

閉鎖循環システムによるサクラマス種苗生産事業

長崎 勝康

目 的

海水養殖で進んでいる閉鎖循環飼育システムによる飼育技術について、淡水のサクラマス類の種苗生産現場への導入を検討するために、同システムによるサクラマスの飼育の実証試験を行い実用性、課題等明らかにする。本試験は、農林水産技術会議による、平成 26 年度農林水産業の革新的技術緊急展開事業（うち産学の英知を結集した革新的な技術体系の確立）によって実施した。

1. 幼魚飼育試験

材料と方法

飼育水槽（FRP 製 500×100×70cm）、循環ポンプ 2 台（150ℓ/分）、3 段の濾過槽（上から 100ℓ、400ℓ、200ℓ）、水温調整装置で構成された閉鎖循環システムを用いて 2015 年 8 月 7 日から 10 月 26 日までの 80 日間サクラマス幼魚飼育を行った（図 1、表 1）。

システムのろ材は、上段の濾過槽に厚さ 25mm のサランロックを 5 層に重ねて入れ、中段にはホタテ貝殻チップ 9kg を玉ねぎ袋に詰めたもの 28 袋を設置し、下段には 1m のバイオコードをリング状にして 48 本設置した。ホタテ貝殻チップは、事前に水温 12℃ で塩化アンモニウムを添加し熟成させ硝化細菌が十分に働く状況にしたものを使用した。また、循環システムに熟成させたろ材を設置後にも同施設に塩化アンモニウムを添加しながら循環運転を行い、水槽全体の硝化細菌の熟成を進め、塩化アンモニウム 60g 添加後 24 時間でアンモニア態窒素が検出されなくなった状態で飼育を開始した。

3 段の濾過槽のうち、ホタテ貝殻チップを設置した中段の 400ℓ 濾過槽は濾材表面が閉塞しにくく硝化能力が高いとされる間歇ろ床方式とするため、濾過槽が満水になるとサイフォンが働く構造にし、循環ポンプを 5 分間運転、1 分間停止の繰り返し運転することによりポンプ停止時間中にろ材の大半が空中に露出するように設定した。

幼魚飼育試験には、前年秋に作出した平均尾叉長 7.2cm、平均体重 4.2g のサクラマス幼魚 1,550 尾を使用した。飼育期間中の連続注水は行わず、残餌及び糞掃除のためにサイフォンで排水した分だけ湧水を補充した。水温は、13.2℃ に設定した。

対照区として、同型的水槽に試験区と同じ群のサクラマス幼魚（平均尾叉長 7.2cm、平均体重 4.2g）1,550 尾を収容し、毎分 40ℓ 注水する通常の掛け流し飼育を行った（表 1）。

餌は市販のニジマス用配合飼料を使い、ライトリッツの給餌率表に準じた量を朝、昼、夕方の 3 回に分けて与えた。水槽内に餌の食べ残しが出ないように、飽食した段階で給餌をやめた。

掃除は、1 日 1 回ホースを使いサイフォンで飼育水槽

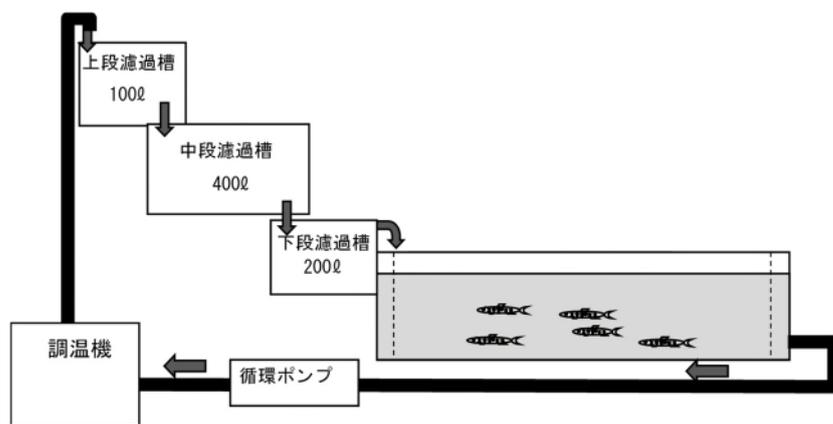


図 1. 閉鎖循環システム略図

表 1. サクラマス幼魚飼育条件

	閉鎖循環区	掛け流し区
水槽サイズ	100(幅)×500(長さ)×70cm(深さ)	
水深	50cm	
注水量	掃除で排水分を補充	40ℓ/分
循環水量	300ℓ/分	—
1日の使用水量	47ℓ/日	57,600ℓ/日

下流底面にたまった糞及び残餌を排出した。飼育期間中に濾過槽及び濾材についての洗浄は行わなかった。

飼育中は概ね 10 日毎に 100 尾の尾叉長と体重を測定した。飼育水の水温、溶存酸素、pH を 1 日 1 回水質チェッカー (HACH HQ-40d) により観測した。また 1 週間に 1~2 回の割合でアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素をポータブル吸光光度計 (HACH DR900) により測定した。

結果と考察

閉鎖循環区のサクラマスは、尾叉長、体重とも掛け流し区と同様の成長を示した (図 2、3)。飼育 80 日目の終了時の平均尾叉長と平均体重は、循環区で 11.7cm、19.0g、掛け流し区で 11.6cm、17.9g となり、成長の差は見られなかった。

終了時の閉鎖循環区の生残数は 1,534 尾 (生残率 99.0%)、掛け流し区は 1,545 尾 (生残率 99.7%) となり、生残率にも差は見られず、サクラマス飼育では閉鎖循環システムにより掛け流し飼育と同等の飼育が可能であることが示された。

水温は循環区で 12.9~14.0℃、対照区で 12.3~13.9℃、溶存酸素量は 9.5~10.6mg/l、対照区で 7.8~9.8mg/l、pH は循環区で 7.2~7.9、対照区で 7.0~7.3 であった (図 4、5、6)。

アンモニア態窒素濃度は閉鎖循環区、掛け流し区ともに徐々に増加し、最高濃度は閉鎖循環区で 0.11mg/l、掛け流し区で 0.16mg/l となり、総じて掛け流し区が高い傾向を示した (図 7)。2000 年版の水産用水基準では、淡水域のアンモニア態窒素濃度基準は 0.2mg/l であったが、2012 年版では 0.01mg/l とされている。本試験においては、閉鎖循環区のアンモニア態窒素濃度が掛け流し区より低い水準で推移し、またサクラマスの成長及び生残に影響が見られないことから、本閉鎖循環システムは、十分良好な環境を維持したものと考えている。

亜硝酸態窒素と硝酸態窒素は増加傾向を示し、終了時の亜硝酸態窒素は 0.13mg/l、硝酸態窒素は 200mg/l を超えて増加した (図 8、図 9)。

1 日に使用した水量は、閉鎖循環区では平均して約 47l であった。これは対照区のかけ流し飼育で 1 日に使用する水量約 57.6kl の 0.1% にあたり、大幅な節水効果が実証された。飼育期間を通して濾過槽の掃除は行わなかったが、ろ材の目詰まりや硝化能力の低下は見られなかった。

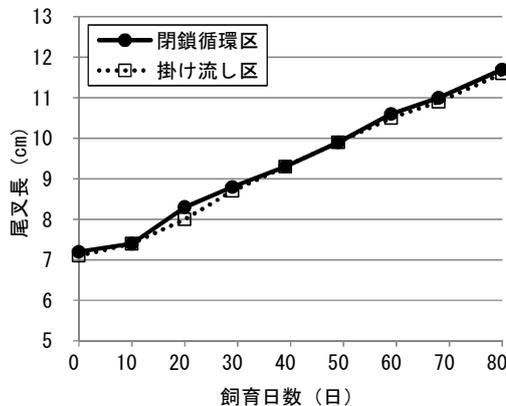


図 2. 閉鎖循環システムによるサクラマス幼魚飼育結果 (平均尾叉長)

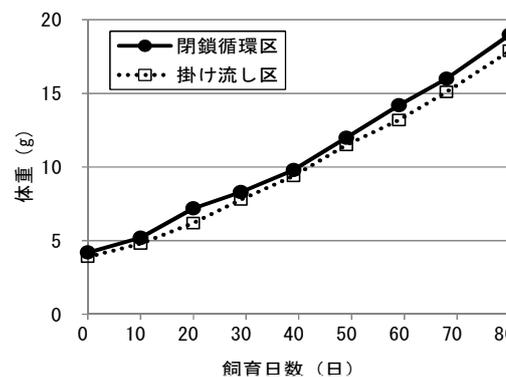


図 3. 閉鎖循環システムによるサクラマス幼魚飼育結果 (平均体重)

表 2. サクラマス幼魚閉鎖循環飼育結果

	閉鎖循環区		掛け流し区	
	開始時	80日目	開始時	80日目
平均FL (cm)	7.2	11.7	7.1	11.6
平均BW (g)	4.2	19.0	3.9	17.9
尾数 (尾)	1,550	1,534	1,550	1,545
生残率 (%)		99.0		99.7

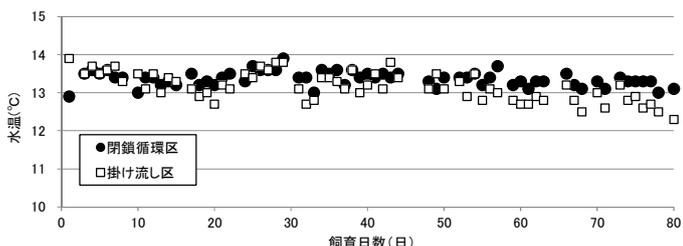


図 4. 幼魚飼育時の水温の推移

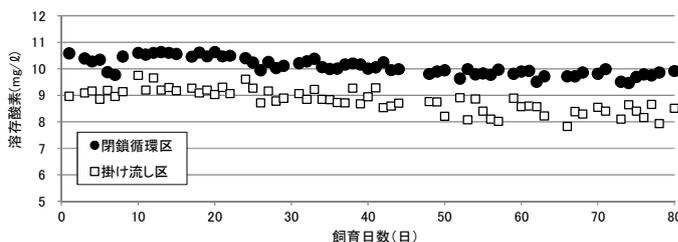


図 5. 幼魚飼育時の溶存酸素の推移

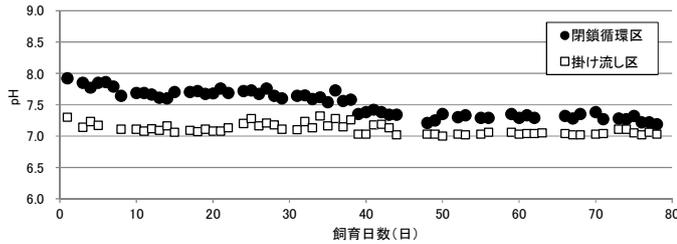


図 6. 幼魚飼育時の pH の推移

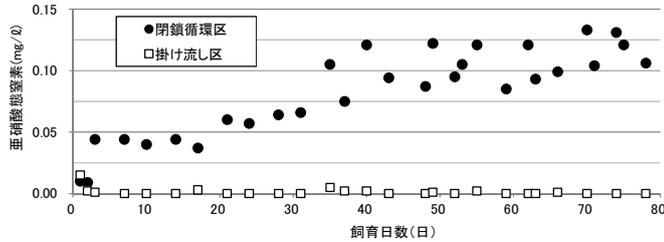


図 8. 幼魚飼育時の亜硝酸態窒素の推移

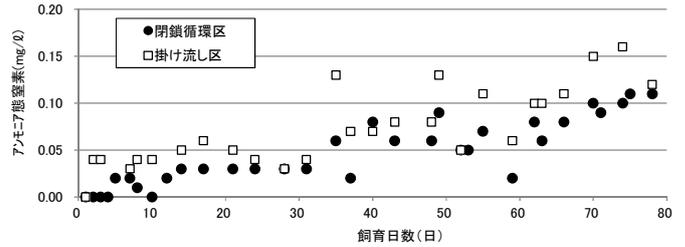


図 7. 幼魚飼育時のアンモニア態窒素の推移

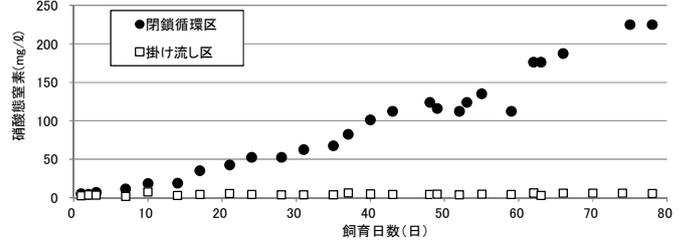


図 9. 幼魚飼育時の硝酸態窒素の推移

2. 稚魚飼育試験

材料と方法

幼魚飼育試験と同じ循環システムを使い、11月9日にサクラマス発眼卵20,000粒を循環区と掛け流し区へそれぞれ収容し、翌年3月11日までの124日間飼育を行った。卵管理と稚魚の飼育条件は表3のとおりとした。また閉鎖循環区では、ふ化仔魚の安静のために循環水量を36ℓ/分の一定水量とした。

閉鎖循環区では飼育開始直後からpHが上昇し4日目までに8.2に達したため(図9)、pHを下げる目的で5日目から99日目まで最大10ℓ/分の注水を続けた。このうち33日目から57日目までは循環施設を切り離し、掛け流しのみで飼育した。58日目から再び飼育水を循環利用し、99日目にpHが7.9前後で安定したため、99日目以降注水を止め、閉鎖循環により飼育した(図10)。飼育は123日目まで続け、102日目及び、123日目に各区で100尾の尾叉長及び体重を測定した。

飼育水の水温、溶存酸素、pHを1日1回水質チェッカー(HACH HQ-40d)により観測した。また1週間に1~2回の割合でアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素をポータブル吸光光度計(HACH DR900)により測定した。

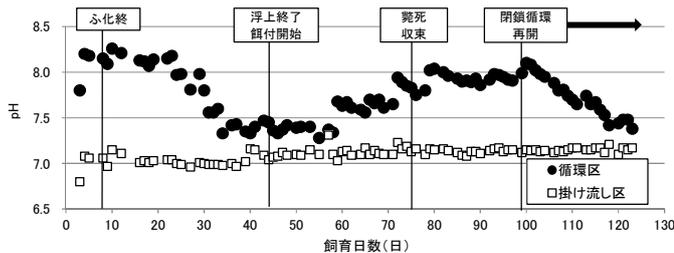


図 9. 稚魚飼育時の pH の推移

表 3. サクラマス稚魚飼育条件

卵管理	閉鎖循環区	掛け流し区
飼育槽	100×500×70cm水槽	小型浮上槽×2台
水深	16cm	—
注水量	—	10ℓ/分×2台
循環水量	36ℓ/分	—
その他	リングネットの上に ふ化盆を置き発眼卵収容	小型浮上槽
		31×31×25cm

稚魚飼育	循環区	掛け流し区
飼育槽	100(幅)×500(長さ)×70cm(深さ)	
水深	16cm→40cm	24cm→46cm
注水量	0.3ℓ/分~10ℓ/分→0	17ℓ/分~40ℓ/分
循環水量	36ℓ/分→150ℓ/分	—

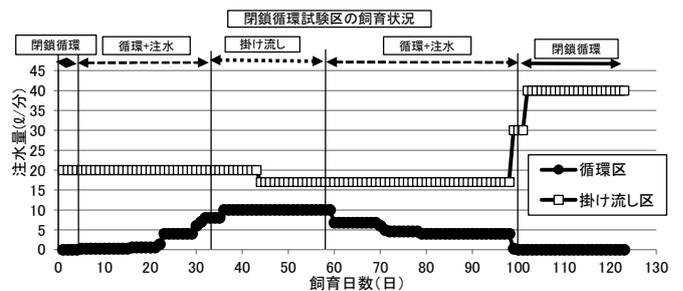


図 10. 稚魚飼育時の注水量

結果と考察

閉鎖循環区では卵収容 2 日目から pH が上昇し、4 日目には 8.2 に達し飼育魚への悪影響が懸念されたため、pH 調節を目的に 5 日目から 0.3ℓ/分で注水を行った。注水した湧水の pH は 7.0~7.3 であったにも関わらず、注水後も pH は低下せず、16 日目から斃死が目立ち始めた (図 11)。23 日目から注水量を 40/分に増加させたところ pH は 7.8~7.9 に低下したが斃死は続いた。33 日目に濾過槽を含む循環装置を止め、注水量を 10ℓ/分に増やし、通常のかけ流し飼育に戻したことで、34 日目以降 pH は 7.5 を下回るようになった。pH 低下後も斃死は継続し、44 日目の餌付け開始時までの累積斃死数は、7,040 尾 (約 35%) に及んだ (表 4)。斃死魚の鰓はこん棒状化しており、pH が高いことによる障害と考えられた。

57 日目までに斃死はある程度収まったため、58 日目から循環を再開し、注水と循環を併用しながら飼育した。その後、斃死は少ないながらも 76 日目まで続き、累積斃死数は 9,405 尾 (約 47%) に達した。循環を始めたことで、pH は再度上昇し 72 日目以降 pH8 前後で推移した。斃死は 76 日目までに収束した。

その後も pH は 8 前後と高めに推移したが斃死は見られず餌食もよいことから、99 日目に注水を止め、124 日目までの 22 日間を閉鎖循環により飼育した。閉鎖循環に移行してから pH は低下傾向を示し、118 日目以降は pH7.5 を下回るようになった。

全飼育期間中の水温は、閉鎖循環区で 10.6~12.8℃、掛け流し区で 9.8~12.6℃であった (図 12)。また、溶存酸素は、閉鎖循環区で 7.5~11.0mg/ℓ、掛け流し区で 4.7~10.3mg/ℓで、全体的に閉鎖循環区が高い傾向を示したが閉鎖循環区では飼育当初から斃死が多く、生残数が掛け流し区より明らかに少ないためと考えられる (図 13)。掛け流し区の溶存酸素量は、餌付けを開始した 44 日目以降成長に伴い酸素消費量が増えたことで減少し続け、124 日目には 5mg/ℓを下回った。

アンモニア態窒素濃度は、成長に伴い増加したが、閉鎖循環区が掛け流し区より高い状況は見られ

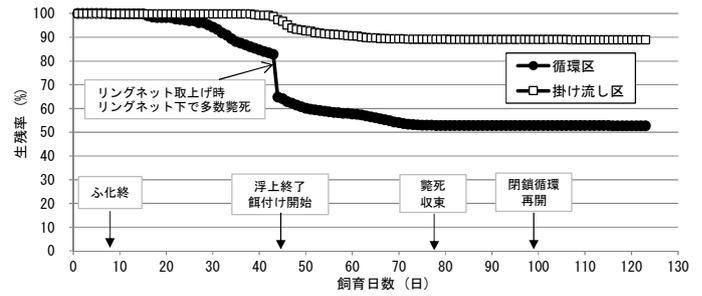


図 11. サクラマス稚魚の生残率の推移

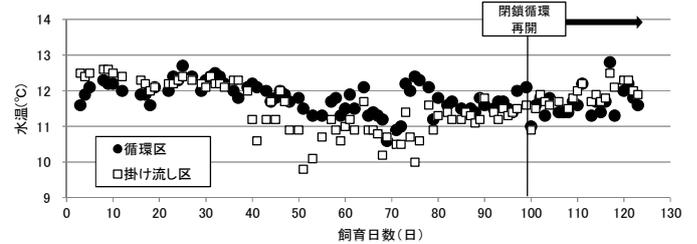


図 12. 稚魚飼育水温の推移

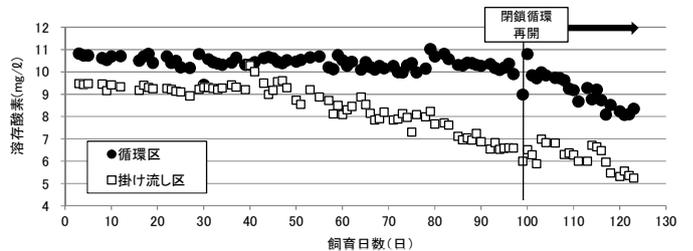


図 13. 稚魚飼育時の溶存酸素量の推移

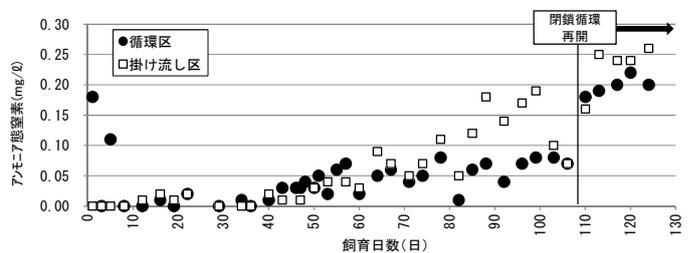


図 14. 稚魚飼育時のアンモニア態窒素濃度の推移

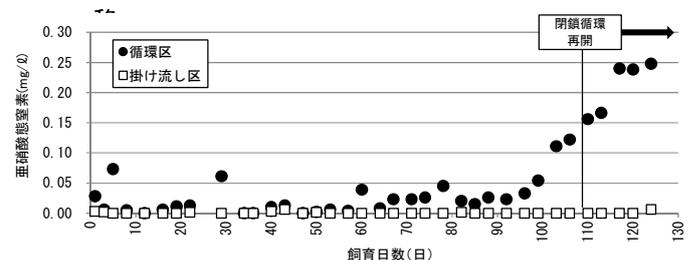


図 15. 稚魚飼育時の亜硝酸態窒素濃度の推移

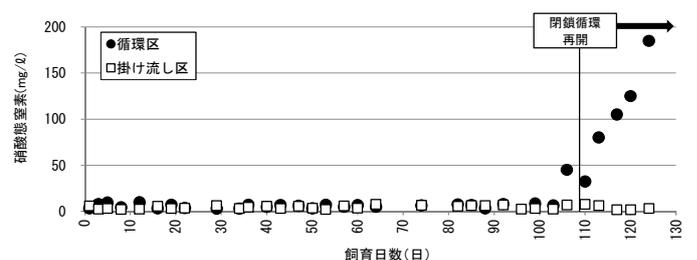


図 16. 稚魚飼育時の硝酸態窒素の推移

なかった（図 14）。また、亜硝酸態窒素及び硝酸態窒素濃度は、閉鎖循環区において注水を止めた 99 日目以降急激に増加した（図 15, 16）。

pH 上昇と斃死のために閉鎖循環飼育は 99 日目まで行えなかったため、99 日目以降の閉鎖循環飼育結果を示す。102 日目から 124 日目まで 22 日間の閉鎖循環区の生残率は 99.7%で、掛け流し区の同期間内の生残率 99.9%と同等であった（表 5）。閉鎖循環に移行してから、アンモニア態窒素は 0.2mg/l前後に上昇したが、成長及び生残への影響は見られなかった。102 日目の閉鎖循環区の平均尾叉長は 5.1cm、平均体重は 1.6g で 124 日目には平均尾叉長 6.6cm、平均体重 3.3g に成長した。閉鎖循環区では、ふ化から浮上までの期間に高い pH の環境におかれ最終的に半分近く斃死するなど課題が残ったが、99 日目以降の飼育状況から考えると閉鎖循環システムを使った稚魚の飼育も十分可能であると思われる。

稚魚飼育試験では、閉鎖循環区において pH が上昇し、pH7.0～7.3 の湧水を連続注水しても pH の低下は見られなかった。また、循環システム内を通った湧水は pH が上昇することが確認された。循環システムの導水管内にはオレンジ色の微生物群が付着しており、この微生物群を湧水に添加すると pH の上昇が確認された。以上のことから循環装置内に付着増殖した微生物群が用水の pH 上昇を生じさせていると考えられるが、詳細なメカニズムは不明な部分が多い。今後の実用化に向けて pH が高くなる要因及び対応策を検討する必要がある。

表 4. サクラマス発眼卵の飼育結果

	卵収容後 日数	閉鎖循環区		掛け流し区	
		期間 斃死数 (個体)	生残数 (%)	期間 斃死数 (個体)	生残率 (%)
発眼卵収容	1		20,000		20,000
ふ化終了	1～8日目	22	19,978 99.9	36	19,964 99.8
浮上終了					
餌付け開始	8～44日目	7,018	12,960 64.8	487	19,477 97.4
斃死収束	44～76日目	2,365	10,595 53.0	1,642	17,835 89.2
閉鎖循環開始	76～99日目	23	10,572 52.9	15	17,820 89.1
閉鎖循環飼育中	99～124日目	36	10,536 52.7	24	17,796 89.0

表 5. サクラマス稚魚の飼育結果

卵収容後日数	閉鎖循環区		掛け流し区	
	102日目	124日目	102日目	124日目
平均FL (cm)	5.1	6.6	5.5	7.0
平均BW (g)	1.59	3.3	2.08	3.9
尾数(尾) ^{※1}	10,000	9,970	17,000	16,978
生残率 (%)		99.7		99.9
収容量(kg/m ³) ^{※2}		18.1	2.6	31.6

※1 102日目生残数を取り上げ斃死魚数から閉鎖循環区を10,000尾、掛け流し区を17,000尾とした。

124日目生残尾数は期間内の斃死魚を差し引いた尾数とした。
 ※2 飼育水量は閉鎖循環区1.8m³、掛け流し区2.1m³で換算した。