

富士の介のスマルト化とそれに伴う特性の変化

平塚 匡・加地奈々・青柳敏裕

富士の介はニジマス *Oncorhynchus mykiss* 雌及びマスノスケ *O.tshawytscha* (英名：キングサーモン) 偽雄を交配した山梨県開発の全雌異質三倍体魚¹²⁾で、親譲りの希少性や味の良さ³⁴⁾、山梨の名水育ち等、数多くの強みが高く評価され、2019年10月の流通開始以降、消費地等からの需要は堅調に推移している。他方で、富士の介は飼育が難しいとされるマスノスケを片親に持つことから、ニジマスに比べハンドリングストレスに弱い等、特に成魚期以降の取り扱いの難しさが生産面での課題となっている。近年、マス類養殖で甚大な被害を及ぼしているウイルス病として伝染性造血器壊死症(以降、IHN)があるが⁹⁾、富士の介はニジマスに比べIHNウイルス(以降、IHNV)に対して優れた抗病性を有することが報告されている一方⁶⁸⁾、一部の養魚場では成魚サイズ以上での本病による被害が散見され、富士の介のIHNVに対する感受性が成魚期に上昇する可能性も示唆されている⁸⁾。このように、富士の介は成長とともに魚種としての特性に何らかの変化が生じているとも考えられ、その要因としてサケ科魚類特有のスマルト化(銀化変態)の影響が懸念されたが、富士の介のスマルト化に関する詳細な知見はこれまでに得られていない。

そこで本研究では、富士の介のスマルト化について基礎的知見を得るため、主に体サイズの観点からスマルト化のタイミングを確認し、親魚種のそれと比較検討した。さらに、スマルト化に伴い富士の介の魚種特性(鱗の剥離し易さ、IHNVに対する感受性)に変化がみられるか否かについても併せて検討した。

材料及び方法

スマルト化サイズの把握と鱗の剥離し易さの評価

富士の介のスマルト個体の出現サイズを明らかにするため、親魚種(ニジマス及びマスノスケ)を含めた経時的な観察を行った。また、3魚種のスマルト化に伴う鱗の剥離し易さの変化についても併せて評価した。

供試魚は2022年10月に作出した富士の介、ニジマス(ドナルドソン系⁹⁾、全雌三倍体)、マスノスケ(通常二倍体)各450尾を用い、試験開始時の平均体重はそれぞれ10.3g、10.4g、9.1gであった。供試魚はそれぞれFRP製水槽(L170×W45×D40cm)に収容し、12.5℃の地下水を掛け流しながら飽食給餌にて飼育を行った。

スマルト化段階の確認及び鱗の剥離し易さの評価は、2023年8月14日から2024年4月2日までの間、3週間置きに計11回実施した。各魚種無作為に5尾抽出し、個体別に外観を目視観察することでスマルト化の有無を確認した。スマルト化の判定は、その進行具合からパー(スマルト化前)、中間(スマルト化途上)、スマルトの3段階(図1)とし、その判定基準は概ね表1に則った。

スマルト化確認後の個体は、FA100(DSファーマアニマルヘルス社)溶液にて麻酔をかけ、体重及び標準体長(以下、体長)を測定後、鱗の剥離し易さの評価に供した。鱗の剥離し易さの評価は、スライドグラス(松波硝子工業株式会社)を体表に押し付けながら、頭側から尾側に向かって体表粘液ごと鱗を掻き取る方法で行い、これを背側、側線付近、腹側の3部位で実施した。なお、魚種間で手技等の偏りが生じないよう、3魚種をローテーションしながら確認等を行った。採取した鱗は個体別に蒸留水を入れたシャーレに入れ、実体顕微鏡下で枚数をカウントした。一連の確認を行った個体については、その後供試魚群には戻さず除外した。

なお、マスノスケについては、上記試験開始時点で既にパー個体が確認されなかったため、2024年10月作出群（通常二倍体）を用いてスマルト化段階の確認のみを追加で行った。確認は2025年4月24日、5月9日及び20日、7月1日及び25日の計5回行い、方法は前述と同法とした（5月20日のみ10尾確認し、計30尾追加確認）。

表1 スマルト化段階の判定基準

	パー	中間	スマルト
パーマーク	全体的に鮮明	やや鮮明	極めて薄いまたは消失
体色	全体的に暗い (背部が暗緑色)	やや明るい (腹部が銀白色)	全体的に明るい (背部が青緑色、腹部が銀白色)
体高	普通(高め)	普通	低め
鱗色(背鱗・尾鱗)	全体的に無色	全体的に無色	末端が黒色

パー及びスマルト個体の IHN に対する感受性比較

スマルト化前後で富士の介の IHN に対する感受性に差異があるかを評価するため、パー及びスマルト個体を用いた感染実験を行った（試験1）。また、パー及びスマルト個体の IHN に対する感受性がストレス負荷により変化するかを調べるため、ウイルス感染前に網揉み処理を施した感染実験も行った（試験2）。

試験1ではスマルト化段階の確認等に使用した富士の介（2022年10月作出）と同一群を供試魚として用いた。試験区はパー区及びスマルト区の2区とし、供試尾数は各20尾とした。供試魚の選別は2024年2月5日に行い、供試魚の平均体重はパー区が $61.4 \pm 4.8\text{g}$ （平均体重±標準偏差、以下同様）、スマルト区が $61.7 \pm 5.9\text{g}$ であった。

供試ウイルスは、県内の民間養魚場で養殖されている富士の介（平均体重 $2,381\text{g}$ ）から2021年6月に分離された IHN (YFTV2110) 株を使用し（前報⁸⁾と同株）、前報と同法によりウイルス液の調整等を行った。実験感染は、2024年2月7日に注射法により行った。供試ウイルス液を MEM-2 で希釈し、 $10^{6.1}\text{TCID}_{50}/\text{尾}$ となるよう各供試魚の腹腔内に 0.1mL 注射した。注射は FA100 溶液にて麻酔をかけた供試魚を飼育水でリンスし、タオルで体表の水分を軽く拭き取った後、供試魚の両腹鱗の中心と両胸鱗の中心を結ぶ線の間あたりの位置に行った。なお、注射技術や試験区間の差を極力無くするため、職員2~3名で各区を概ね同尾数処理するとともに、一定尾数毎に試験区をローテーションしながら注射した。攻撃後はポリプロピレン製のコンテナ水槽（ $L64 \times W44 \times D38\text{cm}$ ）に供試魚をそれぞれ収容し、 12.5°C の地下水を毎秒 50mL でかけ流しながら、魚体重の 0.6% の配合飼料を概ね平日の5日間給餌し飼育を行った。試験期間は50日間とし、毎日死亡魚の確認及び回収を行うとともに、死亡が確認された場合は症状の観察と EPC 細胞あるいは CHSE-214 細胞を用いた腎臓あるいは脾臓からのウイルス分離を行い、接種後の CPE の形態から死因が IHN であることを確認した。

試験2では2023年作出群の富士の介を使用し、試験区はパー無処理区、パー網揉み区、スマルト無処理区、スマルト網揉み区の4区、供試尾数は各20尾とした。供試魚の選別は2024年10月4日に行い、供試魚の平均体重はパー無処理区、パー網揉み区、スマルト無処理区、スマルト網揉み区の順に $87.3 \pm 3.3\text{g}$ 、 87.4 ± 4.5 、 $87.3 \pm 4.0\text{g}$ 、 $87.4 \pm 4.5\text{g}$ であった。

供試ウイルスは試験1と同株を使用し、実験感染は2024年10月7日に行った。パー網揉み区及びスマルト網揉み区の供試魚については、ウイルス攻撃前にそれぞれ網揉み処理を施した。網揉みは、供試魚20尾をタモ網（直径 400mm 、深さ 350mm 、目合 7mm 、ナイロンラッセル）に入れ、フレーム部分を持ちながら空気中で水平方向に1分間回転（80回転/1分間）させることで行った。本処理による供試魚の死亡を極力防ぐため、処理後1時間程度コンテナ水槽に収容し、死亡がみられないことを確認した後に注射攻撃に移行した。なお、注射攻撃及びその後の一連の作業等については、試験1と同様の方法で行った。

結果

スマルト化サイズの把握と鱗の剥離し易さの評価

富士の介及び親魚種のサイズ毎のスマルト化段階の判定結果（マスノスケ追加実施分も含む）を図 2，魚種別の各段階の鱗の平均剥離枚数を図 3 に示した。さらに，体長と鱗の剥離枚数及びスマルト化の関係を 3 魚種で比較したものを図 4 に示した。

富士の介（確認サイズ 8.6～20.5cm）では，ペアが 8.6～15.3cm（計 28 尾）の範囲でみられ，中間が 13.4～16.4cm（計 8 尾），スマルトが 15.0～20.5cm（計 19 尾）でそれぞれ出現が確認された（図 2）。ニジマス（確認サイズ 7.8～19.6cm）においては，ペアが 7.8～17.4cm（計 41 尾）でみられ，中間が 17.4～18.1cm（計 4 尾），スマルトが 16.4～19.6cm（計 10 尾）で出現した。マスノスケ（確認サイズ 8.6～18.2cm）については，確認サイズで既にペアは認められず，中間が 8.6～12.1cm（計 9 尾），スマルトが 8.9～18.2cm（計 46 尾）で出現が認められた。より小型サイズから実施した追加確認では（確認サイズ 6.9～12.1cm），ペアが 6.9～7.8cm（計 8 尾）でみられ，中間が 8.1～9.4cm（12 尾），スマルトが 9.9～12.1cm（10 尾）で出現した。3 魚種のスマルトの出現サイズは，マスノスケ（8.9cm）が最も早く，次いで富士の介（15.0cm），ニジマス（16.4cm）の順となった（図 2，4）。

スマルト化段階毎の鱗の平均剥離枚数は，ペア，中間，スマルトの順に富士の介で 23.5 ± 9.3 枚（ $n=28$ ）， 58.4 ± 20.3 枚（ $n=8$ ）， 77.5 ± 23.3 枚（ $n=19$ ），ニジマスで 19.5 ± 12.3 枚（ $n=41$ ）， 45.8 ± 5.3 枚（ $n=4$ ）， 48.0 ± 16.1 枚（ $n=10$ ），マスノスケで ND， 42.7 ± 16.2 枚（ $n=9$ ）， 90.6 ± 27.3 枚（ $n=46$ ）となり，3 魚種ともスマルト化に伴い鱗の剥離枚数が増加する傾向がみられた（図 3）。成長に伴う鱗の剥離枚数の変化（増加の傾向）については，マスノスケと富士の介で類似した傾向を示した一方，ニジマスは緩やかであった（図 4）。

なお，マスノスケについては成長に伴いほぼ全ての個体でパーマークが消失し，体色の銀白化，背鰭及び尾鰭先端の黒色（つま黒）化といったスマルト特有の特徴が確認できた（図 1）。富士の介では，大半の個体でパーマークの消失や背鰭及び尾鰭先端の黒色化が認められたが（図 1），一部でパーマークが僅かに残存する，尾鰭先端の黒色化がみられない個体も確認された。ニジマスにおいては，パーマークが完全に消失した個体は少なく，背鰭先端が黒色化した個体はみられなかった。



図 1 富士の介及び親魚種のスマルト化段階の例

(A：ペア B：中間 C：スマルト)

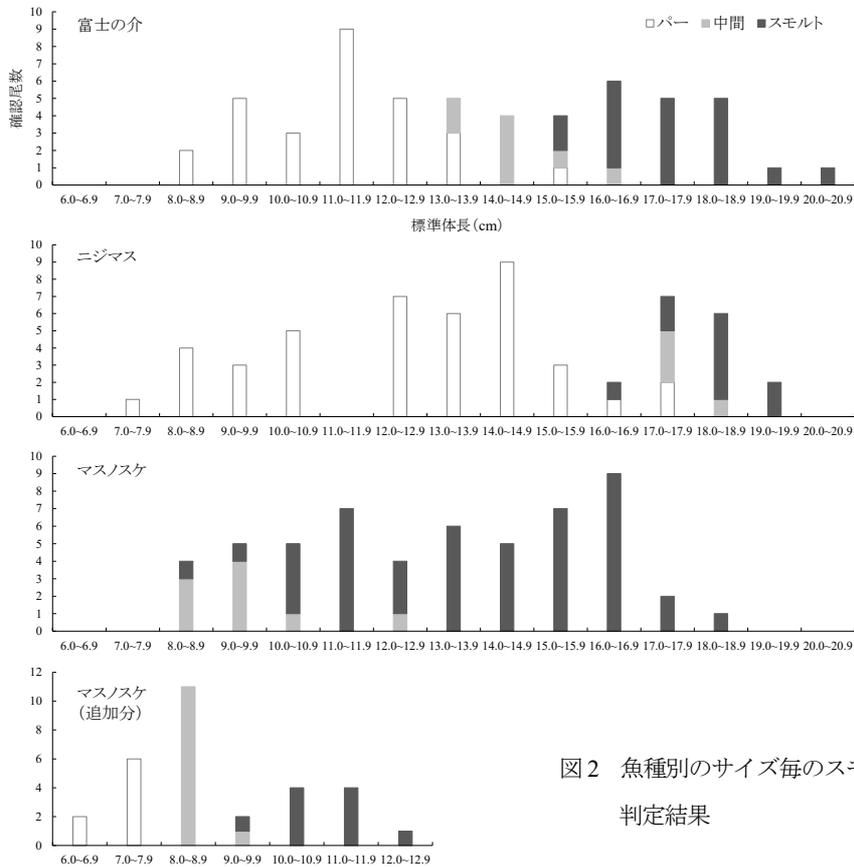


図2 魚種別のサイズ毎のスモルト化段階判定結果

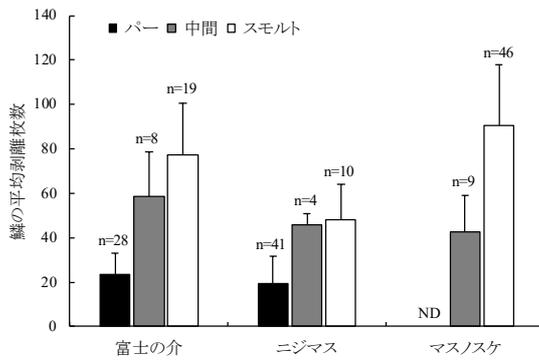


図3 魚種別のスモルト化段階毎の鱗の平均剥離枚数
※マスノスケはパー個体無し

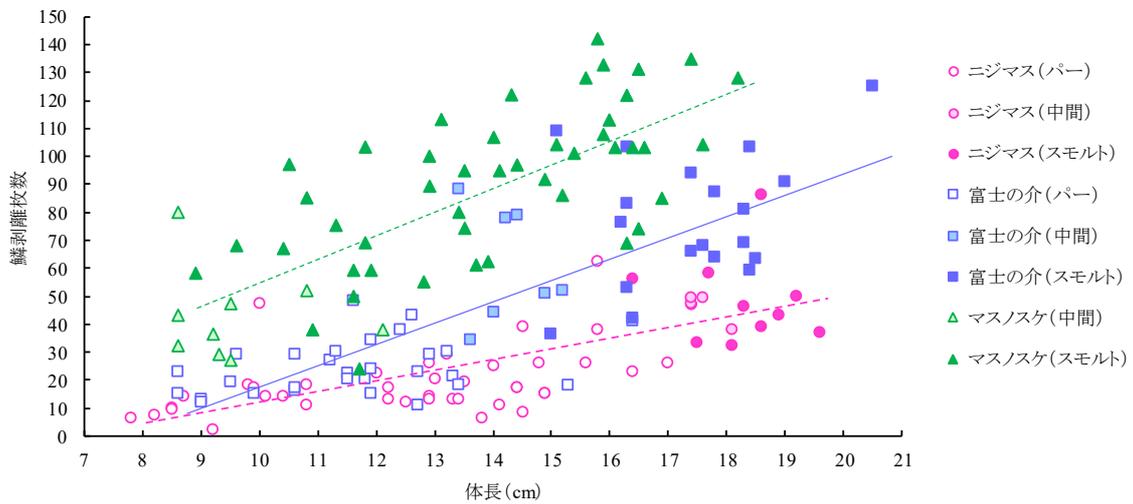


図4 体長と鱗の剥離枚数及びスモルト化段階の関係 (3魚種比較・個体別)

パー及びスモルト個体の IHN に対する感受性比較

富士の介パー及びスモルト個体に IHNV を実験感染させた際の累積死亡率等の結果を表 2、累積死亡率の推移を図 5 に示した (試験 1)。また、パー及びスモルト個体に対し網揉み処理を施した後に IHNV を実験感染させた際の累積死亡率等の結果を表 3、累積死亡率の推移を図 6 に示した (試験 2)。

試験 1 のパー区及びスモルト区の累積死亡尾数はそれぞれ 6 尾及び 15 尾で、累積死亡率は 30.0%、75.0% となり (表 2、図 5)、パー区に比べスモルト区で有意に死亡率が高くなった ($p=0.0104$, フィッシャーの正確確率検定)。なお、死亡魚からウイルス分離では、全ての個体から IHNV が再分離された。

試験 2 の累積死亡尾数は、パー無処理区、パー網揉み区、スモルト無処理区、スモルト網揉み区の順に 7 尾、4 尾、5 尾、5 尾となった (表 3)。うちパー網揉み区の 1 尾 (攻撃翌日死亡個体) で IHNV が再分離されなかったことから、累積死亡率については 35.0%、15.0%、25.0%、25.0% となり、試験区間に有意差は認められなかった (表 3、図 6, $p>0.05$, Tukey の母比率の検定)。網揉み処理を行った試験区では、パー及びスモルトいずれにおいても概ね同程度の鱗の剥離が認められたが、攻撃翌日に死亡したパー網揉み区の個体については、死亡時に過度な擦れ症状 (鱗の剥離) がみられた。

死亡魚の症状については両試験ともに IHN 特有の症状がみられ、すなわち、外観症状としては体色黒化や眼球突出、腹部膨満等、解剖所見としては鰓の貧血や肝臓の褪色、脾臓の肥大、脂肪の点状出血等が認められた。なお、パーとスモルトの間でこれら症状に差異はみられなかった。

表 2 IHNV 感染試験結果 (試験 1)

試験区	パー	スモルト
供試尾数	20	20
累積死亡尾数	6	15
IHNV 再分離尾数	6	15
累積死亡率 (%) ※	30.0	75.0*

※ 数値は死因が IHN に因るもの (IHNV 再分離尾数/供試尾数) を表す。

※ * $p < 0.05$ (フィッシャーの正確確率検定)

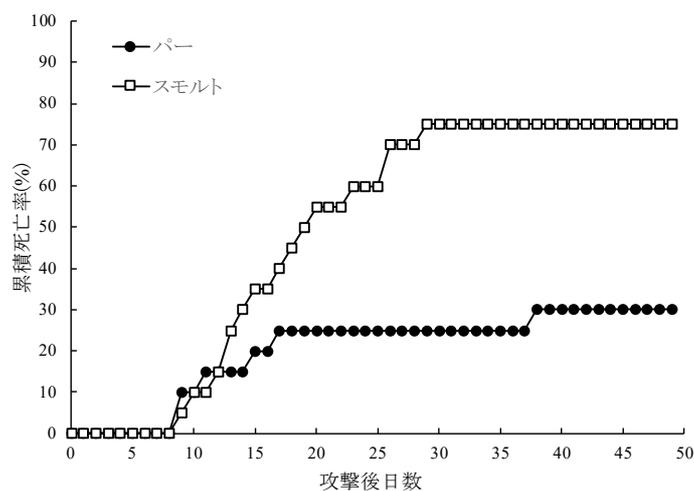


図 5 IHNV 感染時の累積死亡率の推移 (試験 1)

(供試魚平均体重: 約 61g 攻撃濃度: $10^{6.1}$ TCID₅₀/尾)

表3 IHNV感染試験結果（試験2）

試験区	パー		スマルト	
	無処理	網揉み	無処理	網揉み
供試尾数	20	20	20	20
累積死亡尾数	7	4	5	5
IHNV再分離尾数	7	3	5	5
累積死亡率(%)*	35.0	15.0	25.0	25.0

* 数値は死因がIHNVに因るもの(IHNV再分離尾数/供試尾数)を表す。

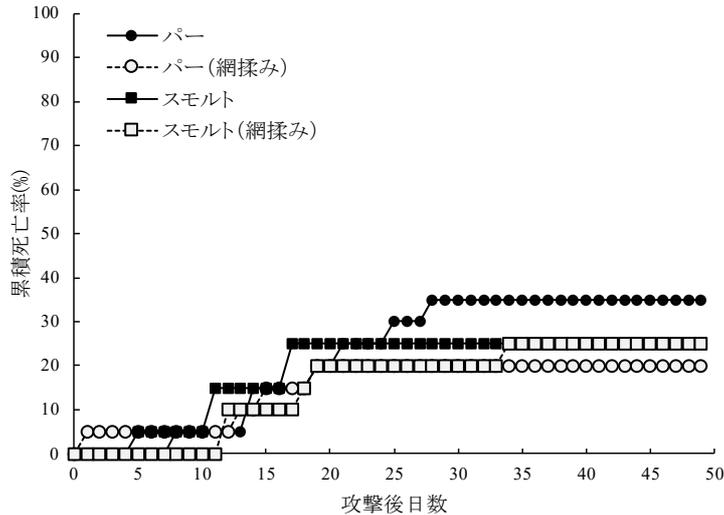


図6 IHNV感染時の累積死亡率の推移（試験2）

(供試魚平均体重：約87g 攻撃濃度： $10^{6.1}$ TCID₅₀/尾)

考察

サケ科魚類は川から海へ生活場所を移動することが知られているが、この降海移動に先立ち海洋生活に適応した形態学的、生理学的あるいは行動学的な一連の変化が生じ¹⁰⁾、この特有の変化過程をスマルト化（銀化変態）と呼ぶ。スマルトの特徴として、パーマークの消失や体色の銀白化、背鰭や尾鰭先端の黒色化（つま黒化）、体高の低下、鱗が剥がれ易くなる等がサクラマス *O.masou* において報告されており¹¹⁾、その他にパーとは疾病に対する感受性に差異があるとも言われている¹²⁾。また、スマルト化には体サイズや体成長が密接に関与していることがいくつかの魚種で報告されている^{11,13,14)}。富士の介のスマルト化の詳細についてはこれまで調べられておらず、本知見を得ることは養殖業者に対して指導等をする上で有用となる他、現在生産現場で課題となっている成魚サイズ以上での取り扱いの難しさや、一部の養魚場におけるIHNV被害に対するスマルト化の関与を検証する上でも重要な情報になると思われる。

そこで、本報では富士の介のスマルト化の詳細を把握するため、親魚種を含めた成長段階（サイズ）毎のスマルト化段階の状況等を調べた。その結果、富士の介は標準体長13cm（体重45g）程度で中間が現れ始め、15cm（55g）程度でスマルトが出現することが明らかとなった。他方で、ニジマスは17cm（75g）程度で中間あるいはスマルト、マスノスケは8cm（9g）程度で中間、10cm（15g）程度でスマルトが出現し、富士の介は親魚種の中間の傾向となることが示された。他魚種においては、アマゴ *O.masou ishikawae* が標準体長12cm以上、ビワマス *O.bivaensis* が8cm以上でスマルト化することが報告されており¹³⁾、体サイズの観点では富士の介はアマゴと近い傾向を示すものと思われた。中間あるいはスマルト個体の出現頻度（スマルト化率）については、マスノス

ケで高く、次いで富士の介となり、ニジマスは低かった。これらより、富士の介はニジマスに比べスモルト化するタイミングが早く（サイズが小さく）、スモルト化し易い特性を有することが明らかとなった。

鱗の剥離し易さについては、マスノスケで最も剥がれ易い傾向がみられ、次いで富士の介、ニジマスの順となった。実際に、養殖現場等での選別や取り上げ作業において、富士の介はニジマスよりも鱗が多く剥がれるとの情報もあり、本結果を支持している。また、3魚種で強弱はあるものの、共通してスモルト化した個体では鱗の剥離枚数が増加する傾向がみられた。サクラマスのスモルトの表皮はパーのそれよりも薄く、鱗も剥離し易いと言われており¹⁵⁾、本知見とも同様の結果を示したと言える。一般に魚類の鱗は外部からの防御機能を果たし、これらが剥がれることは生体防御能力の低下、さらには感染症の発生等のリスクに繋がるものと思われる。富士の介の取り扱いが難しい要因の一つとして、ニジマスとの鱗の剥がれ易さの違いが強く影響している可能性も考えられた。

パー及びスモルトのIHNVに対する感受性に差異があるかを評価した感染実験（試験1）では、スモルトの累積死亡率は75%とパーの35%より有意に高い結果となった。アマゴやサクラマスではスモルトの方がパーよりせつそう病及びピブリオ病原菌に対する感受性が高いことが報告されており、これはスモルト化による皮膚構造や免疫関連細胞数等の魚体の防御機構全体の変化が関与しているものと推察されている¹²⁾。富士の介においても同様に、スモルト化による魚体内の変化がIHNVに対する感受性を変化させた可能性が示唆された。また、前報⁸⁾において成長段階毎に行った感染実験では、約60g~150gサイズ間でIHNVへの感受性に変化が認められ、これは一部の養殖現場で問題となっている成魚サイズ以上でのIHNVによる被害の実態と良く一致していた。本報

（試験1）で用いたスモルト区の供試魚のサイズは約61gであり、前報の感受性に変化がみられた魚体サイズとも辻褄が合う。これらのことから、前報⁸⁾感染実験の成魚期での感受性の上昇及び養殖現場での成魚サイズ以上でのIHNV被害の原因として、スモルト化が大きく関与している可能性を更に強く示唆するものと考えられた。

網揉み処理を施した感染実験（試験2）では、試験区間で大きな差はみられなかった。本試験では腹腔内注射により攻撃を行ったが、浸漬感染により感染経路を体表等とすることでより網揉み処理による効果を得られたかもしれない。パーとスモルト間で差がみられなかった点については、供試魚選別の際にパーとした個体が既に中間やほぼスモルトの段階になっていた可能性も考えられ、これは供試サイズ（約87g）や網揉み時の鱗の剥がれ方に差異がみられなかったことから疑われるところである。また、試験1と比べ全体的に累積死亡率が低い結果となったが、IHNVに対する感受性は成長に伴って低下することがニジマス¹⁶⁾¹⁷⁾やサクラマス¹⁸⁾、富士の介⁸⁾において報告されており、試験2は試験1より供試魚サイズが大きくなったことで抵抗性が働いた可能性も考えられた。より正確な評価をするためには、供試魚や攻撃方法、攻撃濃度等、各種条件の再検討が必要と思われた。

以上の結果より、富士の介はニジマスに比べスモルト化し易い魚種であり、その時期も早いことが明らかとなった。また、本変化を経ることで、鱗の剥離し易さやIHNVに対する感受性といった富士の介の魚種としての特性に変化がみられる可能性が示されたことから、スモルト化の兆候がみられる富士の介の選別や取り上げ、池移動等する場合は、より慎重かつ丁寧な取り扱いが必要と考えられる。

要 約

1. 富士の介のスモルト化の詳細を把握するため、主に体サイズの観点からスモルト化のタイミングを親魚種も含め確認、比較した。また、スモルト化に伴う富士の介の特性（鱗の剥離し易さ、IHNVに対する感受性）の変化の有無についても併せて検討した。
2. 富士の介及び親魚種でスモルト個体の出現サイズは、富士の介が標準体長15cm前後、ニジマスが17cm前後、マスノスケが10cm前後となり、富士の介は親魚種の中間の傾向を示した。
3. 成長段階毎の鱗の剥離枚数を確認した結果、マスノスケが最も剥がれ易く、次いで富士の介、ニジマスの順

となった。3魚種で強弱はあるものの、スマルト化するに従い鱗の剥離枚数が増加する傾向がみられた。

4. 富士の介パー及びスマルト個体の IHNV に対する感受性の差異を感染実験により評価したところ、スマルト個体の方がパー個体より IHNV への感受性が高い可能性が示唆された。
5. 富士の介はニジマスに比べスマルト化し易い魚種であり、それに伴い一部特性も変化する可能性が示されたため、当該時期の富士の介の選別や取り扱い等については細心の注意が必要と考えられた。

文 献

- 1) 三浦正之 (2017) : 山梨県開発の新養殖魚について : ニジマス×マスノスケの全雌三倍体魚. アクアネット 5月号, 20 (5) , 56-60.
- 2) 平塚匡・小澤諒 (2020) : キングサーモンの優れた性質を受け継ぐ日本で唯一の養殖魚「富士の介」. JATAFF ジャーナル. 公益社団法人 農林水産・食品産業技術振興協会, 8 (1) , 40-41.
- 3) 平塚匡・三浦正之 (2019) : 山梨県の新たな地域特産魚「富士の介」の肉質評価. 山梨県水産技術センター事業報告書, 46, 10-19.
- 4) 平塚匡・三浦正之 (2022) : 富士の介と海面養殖サーモンの肉質の比較. 山梨県水産技術センター事業報告書, 49, 6-11.
- 5) 西澤豊彦・吉水守 (2017) : 伝染性造血器壊死症. 魚病研究, 52, 1-5.
- 6) 小澤諒・三浦正之・岡崎巧 (2019) : 富士の介のせつそう病菌及び IHNV に対する感受性試験. 山梨県水産技術センター事業報告書, 46, 20-25.
- 7) 小澤諒・三浦正之 (2020) : 富士の介の IHNV に対する感受性試験. 山梨県水産技術センター事業報告書, 47, 13-17.
- 8) 平塚匡・加地奈々・青柳敏裕・三浦正之・井上孝太郎・難波亜紀・間野伸宏 (2025) : 富士の介及び親魚種の伝染性造血器壊死症ウイルス (IHNV) 富士の介分離株に対する感受性. 山梨県水産技術センター事業報告書, 52, 38-49.
- 9) 高橋一孝・大森義忠・天野きみ子 (1985) : 多産系ドナルドソンニジマス (D9) の飼育成績について. 山梨県魚苗センター事業報告書, 13, 63-70.
- 10) 伴真俊 (2002) : 日本産ベニザケ増殖のための生理学的アプローチ. さけ・ます資源管理センターニュース, 8, 1-7.
- 11) 久保達郎 (1974) : サクラマス幼魚の相分化と変態の様相. 北海道さけ・ますふ化場研究報告, 28, 9-26.
- 12) 森川進 (1989) : せつそう病に関する研究XVII サクラマスおよびアマゴのスマルトおよびパーの細菌性疾病に関する差異. 岐阜県水産試験場研究報告, 34, 9-15.
- 13) 藤岡康弘 (1987) : ビワマスのパー・スマルト変態. 日水誌, 53 (2) , 253-260.
- 14) 伴真俊・東照雄 (2004) : 支笏湖と中禅寺湖に分布するヒメマスのスマルト化. さけ・ます資源管理センター技術情報, 170, 9-15
- 15) 久保達郎 (1980) : 北海道のサクラマスの生活史に関する研究. 北海道さけ・ますふ化場研究報告, 34, 1-95.
- 16) 河西一彦・米沢純爾・小野淳・長谷川敦子・本間智晴・福田穎穂 (1993) : ニジマスの成長に伴う伝染性造血器壊死症 (IHN) に対する感受性の変化. 魚病研究, 28, 35-40.
- 17) 中居裕 (1994) : 伝染性造血器壊死症 (IHN) に関する研究-I 大型魚由来分離株のニジマスに対する病原性. 岐阜県水産試験場研究報告, 39, 37-44.
- 18) 鈴木邦夫・坂井勝信 (1991) : IHN ウイルスのサクラマス稚魚および幼魚に対する病毒性の差異. 北海道水産孵化場研報, 45, 23-27.