

サケ稚魚長距離輸送時の経時的水質変化

藤原 真*, 實吉隼人, 鈴木邦夫

*北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場

Changes in water quality during long-distance transportation of chum salmon juveniles

MAKOTO FUJIWARA*, HAYATO SANEYOSHI AND KUNIO SUZUKI

*Hokkaido Research Organization, Salmon and Freshwater Fisheries Research Institute, *Eniwa, Hokkaido, 061-1433, Japan*

Changes in water quality(temperature, pH, electric conductivity (EC), dissolved oxygen (DO), and ammonia nitrogen $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration) in fish tanks containing chum salmon juveniles were examined during long-distance transportation by car. From March through April in 2011 chum salmon juveniles (mean body weight 0.7-0.9 g, total number 860,000) were transported while supplying oxygen from a hatchery to 4 distant rearing sites in Hokkaido, Japan. Duration of feed withdrawal for fish before transportation was one day. Densities (total fish weight per tank volume) in the fish tanks were maintained at 6.0 to 7.2%. Carrying distances were 227 to 340 km (5 to 7.1 hours by car). The water temperature was nearly constant. The pH decreased rapidly at the early stages of transportation and then remained constant. The DO increased and reached supersaturation. The concentration of $\text{NH}_4\text{-N}$ increased in proportion to the transportation time (hours) and reached 6.38 mg/l (0.0009 mg $\text{NH}_3\text{/l}$) 7 hours later. Moreover, EC was proportional to the content of $\text{NH}_4\text{-N}$. The fish showed no mortality during and after transportation. These results suggest that the conditions of the long-distance transportation were appropriate for use in chum salmon juveniles and also that EC would be a useful indicator for $\text{NH}_4\text{-N}$ content.

キーワード： サケ稚魚, 水質, 長距離輸送

現在、北海道では毎年約10億尾のサケ稚魚が生産され、全道各地で放流されているが、このうち、約30%の稚魚が他の陸上施設あるいは海中飼育施設へ移動され、再飼育後、最終放流されている。このため、河川へ直接輸送して放流される稚魚を含めると少なくとも40%前後のサケ稚魚がトラックにより活魚輸送されている。

活魚輸送において留意すべき主な条件として稚魚の収容密度、タンク内の溶存酸素量および水温が挙げられる。清水 (1985) は、これらの条件に加え、水質の変化 ($\text{NH}_4\text{-N}$, PO_4) と稚魚の生理障害の程度について検討し、収容密度が高いほど $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の増加率が大きいことを明らかにした。さらに、収容密度20%程度 (単位容積あたりの収容重量; %) では血液性状に影響はほとんどないことから、この密度条件においては200km 前後の距離を安全に運搬できるとしている。

2010年に真狩村 (後志管内) に新設された羊蹄ふ化飼育場では、生産された稚魚2,240万尾 (0.7~0.8g) を留萌管内の各施設へ輸送し、再飼育後にそれぞれの川へ放流する (Fig.1)。輸送距離は、最も南に位置する信砂ふ化場および暑寒別飼育場 (増毛町) が約230km、最北の遠別飼育場 (遠別町) に至っては340km と、清水 (1985) が報告した距離を大幅に上回っている。また、輸送する稚魚の数も2,240万尾と大量であることから輸送後の稚魚の健苗性にも配慮した、より安全な輸送技術の確立が急務の課題となっている。

そこで、本研究は長距離輸送において懸念される輸送タンク内の水質悪化に焦点を絞り、輸送中の水温、溶存酸素量 (DO), pH, アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) および電気伝導率 (EC) を経時的に調べ、輸送方法の改善に向けた基礎データの収集を目的とした。

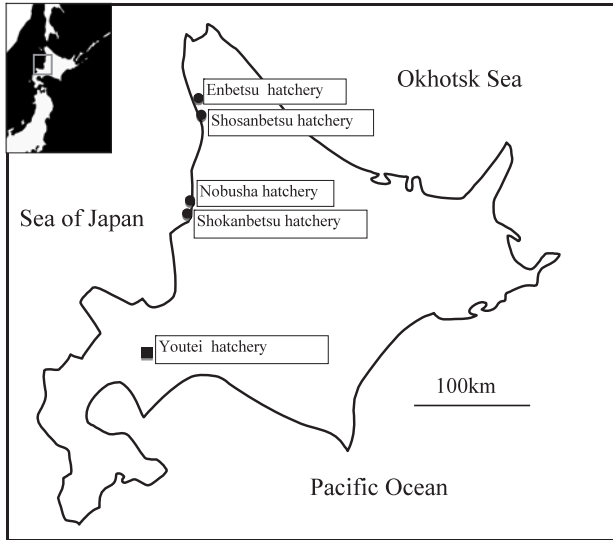


Fig. 1 Map showing producing (■) and transporting (●) sites of chum salmon juveniles.

試料および方法

羊蹄ふ化飼育場で2011年春に生産されたサケ稚魚2,240万尾のうちの86万尾を対象とし、遠別飼育場（遠別町）、初山別飼育場（初山別村）、信砂ふ化場および暑寒別飼育場（増毛町）へ輸送した。輸送した稚魚の平均体重は0.7~0.9g、輸送前の餌止め日数は1日で、これらサケ稚魚の輸送概要はTable 1に示した。なお、輸送中は酸素分散器を用いて酸素補給を行い、途中水換えは行っていない。

輸送時にタンク内の水温、DO、pH、ECを測定した。なお、水温とDOはDOメータ（WTW社製Multi 3410）、pHは簡易水質試験器（東洋製作所製BTB）、ECはポータブル電気伝導度・塩分・水温計（YSI社製EC300型）を用いて測定した。また、輸送中のタンク内の水温への気温の影響を把握するため、タンク内と外に自記水温計（ティドビットv2：Onset社製）を取り付け、10分毎の水温および気温の変化を記録した。

NH₄-N濃度の分析用としてタンク内の環境水500ml

を採水した。試水はアイスボックスで氷冷しながら実験室に持ち帰り、-80℃で冷凍保存したのち、後日、水質分析し、NH₄-N濃度を求めた。なお、分析にはインドフェノール法を用いた。さらに、得られたNH₄-N濃度ならびに水温とpHの測定値からThurston *et al.* (1979)により非解離アンモニア（NH₃）濃度を求めた。

タンク内の環境水の簡易測定は、出発時（0時間）、輸送30分後、2.5時間後、5時間後および到着時に、水質分析用の採水は出発時、2.5時間後、5時間後および到着時に実施した。なお、出発時の簡易測定および採水は、信砂および暑寒別への輸送群については飼育池の注水部、初山別および遠別への輸送群についてはタンク内の水について実施した。また、到着時のタンク内の水温との水温差を把握するため、稚魚を収容する飼育池の水温についても測定した。

調査は3月19日（信砂）、3月25日（暑寒別）、4月1日（初山別）、4月14日（遠別）の4回実施した。輸送時間は信砂ふ化場と暑寒別飼育場が概ね5時間、初山別飼育場が6.4時間、遠別飼育場が最も長く7.1時間であった。また、輸送距離は信砂ふ化場と暑寒別飼育場が約230km、初山別飼育場が320km、遠別飼育場が340kmであった。輸送に用いたタンクの容量は信砂ふ化場と暑寒別飼育場が3m³（以下、Tank Iと呼ぶ）、初山別飼育場と遠別飼育場が2m³（以下、Tank IIと呼ぶ）であり、収容密度（（総重量/タンク容量）×100）は6.0~7.2%の範囲であった。なお、タンクIはキャンバス式であり、輸送に使用したトラックはフルハーフのウイングタイプ、タンクIIは密閉式のFRPタンクであり、輸送に使用したトラックはトレーラーの平ボディタイプであった。

結果

水温 輸送中の水温の変化をみると初山別飼育場と遠別飼育場への出発時のタンク内の水温は6℃であり、輸送中若干の上昇がみられたが、4時間後で+0.2℃、到着時

Table 1 Summary of long-distance transport of chum salmon juvenile

Date	Destination	Hours	Distance (km)	No. of individuals (thousands)	Mean body weight (g)	Total weight (kg)	Tank volume (m ³)	Density ^{*3} (%)
March 19, 2011	Nobusha	5.2	234	280	0.7	196	3 (Tank I) ^{*1}	6.5
March 25, 2011	Shokanbetsu	4.9	227	270	0.7	189	3 (Tank I)	6.3
April 1, 2011	Shosanbetsu	6.4	320	160	0.9	144	2 (Tank II) ^{*2}	7.2
April 14, 2011	Enbetsu	7.1	340	150	0.8	120	2 (Tank II)	6.0

*1 Canvas tank

*2 FRP tank

*3 Density(%) = Total weight(kg) / (Tank volume(m³) × 10)

で+0.4~0.7℃の範囲であった (Fig. 2-a)。信砂ふ化場と暑寒別飼育場の輸送では出発時の水温として羊蹄ふ化飼育場の飼育池注水部の水温を測定しているが、共に6.3℃であった。信砂ふ化場の輸送では輸送30分後のタンク内の水温は5.9℃であったが、2.5時間後には0.7℃上昇した後、到着時にはさらに0.4℃低下した6.2℃であった。また、暑寒別飼育場への輸送では輸送30分後のタンク内の水温は5.1℃であったが、2.5時間後には0.6℃上昇し、到着時には0.2℃低下した5.5℃であった。

到着時のタンク内の水温と稚魚を収容した飼育池の水温は、それぞれ信砂ふ化場で6.2℃と3.2℃、暑寒別飼育場で5.5℃と2.4℃、初山別飼育場で6.4℃と4.1℃、遠別飼育場で6.7℃と7.3℃であった。その水温差は+0.6~-3.1℃の範囲にあり、遠別飼育場でのみ飼育池の水温がタンク内の水温より高かった。他の3箇所では、概ね飼育池の水温がタンク内の水温より3℃前後低かった。

気温の水温への影響 タンク I を使用した信砂ふ化場と暑寒別飼育場への輸送中の気温は、前者で平均7.6℃ (範囲: 3.2~14.3℃)、後者で平均0.1℃ (範囲: -5.5~

5.8℃) であったが、タンク内の水温はともに6℃前後で推移した (Fig. 3)。一方、タンク II を使用した初山別飼育場と遠別飼育場への輸送中の気温は、前者で平均5.4℃ (範囲: 2.6~8.0℃)、後者で平均7.0℃ (範囲: 2.8~12.0℃) であったが、タンク内の水温は、前者で平均6.3℃ (範囲: 6.1~6.4℃)、後者で平均6.2℃ (範囲: 6.1~7.3℃) であった。遠別飼育場への輸送群においてタンク内の水温が7.3℃まで上昇したものの、概ね、タンク I、タンク II ともに気温の影響をほとんど受けなかった。

溶存酸素 (DO) 出発時の飼育池注水部の DO は、概ね12 mg/l であり、出発時のタンク内の DO を測定した初山別飼育場への輸送群もほぼ同様な値を示した (Fig. 2-b)。一方で、遠別飼育場への輸送群では出発時のタンク内の DO は8.5 mg/l であった。なお、信砂ふ化場および暑寒別飼育場への輸送群については出発時にタンク内の DO を測定しておらず、羊蹄ふ化飼育場の飼育池注水部の測定値である。輸送30分後の DO は、信砂、暑寒別、初山別への輸送群では10~13 mg/l の範囲であったが、遠別の輸送群では5 mg/l まで低下した。恐らく、調整器の不具合による

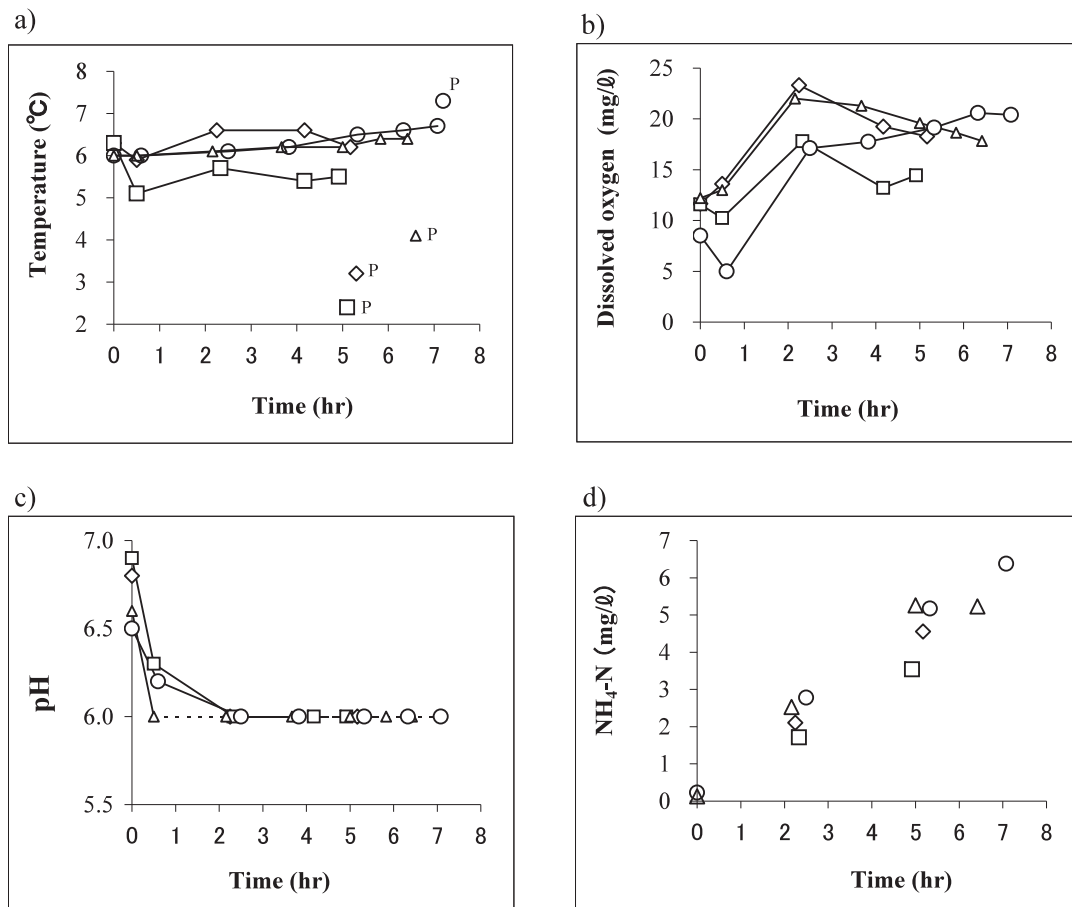


Fig. 2 Changes in water temperature (a), dissolved oxygen (b), pH (c) and NH₄-N concentration (d) during long-distance transportation ; Index P indicates values measured in the pool on arrival . NH₄-N concentrations (—Nobusha (◇) and Shokanbetsu (□)) measured in the pool at departure were omitted. ◇ ; Nobusha, □ ; Shokanbetsu, △ ; Shosanbetsu, ○ ; Enbetsu

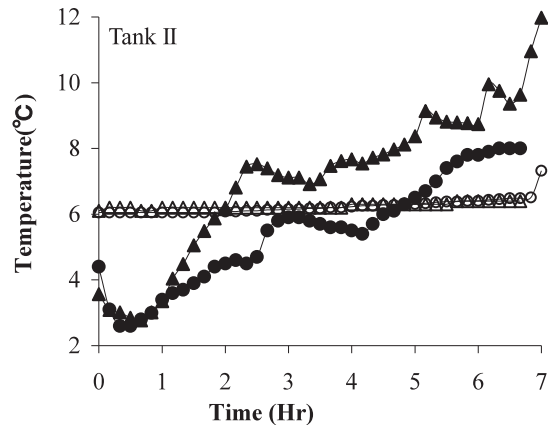
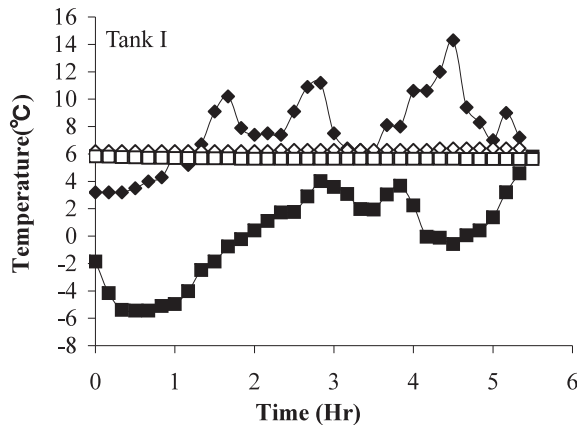


Fig. 3 Changes in air and water temperatures during long-distance transportation. (Data were recorded at ten-minute intervals). ◆; Nobusha (air), ◇; Nobusha (water), ■; Shokanbetsu (air), □; Shokanbetsu (water), ▲; Shosanbetsu (air), △; Shosanbetsu (water), ●; Enbetsu (air), ○; Enbetsu (water)

ものと考えられた。その後、適宜、酸素量を調整したが、2.5時間後には17.1~23.3mg/lと4群ともに最大値を示し、到着時には14.5~20.4mg/lの範囲にあった。DOが最大となった時の酸素飽和度は、146.5~196.2%であったが、横臥する個体等はみられなく、輸送中および輸送直後のサケ稚魚への影響は認められなかった。

pH 羊蹄ふ化飼育場の注水部では6.8~6.9であったが、出発時にタンク内のpHを測定した初山別飼育場と遠別飼育場への輸送では6.5~6.6と若干の低下がみられた (Fig. 2-c)。輸送30分後には6.0~6.3, 2.5時間後には4群すべてで6.0まで低下し、その後も中性に回復することはなかった。

アンモニア態窒素 (NH₄-N) 出発時にタンク内の環境水を採水した初山別飼育場と遠別飼育場の輸送では、0.13~0.23mg/lであった (Fig. 2-d)。なお、飼育池の注水部ではNH₄-N濃度は検出限界 (0.05mg/l) 以下であった。輸送2.5時間後には平均2.28mg/l (範囲: 1.71~2.78mg/l), 輸送5時間後には平均4.63mg/l (範囲: 3.54~5.26mg/l) までNH₄-N濃度が上昇した。さらに輸送時間が7.1時間に達した遠別飼育場への輸送では6.38mg/lに達した。経過時間とNH₄-N濃度との間には有意な正の相関が認められた (R²=0.9479, p<0.005)。

非解離性アンモニア (NH₃) NH₃濃度を推定したところ、2.5時間後で平均0.000325mg/l (範囲: 0.0002~0.0004mg/l), 5時間後で平均0.000625mg/l (範囲: 0.0005~0.0007mg/l), 輸送時間が7.1時間に達した遠別飼育場への輸送では0.0009mg/lの最大値を示した (Fig. 4)。経過時間とNH₃濃度との間には有意な正の相関が認められた (R²=0.9211, p<0.005)。

電気伝導率 (EC) ECを測定した初山別飼育場と遠別飼育場への輸送について、ECとNH₄-N量 (NH₄-N濃度 (mg/l) ×タンク内の水量 (l); mg) との関連性につ

いて検討したところ、有意な正の相関が認められた (Fig. 5 R²=0.9644, p<0.005)。

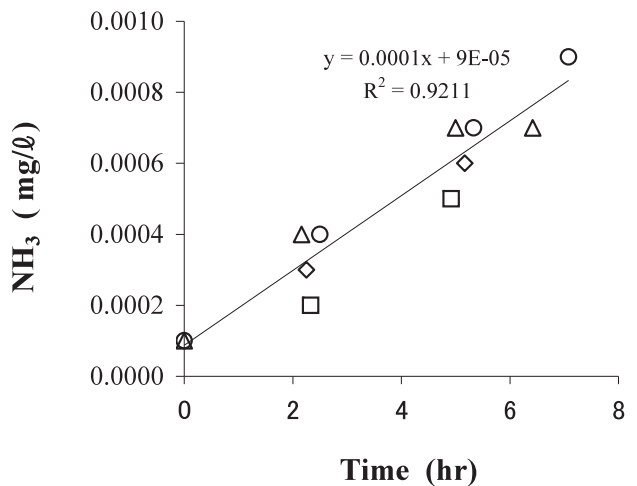


Fig. 4 Change in estimated NH₃ concentration during long-distance transportation. ◇; Nobusha, □; Shokanbetsu, △; Shosanbetsu, ○; Enbetsu

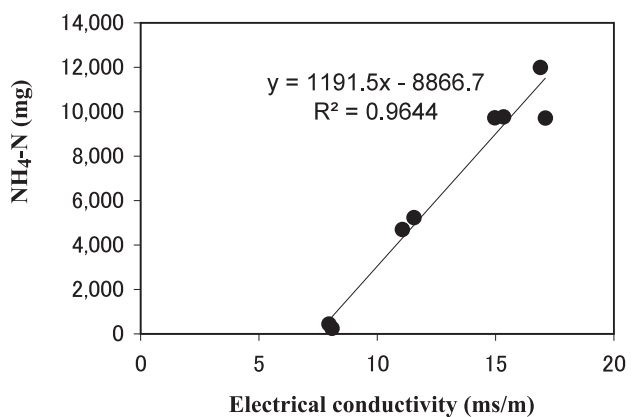


Fig. 5 Relationship between electric conductivity and NH₄-N content.

考 察

水温 キャンバス式タンクは、FRPタンクに比べ密閉度が低く、気温の水温への影響が大きいと予想された。しかし、両者において水温に対する気温の影響はほとんど認められなく、羊蹄ふ化飼育場の飼育水温とほぼ同じ6℃前後で輸送することができた。キャンバス式タンクを積載したトラックは、ウイングタイプであることからタンクが直接外気に触れないため、水温変動が少なかったと考えられた。

また、到着時のタンク内の水温と収容する飼育池の水温との水温差は、+0.6～-3.1℃の範囲にあったが、積み下ろし後のサケ稚魚に平衡感覚の欠如、鰓蓋の緩慢な開閉等の異常は特に認められなかった。水温の急激な低下は冷ショックによる死亡を起こす可能性があり (Ash *et al*, 1974), また、致死水温の下限は、馴致水温に強く左右される (Brett, 1952)。今回の試験では到着時の水温が5.5～7.3℃であり、収容する飼育池の水温が低かった場合でもその差は3℃程度であった。ただし、さらに飼育池の水温が雪解け等により0℃前後の場合も想定されることから輸送中の水温コントロール、すなわち、馴致水温を低く維持することも今後必要と考えられた。

pH 簡易水質試験器のpH指示薬として用いたBTB溶液の測定範囲は6.0～7.6である。このため、2.5時間後にはすべての群で6.0を示したが、さらに低い値であった可能性もあり、pHの変化については改めて検討する必要がある。また、今回の試験でみられたpHの低下は、魚の呼吸により水中にCO₂が溶解した結果と考えられるが、酸素消費量とも密接に関係し、特に出発時(稚魚の積み込み直後)に6.5～6.6まで低下していることから積み込み時の刺激の影響が考えられ、積み込み方法(角ザルおよびフィッシュポンプ)についても検討が必要と考えられた。

過飽和溶存酸素量 キャンバス式タンクは、FRPタンクに比べ密閉度が低いことから飽和度が低いと予想されたが、両者とも過飽和に達しており、特に明瞭な違いは認められなかった。DOは最大で23.3mg/lを示し、飽和度は196.2%であった。酸素過剰の条件下では鰓のガス交換率が減少し、CO₂排出が阻害され、血中のCO₂分圧が過剰に上昇するとされている (Heiler, 1984)。また、微細な気泡が鰓に付着して生理的障害を示す場合が指摘されており、コアユでは溶存酸素量が27～32cc/l (38～46mg/l)の水に入れると約30分で狂奔がみられ、6時間後では清水に戻しても斃死がみられるとの報告がある (山崎, 1967)。今回の試験では輸送中および輸送後に斃死等は認められなかったが、過飽和溶存酸素量のサケ稚魚への生理的な影響については、不明の点が多く、血中酸素濃度

や血液性状との関連を含め、今後の課題と考えられた。

NH₃濃度 本研究で得られたNH₃濃度の最大値は0.0009mg/lであり、サケ稚魚への影響はなかったものと判断された。ニジマス(9～12か月飼育して得たNH₃の安全濃度は0.0125ppm)と報告されており (Smith and Piper, 1975), 今回の値はサケ稚魚に影響ない範囲と考えられた。一般に水溶液中のアンモニアは非解離性アンモニアNH₃とアンモニウムイオンNH₄⁺の形態で存在するが、このうち、鰓のリポ蛋白質膜を容易に透過することができるNH₃の毒性が高いことが知られている (Wuhrmann and Woker, 1948)。また、水中の総アンモニア(NH₃+NH₄⁺)中に占めるNH₃の割合は、pHと水温が高いほど大きくなるとされている (Thurston *et al*, 1979; 清水, 1982)。本研究では2.5時間後にはすべての輸送でpH値が6.0～6.3まで低下しており、また、輸送中の水温は5.1～6.7℃と低水温に維持されたことからNH₄-N濃度が最大6.38mg/lと高かったもののNH₃濃度は低い値で経過したものと考えられた。

DOとNH₃濃度 DOは、遠別飼育場への輸送において出発時から輸送30分後まで5.0～8.5mg/lであったのを除くと10mg/l以上の高い値が維持されており、NH₃濃度のサケ稚魚に対する毒性を軽減する方向に働いたと考えられた。ニジマスでは溶存酸素量が低いほど低濃度の非解離性アンモニア濃度で影響を受けることが示されており、溶存酸素量7mg/lの条件下での96時間LC₅₀(50%死亡率濃度)は0.6mg/l前後と報告されている (Thurston *et al*, 1981)。本研究で得たNH₃濃度の最大値(0.0009mg/l)はこの値より低く、溶存酸素量を考慮してもサケ稚魚には問題ない範囲と考えられた。

NH₄濃度 今回の試験ではNH₄-N濃度が約7時間後に6.38mg/lまで増加した。NH₄-N濃度は時間の経過とともに蓄積されることが知られており (山崎, 1967; 伊澤・今田, 1984), 本研究においても経過時間とNH₄-N濃度との間には有意な正の相関が認められた。また、輸送2.5時間後には平均2.28mg/l (範囲: 1.71～2.78mg/l)の値を示し、清水 (1985) が収容密度10%の条件下でサケ稚魚を輸送した際に得た2時間後のNH₄-N濃度(2mg/l)にほぼ一致した。一般にアンモニア(NH₄-N)の毒性については0.3ppm以上になると血液中の酸素が減じ、炭酸ガスが増加するとされ、さらに10ppm近くになれば斃死さえ現れるとされている (山崎, 1967)。また、ニジマスではNH₄-Nの蓄積に伴うHt値の上昇から呼吸障害が起きている可能性が示唆されている (伊澤・今田, 1984)。今回の試験ではNH₄-N濃度が6.38mg/l前後でも輸送中および輸送後に斃死等が認められなかったのは、深刻な影響を与える経過時間に至っていないためと考えられ

た。また、pHが低い条件下において総アンモニアに占めるNH₃濃度の割合が低く、その絶対値も低かったことからサケ稚魚への毒性が低かったことも考えられた。一方でNH₄⁺が高く存在すると鰓におけるNa⁺吸収が阻害され、浸透圧調節の平衡異常を招くとされており (Armstrong *et al*, 1978), pHが低い条件下であってもNH₄-N濃度が高い場合には注意が必要と考えられる。

アンモニア態窒素の排泄量は、魚種、魚の大きさ、健康状態、水温などによって異なり、特に餌止めによる影響が著しいとされている (山崎, 1967)。この中で150gの大きさのニジマスでは、餌止め時間が72時間では24時間の場合の20%以下の排泄量に低下すると報告されている。本研究では餌止めを1日として実施したが、餌止め日数についても今後検討が必要と考えられた。

アンモニア態窒素の簡便な推定手法 ECとNH₄-N量に強い相関がみられた。水中の窒素濃度の計測としては、吸光光度法やイオンクロマト法などの室内分析が主流であるが、即時性、分析労力の面から現場での活用は難しい。このため、導電率情報を用いた全窒素濃度 (T-N) の推定が、農業や畜産の分野で試みられている (小柳, 1998; 富田ら, 2008)。サケ稚魚の長距離輸送においてもEC値がNH₄-Nの指標値の一つとして利用できる可能性がみられ、輸送中の簡便な測定方法として有用と考えられた。

以上より、アンモニア中に占めるNH₃の割合とその毒性は水温、pH、DOの影響を受け、さらに輸送する稚魚の健康度によりNH₃から受ける影響も異なると考えられる。また、アンモニア態窒素量を極力低く保つことも重要と考えられ、長距離輸送に際してはこれらの点に注意する必要がある。

今後、より安全なサケ稚魚長距離輸送方法の確立のため、NH₃濃度と餌止め日数、過飽和溶存酸素量のサケ稚魚への影響等について、さらなる検討が必要である。

謝 辞

本研究を進めるにあたりご協力頂いた社団法人留萌管内さけ・ます増殖事業協会の職員の皆様に感謝申し上げます。また、水質分析を担当し、助言頂いた、さけます・内水面水産試験場内水面資源部中島主査、佐々木研究主査に感謝申し上げます。社団法人北海道栽培漁業振興公社の今田和史氏には本原稿に多くの有益な助言をいただきました。厚くお礼申し上げます。

引用文献

- Armstrong DA, Chippendale D, Knight AW, Colt JE. Interaction of ionized and un-ionized ammonia on short-term survival and growth of prawn larvae, *Macrobrachium Rosenbergii*. Biol. Bull. 1978; 154: 15-31.
- Ash GR, Chymko NR, Gallup DN. Fish kill due to "cold shock" in lake Wabumun, Alberta. J. Fish. Res. Bd. Can. 1974; 31(11): 1822-1824.
- Brett JR. Temperature tolerance in young Pacific salmon, genus *Oncorhynchus*. Fish. Res. Bd. Can. 1952; 9: 265-323.
- Heisler N. Acid-base regulation in fishes. In: W. S. Hoar and D. J. Randall (eds.), Fish Physiology X. Part A: Anatomy, gas transfer and acid-base regulation. Academic Press, London. 1984; 315-401.
- 伊澤敏穂・今田和史. 高密度飼育ニジマスの止水条件下における血液性状と環境水の変化. 北海道立水産孵化場研究報告. 1984; 39: 75-82.
- 小柳渉. 貯留牛尿の成分と簡易測定方法. 新潟畜産研報. 1998; 12: 49-57.
- Smith CE, Piper RG. Lesions associated with chronic exposure to ammonia. In: W. E. Ribelin and H. Gigaki (eds). The pathology of fishes. Univ. Wis. Press, Madison. 1975; 497-514.
- Thurston RV, Russo RC, Emerson K. Aqueous ammonia equilibrium tabulation of percent un-ionized ammonia. Ecological Research Series. 1979; 1-123.
- 清水幾太郎. 初心者のための水質調査 (II) 飼育環境とアンモニア. 魚と卵. 1982; 152: 34-37.
- 清水幾太郎. 稚魚輸送放流技術の開発. そ河性さけます類の大量培養技術開発における総合研究. 1985; 106-107.
- Thurston RV, Phillips GR, Russo RC, Hinkins SM. Increased toxicity of ammonia to rainbow trout (*salmo gairdneri*) resulting from reduced concentrations of dissolved oxygen. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1981; 38(8): 983-988.
- 富田景子・平井康丸・別府佑一郎・濱上邦彦・森 健. 導電率情報を利用した灌漑水の全窒素濃度の推定. 九大農学芸誌. 2008; 63(2): 141-145.
- 山崎隆義. 淡水魚の活魚輸送. 水産研究叢書. 1967; 17: 1-55.
- Wuhrmann K, Woker H. Beitrage zur Toxikologie der Fische. II. Experimentelle Untersuchungen über die Ammoniak und Blausaurevergiftung. Schweiz. Z. Hydrol. 1948; 11: 210-244.