態した魚が何らかの要因で海洋生活へ移行せずに淡水生活を続けると、身体の機能が淡水型に戻り海水適応能力も低下します。当初、海水適応能力は魚を海水へ 30 日間移行した後の生残率を指標に判定していました。その後、Clarke and Blackburn (1977, 1978) により改良が加えられ、魚を塩分 30‰ の海水に 24 時間移行した後の血中ナトリウム濃度 (血中 Na) を指標にすることで、短時間で精度の高い判定ができるようになりました。この場合、血中 Na が淡水中の魚に近い 150-170 mM に調節されていれば、その個体は海水適応能力を高めていると判断します。スモルト化が不十

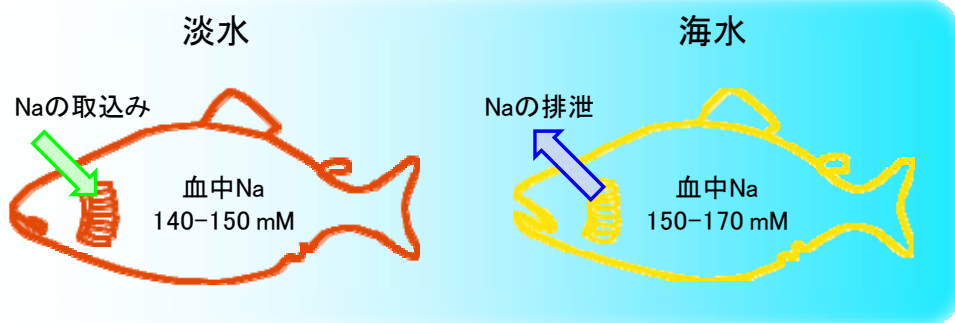


図 1. 魚類の一般的な浸透圧調節機構。左は淡水中の魚、右は海水中の魚を示す。淡水中の魚は水分が体内へ流入するため、多量の尿を排泄するとともに不足する塩類を鰓から取り込み、体液のナトリウム濃度 (血中 Na) を 140-150 mM に保っている。一方、海水中の魚は水分が体外へ流出するため、海水を飲んで補うとともに余分な塩類を鰓から排泄して、血中 Na を淡水中の魚より僅かに高い 150-170 mM に保っている。

分な状態で放流された種苗は、河川に残留するか成長阻害が起きるために放流効果が低下しますが

(Folmar et al. 1982), 海水適応能試験を定期的に行うことで、スマルト化の程度と適切な放流時期を把握することができます。この方法は、淡水に棲む魚も海水に棲む魚も体液のイオン濃度をほぼ同じ値に保つ性質(図1)を応用したもので、淡水生活期間が比較的長いギンザケ(*O. kisutch*), サクラマス(*O. masou*), ベニザケ(*O. nerka*)等に広く活用されています(Clarke and Wagner 1965, Clarke, et al. 1966, 伴ら 1987, Ban and Yamauchi 1991)。

では、サケのように浮上後数ヶ月で全ての個体が降海する種の海水適応能はどのような傾向を示すでしょうか。図2に、北海道区水産研究所から放流されているサケ稚魚の海水適応能試験結果を示しました。折れ線グラフは魚を海水へ24時間移行した後の血中Naの推移です。浮上前(2月)の魚は200 mMを超える高い値を示しましたが、浮上後は一貫して低い値を維持していることから、試験に供したサケ稚魚は3月から8月まで高い海水適応能を有していることがわかります。

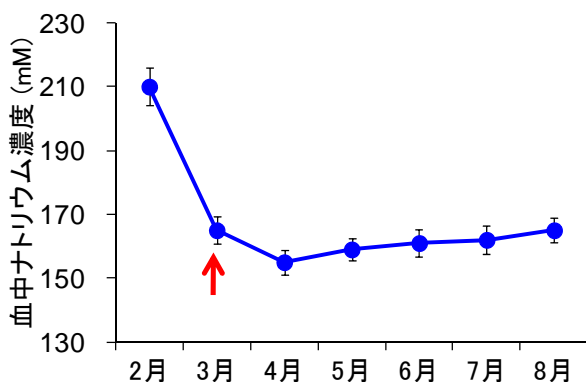


図2. サケ稚魚の海水移行24時間後における血中ナトリウム濃度の推移。横軸は試験を行った月、縦軸は血中ナトリウム濃度(mM)、矢印はサケ稚魚が浮上した時期を示す。

### 海水適応能試験を用いたサケの“健苗性”評価

種苗の質を評価する際、塚本(1993)は“健苗性”と“種苗性”に分けて扱うことを提唱しています。“健苗性”は魚の栄養状態、耐性、遊泳能力等、基本的な健康状態のことです。他方、“種苗性”は放流種苗としての適性を指し、放流効果に直接影響する機能的、形態的、行動的特性によって評価されます。ここでは、海水適応能試験を用いてサケ稚魚の健苗性を評価する試みを紹介します。

前述のとおり、サケ稚魚は浮上してから少なくとも半年間、高い海水適応能を維持するので、海

水に移されても死ぬことはありませんが、実験的に不適な環境で飼育したサケ稚魚を海水に浸けると、外見的には問題がなくても死亡する個体が現れることがあります。例えば、3器の10L水槽を設け、サケ稚魚を異なる密度と注水量(A群; 5 kg/m<sup>3</sup>, 0.4 L/min, B群; 5 kg/m<sup>3</sup>, 5.0 L/min, C群; 45 kg/m<sup>3</sup>, 5.0 L/min)で10日間飼育した後、塩分33‰の海水へ移行してみました。図3には、海水移行24時間後の生残率と血中Naを示しています(伴2000を改変)。この実験ではB群が正常な生残率(100%)と血中Na(164 mM)を示しました。しかし、B群より注水量が少ないA群や高密度のC群の血中NaはB群に比べて有意に高い値を示し、結果として生残率が低くなったことから、稚魚に何

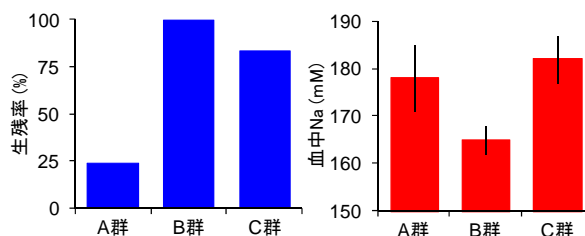


図3. 異なる条件で飼育したサケ稚魚の海水移行24時間後の生残率(%:左図)と血中ナトリウム濃度(mM:右図)。飼育密度と注水量は、A群: 5 kg/m<sup>3</sup>, 0.4 L/min, B群: 5 kg/m<sup>3</sup>, 5.0 L/min, C群: 45 kg/m<sup>3</sup>, 5.0 L/min。

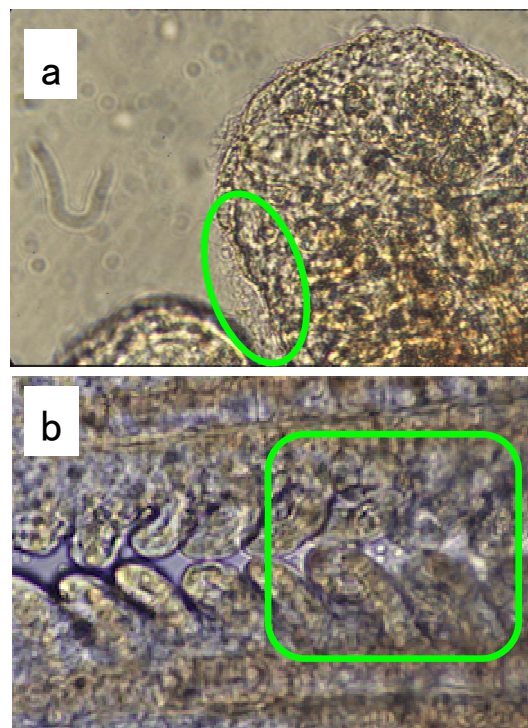


図4. 異なる条件で飼育したサケ稚魚のうちA群とC群で認められた鰓の異常。a: A群(飼育密度と注水量; 5 kg/m<sup>3</sup>, 0.4 L/min)の鰓に認められた長桿菌(緑円), b: C群(飼育密度と注水量; 45 kg/m<sup>3</sup>, 5.0 L/min)に認められた2次鰓弁の肥厚(緑枠)。

らかの異状が起きていることが予想されました。そこで各群から無作為に取り上げた個体の鰓を検査したところ、A群では長桿菌が寄生していること(図4-a)、C群では2次鰓弁が肥厚していること(図4-b)が判明しました。長桿菌(*Flavobacterium branchiophilum*)の寄生は浸透圧調節の主要器官である鰓の機能を阻害します(若林 2004)。また、2次鰓弁の肥厚は鰓を介した酸素の取込みやイオン交換を阻害する可能性があります。そのため、海水移行後の死亡原因は不適な環境で飼育された稚魚に生じた鰓の障害であることが推察されました。このように、海水適応能試験は稚魚に発生した異状を検出する有効な手段といえます。

これらの知見に基づき、北海道区水産研究所のさけます事業所では海水適応能試験を行うことによって、放流種苗に潜んでいるかもしれない異状の早期発見に役立っています。方法は、塩分33‰の海水を満した60cm水槽に60-100尾のサケ稚魚を投入し、2日後の生残率(% = 生残個体数/投入個体数×100)を算出するという簡単なものです。生残率が低い群には何らかの異状が生じていると推測し、その原因を究明することによって状況が悪化する前に対処します。

### “健苗性”を評価するその他の耐性試験

海水適応能試験は健苗性を評価するための有効な一手段ですが、本来この試験はサケ稚魚が降海に先立って獲得しているはずの海水適応能力を客観的に把握するための手段です。魚の健苗性には当然のことながら複数の要素が相互に関与していることから(塚本 1993)、種苗の健苗性をより正確に把握するためには、海水適応能以外の側面からも評価する必要があるでしょう。また、種苗生産現場で行う評価作業は、なるべく簡便で迅速に行えることも重要な要素になります。以下に、古くから行なわれている健苗性評価試験を紹介します。

サケ稚魚と同様に群れを作る習性があるアユ(*Plecoglossus altivelis*)では、升目を付けた水槽を用いて成群性や個体間距離を指標とした評価を行っています。水温上昇や絶食等の悪条件は個体間距離を大きくし、逆に水温低下や飽食は個体間距離を小さくする等、温度や餌条件は個体間距離に大きな影響を与えるようです(Tsukamoto and Uchida 1990)。また、マダイ(*Pagrus major*)では空中干出耐性試験が行われています(佐藤ら 1973)。方法は、1度に10尾の魚を取り上げ、異なる時間、空中に干出させて再び水槽に戻した際の半数致死時間を計測する簡便なもので、仔稚魚の状態を比較的鋭敏に表す活力テストとして利用されています。しかし、魚の成長にともなって半数致死

時間も長くなる傾向があるため、利用する際は体長と致死時間の関係式を求めておく必要があります。

その他、麻酔にかかった魚が覚醒するまでの時間の比較(麻酔耐性;大上・鈴木 1983)、魚の半数が死亡する上限水温の比較(高温耐性;佐藤ら 1973)、止水条件で飼育した魚が死亡するまでの時間の比較(低酸素耐性;丸山ら, 1986)等、様々な技術開発が行われてきました(北島 1993)。また、生産現場での迅速な評価はできませんが、近年では魚が受けたストレスの程度を測定するELISA法も開発されています(三吉 2010)。

### 放流効果を左右する要因

種苗生産現場の関心は、飼育している魚の“健苗性”に加えて、放流した種苗が資源にどの程度貢献しているのかという放流効果の問題でしょう。この放流効果を左右する生物側の要因が“健苗性”です。北海道区水産研究所の事業所から放流されるサケ稚魚には2006年級群以降の全ての個体に耳石温度標識が付けられるとともに、海水適応能試験を行って健苗性も調べています。そのため、放流魚の健苗性と放流効果を併せて追跡調査することができるようになりました。ここでは、サケ稚魚の海水適応能試験結果と親魚の河川回帰率の関係について調べた例を紹介します。

北海道内の12河川から1997年-2001年に放流されたサケ稚魚の海水移行後の生残率と、それらの河川回帰率を図5に示しました。赤の箱ひげ図は海水移行後の生残率が100%を示し、海水適応能については異状が認められなかった群の回帰率、青の箱ひげ図は移行後の生残率が100%未満を示

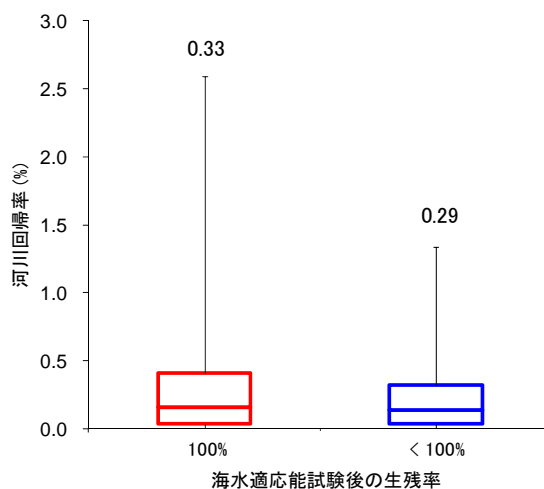


図5. 海水移行後の生残率が100%を示した群(赤)と100%未満の群(青)の河川回帰率。箱ひげ図は水平線が中央値、上下の線が第1ならびに第3四分位を示す。垂線は最大値と最小値を示す。図中の数字は平均値を示す。

し、海水適応能に異状があった個体を含む群の回帰率を表しています。赤と青の平均値はそれぞれ0.33%と0.29%を示し、両群間に大きな違いはありませんが、赤の群のなかには回帰率が2.5%に達する例も認められました。これらの結果は、サケの種苗生産過程において正常な海水適応能を有する魚の育成が大切ではあるものの、回帰率の向上には海水適応能力以外の要因が関与していることを示唆しています。

回帰率に関連しそうな要因として、捕食者からの逃避行動に関わる遊泳能力が挙げられます。塚本・梶原(1973)は流量と流速を変えられる水槽(スタミナトンネル)を開発し、流れによる負荷を与えた魚の遊泳速度(V)と遊泳時間(T)、および体長(L)から遊泳曲線 $[K = (V/L) \times Ta]$ を求め、遊泳能力の指標としました。しかし、これらの手法は遊泳力を測定するための大掛かりな実験水槽が必要です。種苗生産現場で遊泳能力を測定するためには、小林・大熊(1983)やFarrell et al.(2003)が作製したような小型で簡便な装置が必要です。和泉・大田(2011)はシロウオ(*Leucopsarion petersii*)用の小型スタミナトンネルを開発し、魚が60分間泳ぎ続けられる遊泳能力指数(SAI: Swimming Ability Index)を算出して運動能力の指標にしています。しかし、アユの場合、放流効果は遊泳力より、むしろ放流後の遡上性、あるいは飛び跳ね行動の強度と相関があるようです(Tsukamoto and Uchida 1990, Tsukamoto et al. 1990)。また、放流効果には親由来の遺伝的形質も影響している可能性があります。大原(2013)は、継代養殖されたアマゴの卵に野生アマゴの精子を掛け合わせた半野生アマゴの回帰率が、継代養殖種苗の回帰率より2-15倍も高いことを報告しています。

一方、放流効果に影響を与える要因として、放流する種苗の大きさと時期、それにとともなう水温や餌等の環境条件を考慮する必要があります。北海道区水産研究所でもこの点に着目し、大きさが異なるサケ稚魚を異なる時期に放流する実証試験を続けてきました。標識魚の調査は現在も継続中ですが、これまでの結果から、放流効果を高めるためには放流する時期が重要であること、放流が適切な時期に行なわれていれば大型の群ほど回帰率が高まること等が示されています(高橋 2010)。

## おわりに

本稿では、サケ稚魚の質を評価するために行っている海水適応能試験と、関連する手法を紹介しました。海水適応能試験はサケ稚魚の健苗性を評価する手法として有効ですが、放流効果を直接評価するものではありません。放流効果に繋がる適切な指標を見出すことは、今後に残された課題で

す。しかし、サケのように放流から回帰まで3-6年を要する魚種の場合、放流効果は種苗の質だけでなく、水温や餌、捕食圧等、環境要因の影響を考え合わせる事が不可欠です。ふ化放流技術グループでは、サケ稚魚の健苗性を簡便に把握する手法の確立に向けた、海水適応能以外の指標の探索と、実証放流を通じた放流効果に影響を与える環境要因の把握に取り組んでいます。

## 謝辞

海水適応能試験と河川回帰率の関連を調べる実験は、増殖効率化モデル事業として行なわれたものです。当時の関係者の皆様には心から感謝いたします。

## 参考文献

- 伴 真俊. 2000. 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. 魚と卵, 167: 1-7.
- 伴 真俊・笠原 昇・山内皓平. 1987. 池産サクラマス1年魚の銀化に伴う生理的变化. 北海道立水産孵化場研究報告, 42: 27-35.
- Ban, M., and Yamauchi, K. 1991. Seasonal changes in seawater adaptability of the hatchery reared juvenile sockeye salmon, *Oncorhynchus nerka*. Sci. Rep. Hokkaido Salmon Hatchery, 45: 25-33.
- Clarke, W. C., and Blackburn, J. 1977. A seawater challenge test to measure smolting of juvenile salmon. Can. Fish. Mar. Serv. Tech. Rep., 705: 11p.
- Clarke, W. C., and Blackburn, J. 1978. Seawater challenge tests performed on hatchery stocks of Chinook and coho salmon in 1977. Can. Fish. Mar. Serv. Tech. Rep., 761: 19p.
- Clarke, W. C., and Wagner, H. H. 1965. Development of osmotic and ionic regulation in juvenile steelhead trout *Salmo gairdneri*. Com. Biochem. Physiol., 14: 603-620.
- Clarke, W. C., Wagner, H. H., Fessler, J., and Gnose, C. 1966. Development of osmotic and ionic regulation in juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). Comp. Biochem. Physiol., 18: 1-15.
- Conte, F. P., and Wagner, H. H. 1965. Development of osmotic and ionic regulation in juvenile steelhead trout *Salmo gairdneri*. Comp. Biochem. Physiol., 14: 603-620.
- Farrell, A. P., Lee, C. G., Tierney, K., Hodaly, A., Clutterham, S., Healey, M., Hinch, S., and Lotto, A. 2003. Field-based measurements of oxygen uptake and swimming performance with adult Pacific



- salmon using a mobile respirometer swim tunnel. *J. Fish Biol.*, 62: 64-84.
- Folmar, L. C., Dickhoff, W.W., Mahnken, C. V. W., and Waknitz, F. W. 1982. Stunting and parr-reversion during smoltification of coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *Aquaculture*, 28: 91-104.
- 福田 穰. 2010. 魚類養殖現場でできる日常の健康診断. *養殖*, 6: 22-24.
- 泉 完・大田敏樹. 2011. 河川におけるスタミナトンネルを用いたシロウオの遊泳能力について. H23 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 127-128.
- 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.
- 北島 力. 1993. 飼育過程での評価方法. 水産学シリーズ93 『放流魚の健苗性と育成技術』(北島 力編), 恒星社厚生閣, 東京. pp. 31-40.
- 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・ますふ化場研究報告, 37: 41-44.
- 丸山敬悟・津村誠一・森岡泰三. 1986. マダイ種苗の健全性に関する試験-I. 粗放的生産魚と集約的産魚の比較. *栽培技研*, 15: 157-167.
- Mayama, H. 1985. Technical innovations on 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., Jensen, J. O. T., and Alderdice, D. F. 1993. Oxygen consumption rates and water flow requirements of Pacific salmon (*Oncorhynchus* spp.) in the fish culture environment. *Aquaculture*, 109: 281-313.
- 三吉泰之. 2010. 抗体チップ・プロテインチップを用いた養殖ヒラメの健康診断技術. *養殖*, 6: 28-31.
- 野川秀樹・八木沢功. 1984. 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.
- 大上皓久・鈴木 隆. 1983. マダイ仔魚の活力判定法の検討. 昭和 57 年度静岡県栽培漁業センター事業報告, 50-56.
- 大原健一. 2013. 回帰率の高いサツキマス種苗の開発. 岐阜県河川環境研究所の広報誌 河環研だより, 23: 1.
- 佐藤正明・伏見 徹・増村和彦. 1973. マダイ仔魚期の飼育管理技術の向上. 昭和 47 年度別枠研究成果, 浅海域における増養殖漁場の開発に関する総合研究. 備後灘周辺漁場開発プロジェクトチーム, pp. 266-273.
- Smith, C. E., and Piper, R. G. 1975. Lesions associated with chronic exposure to ammonia. In *The Pathology of Fishes*, ed. W. E. Ribelin, and G. Migaki. Uni. Wisconsin Press, Madison. pp. 497-514.
- 高橋史久. 2010. 耳石温度標識放流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.
- 塚本勝巳. 1990. 種苗性のはなし. *さいばい*, 55: 20-24.
- 塚本勝巳. 1993. 種苗の質. 水産学シリーズ 93 『放流魚の健苗性と育成技術』(北島力 編), 恒星社厚生閣, 東京. pp. 102-113.
- 塚本勝巳・梶原 武. 1973. 魚類の遊泳速度と遊泳能力. *水産土木*, 10: 31-36.
- Tsukamoto, K., and Uchida, K. 1990. Spacing and jumping behavior of the ayu *Plecoglossus altivelis*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 56: 1383-1392.
- Tsukamoto, K., Masuda, S., Endo, M., and Otake, T. 1990. Behavioural characteristics of the ayu *Plecoglossus altivelis* as predictive indices for stocking effectiveness in a river. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 56: 1177-1186.
- 若林久嗣. 2004. 細菌病. 『魚介類の感染症・寄生虫病』(若林久嗣・室賀清邦 編), 恒星社厚生閣, 東京. pp. 169-173.
- 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.
- Westers, H., and Pratt, K. M. 1977. Rational design of hatcheries for intensive salmonid culture, based on metabolic characteristics. *Prog. Fish Cult.*, 39: 157-165.