短 報

清水時と濁水時におけるイワナの
半天然魚と養殖継代魚の移動性比較山下耕憲,^{1,2*} 鈴木究真³

(2018年10月9日受付, 2018年12月26日受理,

2019年3月15日J-STAGE早期公開)

¹群馬県水産試験場川場養魚センター,²東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科,³群馬県水産試験場Comparison of movement between semi-native and
hatchery-reared white-spotted char *Salvelinus leucomaenis* strains in clear and turbid water conditionsYASUNORI YAMASHITA^{1,2*} AND KYUMA SUZUKI³¹Kawaba Branch, Gunma Prefectural Fisheries Experiment Station, Kawaba, Gunma 378-0114, ²Graduate School of Marine Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology, Minato, Tokyo 108-8477, ³Gunma Prefectural Fisheries Experiment Station, Maebashi, Gunma 371-0036, Japan

キーワード: 系統, 実験水路, 増殖, 遡上性, 稚魚, ハイブリッド, 放流

イワナ *Salvelinus leucomaenis* は漁業権対象魚種として、内水面の漁業協同組合に漁業権が免許され、多くの場合、漁業協同組合は稚魚放流によって増殖義務を遂行し、遊漁や漁業が維持されている。¹⁾ 放流に用いられる溪流魚の多くは、養魚場で長期養殖継代された魚(養殖継代魚)である。一般的にサケ科魚類の養殖継代魚は天然魚(その川の在来個体群の魚)や野生魚(その川の在来個体群ではないが、自然繁殖由来の魚)よりも放流後の自然界における適応能力が低いことや、放流後の生残率が野生魚よりも低いことが明らかになっている。²⁻⁴⁾ そのため日本のイワナにおいても、継代魚の自然界における適応力や生残率が低いことが懸念される。しかしながら、放流によって遊漁や漁業が維持されている現状や養殖業への影響を考えると、放流による増殖をすぐに中止することは難しい。¹⁾ したがって、放流効果の高い稚魚放流手法が内水面の漁業協同組合や養殖業者から求められている。近年、稚魚放流における生残率向上手法の1つとして、在来個体群のオスと養殖継代魚のメスから作出した系統(半天然魚)や、半天然魚の代わりに野生魚のオスを用いて作出した系統(半野生魚)を放流する手法が考案され、実際に河川におけるイワナ半天然魚の生残率は養殖継代魚よりも高いことが明らかにされている。⁵⁾ しかしながら、その放流効果が高い要因は明らかにされていない。

魚類の生残率に直接的および間接的に影響を与える要

因として、濁水が挙げられる。河岸の崩壊や洪水やダムの放水、河川工事等によって生じる濁水は、魚類に対して生残率の低下、摂餌頻度や捕食効率の低下に伴う成長の低下、身体の損傷、およびストレス反応の影響を与える。⁶⁻¹⁰⁾ 特に、アユ *Plecoglossus altivelis* やサケ科魚類では河川において濁水の原因である懸濁物質を嫌忌し、流下行動が誘引される。¹¹⁻¹³⁾ 現在、渓流域には著しい数の堰堤が設置されており、多くの堰堤では魚道が設置されていないか、設置されていても魚類の移動に有効でない。¹⁴⁾ そのため、イワナやヤマメ *Oncorhynchus masou* といったサケ科魚類は、堰堤から流下はできるが遡上はできず、上下非対称の移動分散を強いられている。このような環境では、それらの河川工作物よりも流下することは二度と同じ場所には戻れないことを意味する。

これらのことから、養殖継代魚と半天然魚の放流後生残率の違いにも河川の懸濁物質が関連している可能性がある。サケ科魚類に対する濁水の影響について、研究事例は多く存在するが、^{6,7,11-12)} 同種の系統間での濁水に対する反応の違いに注目した研究事例は見当たらない。そこで、本研究では清水と濁水の2通りの実験水路の条件で、イワナの養殖継代魚と半天然魚の2系統間の移動性を比較し、実験水路の条件と系統の違いによる河川放流直後におけるイワナの移動性の違いを明らかにすることを試みた。

供試魚として養殖継代魚と半天然魚のイワナを用いた。養殖継代魚には1983年秋に群馬県利根郡川場村に位置する利根川水系薄根川支流の溝又川最上流部で採捕し、¹⁵⁾ 以降群馬県水産試験場川場養魚センター(川場養魚センター)で継代飼育している親魚から2014年秋に作出した当歳魚(標準体長±標準偏差: 8.30 ± 0.48 cm, 体重±標準偏差: 7.11 ± 1.24 g)を用いた。なお、川場養魚センターで継代飼育しているイワナはほぼ全ての個体が満1歳で成熟する。したがって1983年から2014年までの養殖継代魚の継代には満1歳魚または満2歳魚を親魚として用いた。半天然魚には群馬県多野郡上野村に位置する利根川水系神流川支流の沢で2014年秋に採捕した天然魚をオス親魚、養殖継代魚をメス親魚として2014年秋に作出した当歳魚(標準体長±標準偏差: 8.38 ± 0.49 cm, 体重±標準偏差: 7.08 ± 1.33 g)を用いた。半天然魚の親魚である天然魚の採捕を行った沢は神流川最上流部の全長約1 kmの支流であり、神流川との合流部直上には堰堤が存在し、下流からの魚の遡上は不可能である。また管轄する上野村漁業協同組合による過去のイワナ放流履歴はなかった。したがってその沢に生息するイワナは全て天然魚と判断した。¹⁶⁾ 実験に用いた養殖継代魚と半天然魚の間で標準体長と体重に有意な差は認められなかった(t -test: 標準体長, $t=1.827$, $df=478$, $p=0.07$; 体重, $t=0.244$, $df=478$, $p=0.81$)。

実験水路は、土木工事用のポリエチレン製U字溝と水中ポンプを用いて、幅0.4 m、長さ10.0 m、勾配6%

の流水式実験水路を群馬県水産試験場本場（群馬水試）の屋内に2本設置し、一方を清水水路、もう一方を濁水路として使用した。実験水路は発泡スチロール建材を堰板に用いて長さ約1 m ずつの9のプールに区切り、上から順に1区、2区、…、9区とした（Fig. 1）。堰板は左右で高さが異なるようにし、最低部分で水底から15 cm、最高部分で水底から25 cmとした。試験水には、群馬水試の井戸水を使用し、冷却器（清水水路：CARRY COOL LPA3，オリオン機械株式会社および冷却水循環装置クーリングエースポンプCAP-6000，東京理化学株式会社；濁水路：CARRY COOL LPA3，オリオン機械株式会社）で水温が12.5–16.5℃になるように調整した。また、水中ポンプで試験水を9区の下に設けた水槽から1区の上流に循環するようにした。流量は両方の実験水路共に4.0 L/sであった。

試験は次のように行った。試験実施日の8:45に養殖継代魚と半天然魚をそれぞれ30尾ずつ、合計60尾をプラスチック製の網で仕切った5区に投入し、濁水路には9:00に濃度が200 ppmになるようにカオリン（関東化学株式会社）を1区の上流に投入した。1時間の馴致後の10:00から網を外して試験を開始し、試験開始5時間後の15:00に全ての供試魚を取り揚げて各区の個体数と全長、標準体長および体重を計数した。取り揚げる際には各区をプラスチック製の網で仕切り、供試魚が他の区に逃げないようにした。供試魚は両系統を識別するために、試験前に養殖継代魚は左腹鰭、半天然魚区は右腹鰭を切除し、区の識別ができるようにした。鰭切除標識によって、ニジマス *Oncorhynchus mykiss* の場合は遊泳方法に影響を及ぼすことも報告されているが、¹⁷⁾ 今回は両系統共に腹鰭の片方いずれかを切除したため、遊泳に対する影響は否定できないものの、影響の大きさは系統間で差がないと仮定した。水路による結果の偏りを相殺するため、試験毎に清水区と濁水区の水路を入れ替えて試験を行った。試験は2015年11月10日から12月18日までに清水区と濁水区それぞれの条件で4回ずつ、計8回行った。

実験水路の条件と系統毎の各区の利用個体数（利用個体数）が各水路での実験水路の条件（清水、濁水）、供試魚の系統（養殖継代魚、半天然魚）およびそれらの交

互作用の影響を受けると仮定し、その関係性を以下の多項ロジスティックモデルの一種である比例オッズモデル¹⁸⁾により解析した。偏回帰係数の基準は、実験水路の条件は清水、供試魚の系統は養殖継代魚とした。比例オッズモデルを用いたのは、各データが独立ではなく、応答変数が順序のある値をとるカウントデータであるためである。

$$(\text{利用個体数}) = (\text{実験水路の条件}) + (\text{系統}) + (\text{実験水路の条件と系統の交互作用}) \quad (1)$$

また、解析により得られた各偏回帰係数に対してのオッズ比を以下の式により求めた。

$$(\text{オッズ比}) = \exp(\text{偏回帰係数}) \quad (2)$$

なお、予備解析で本モデルをフルモデルとして赤池情報量基準（AIC）を用いてステップワイズ法によるモデル選択を行った。その結果、変数減少法、変数増加法共に本モデルが今回の実験で得られたデータに基づくベストモデルとして採択された（ベストモデル，AIC = 858.10；セカンドモデル，AIC = 866.12）。したがって本研究では本モデルを用いて解析を行った。また、解析時には、水路の区によっては利用個体数が0の区が生じたため、区のうち1–3区を上流区、4–6区を中流区、7–9区を下流区とした。実験水路の条件については、清水が0、濁水が1の値、供試魚の系統については、養殖継代魚が0、半天然魚が1の値をとるカテゴリカル変数とした。統計解析には統計ソフトR（ver. 3.3.0）のライブラリMASSおよびAERを用いた。

実験水路の条件と系統毎の利用個体数の合計値をTable 1に示した。また、各変数における偏回帰係数をTable 2に示した。実験水路の条件および実験水路の条件と系統の交互作用の偏回帰係数が有意であると判断された。得られたオッズ比から、実験水路の条件の効果が注目すると、系統に関係なく清水時よりも濁水時の方が供試魚は0.37倍上流側への移動傾向がある、すなわち

Table 1 Total numbers of char in each channel block, water condition and strain.

Water condition	Strain	Channel block		
		Upper	Middle	Lower
Clear	Hatchery-reared	25	54	41
	Semi-native	19	65	36
Turbid	Hatchery-reared	0	64	56
	Semi-native	5	97	18

Table 2 Estimated coefficients, intercepts, odds ratios, *z*-values, and *p*-values analyzed using the proportional odds model for the effects of water condition (clear, 0; turbid, 1), strain (hatchery-reared, 0; semi-native, 1), and their interaction.

	Category	Estimated value	Standard error	Odds ratio	<i>z</i>	<i>p</i>
Coefficients	Water condition	-0.99	0.26	0.37	-3.75	0.00
	Strain	0.00	0.27	1.00	0.00	1.00
	Water condition × Strain	1.16	0.37	3.20	3.14	0.00
Intercepts	Lower/Middle	-1.03	0.20	—	-5.11	0.00
	Middle/Upper	2.04	0.23	—	9.02	0.00

Fig. 1 Channels used in the experiment at Gunma Prefectural Fisheries Experiment Station. The solid arrow indicates the direction of water flow. The dashed arrow indicates the fifth channel block stocked with the char.

2.69 倍下流側への移動傾向があることが示された。また、系統の效果に注目すると、系統のみでの偏回帰係数は有意ではなく、オッズ比も 1.00 倍であり、実験水路の条件が清水の場合、系統の效果はほとんど無いことが示された。一方、実験水路の条件と系統の交互作用の偏回帰係数は有意であり、実験水路の条件が濁水の場合、系統によって移動性は異なり、半天然魚は養殖継代魚よりも 3.20 倍上流側への移動傾向があることが示された。

本研究から、半天然魚は清水時においては養殖継代魚と移動性に差はないものの、濁水時においては養殖継代魚よりも上流側への移動傾向が高いことが示された。また、少数ではあるが半天然魚のみが濁水水路において上流側に遡上することが明らかになった (Table 1)。滝や堰堤の上流側に生息している群は、下流側の群よりも遡上性が高くなることがニジマスとイワナで明らかにされている。¹⁹⁻²⁰⁾ また、その原因として上流側には下流方向へ移動する性質の弱い個体のみが残存することによる選択が生じているためであると考えられている。²⁰⁾ 今回半天然魚の親魚として採捕した在来個体群も同様に河川最上流に存在する堰堤の上流側に残存する遡上性の高いと考えられる個体群であったため、そのハイブリッドである半天然魚の上流側への移動傾向、すなわち遡上性も同様に高くなったと考えられる。したがって、半天然魚の放流後の生残率の高さはその遡上性の高さも影響している可能性が示唆された。また、増殖のためには養殖継代魚の代替として半天然魚を稚魚放流することにより放流後の流下リスクを低下させることが可能であると考えられた。

濁水時における養殖継代魚の移動傾向は半天然魚と異なり、下流側への移動傾向は半天然魚よりも大きく、養殖継代魚は遡上せずその場に残留するか流下するということが明らかになった (Table 1)。このことは、増殖を目的としたイワナ養殖継代魚の稚魚放流においては、放流後の濁水の発生により放流魚の著しい流下が生じる可能性を示唆している。漁業協同組合は稚魚放流を行う際は、放流場所付近を漁場とすることを想定している。しかしながら、放流した直後に濁水が発生した場合には、放流魚の流下により想定した場所が漁場として機能しなくなる可能性がある。特に、魚道のない、もしくは魚道があっても機能していないダムや堰堤がある河川では、それらの河川工作物よりも流下した場合、再遡上することが不可能になり、更に放流の増殖効果は低下すると考えられる。

これらのことから、漁業協同組合が稚魚放流を行う場合、放流地点付近 (目的の漁場) における環境条件 (河川自体の濁水の出やすさ、上流側での河川工事の有無、下流側の遡上が不可能な堰堤やダムの有無等) の把握、堰堤やダム、または河川工事の管理者との連絡調整、放流日前後の天候の確認、通常の養殖継代稚魚の代替としての半天然稚魚の放流の検討等を実施することが、増殖効果を向上させるためには必要であると考えられた。

謝 辞

本研究の遂行に際しては、供試魚の飼育管理には群馬県水産試験場の星野勝弘氏に、水路試験には同試験場の新井肇博士、松原利光氏および渡辺峻氏の多大な協力を

いただいた。(国研)水産研究・教育機構中央水産研究所内水面研究センターの中村智幸博士には貴重な助言をいただいた。2名の匿名の査読者からは有益なコメントを頂戴した。ここに記してこれらの方々に深謝申し上げる。本研究は水産庁委託事業「平成 27 年度放流用種苗育成手法開発事業」の一環として実施した。

文 献

- 1) 中村智幸, 岸 大弼, 徳原哲也, 久保田仁志, 亀甲武志, 坪井潤一. 在来溪流魚 (イワナ類, サクラマス類): 利用, 増殖, 保全の現状と課題. 魚類学雑誌 2012; **59**: 163-167.
- 2) Einum S, Fleming IA. Implications of stocking: ecological interactions between wild and released salmonids. *Nordic J. Freshw. Res.* 2001; **75**: 56-70.
- 3) Weber ED, Fausch KD. Interactions between hatchery and wild salmonids in streams: differences in biology and evidence for competition. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 2003; **60**: 1018-1036.
- 4) Araki H, Berejikian BA, Ford MJ, Blouin MS. Fitness of hatchery-reared salmonids in the wild. *Evol. Appl.* 2008; **1**: 342-355.
- 5) 放流用種苗育成手法開発事業研究成果報告書. 水産庁, 東京. 2013.
- 6) Barrett JC, Grossman GD, Rosenfeld J. Turbidity-induced changes in reactive distance of rainbow trout. *Trans. Am. Fish. Soc.* 1992; **121**: 437-443.
- 7) Sweka JA, Hartman KJ. Influence of turbidity on brook trout reactive distance and foraging success. *Trans. Am. Fish. Soc.* 2001; **130**: 138-146.
- 8) Wilber DH, Clarke DG. Biological effects of suspended sediments: a review of suspended sediment impacts on fish and shellfish with relation to dredging activities in estuaries. *N. Am. J. Fish. Manag.* 2001; **21**: 855-875.
- 9) 安房田智司, 武島弘彦, 鶴田哲也, 矢田 崇, 井口恵一朗. 短時間・長時間の濁りに対するアユのストレス応答. 水産増殖 2001; **58**: 425-427.
- 10) 村岡敬子, 天野邦彦, 土井隆秀, 久保田仁志, 三輪準二. 高濃度濁水下におけるアユの生存率と懸濁物質の粒度組成の関係. 魚類学雑誌 2011; **58**: 141-151.
- 11) Bisson PA, Bilby RE. Avoidance of suspended sediment by juvenile coho salmon. *N. Am. J. Fish. Manag.* 1982; **2**: 371-374.
- 12) Sigler JW, Bjornn TC, Everest FH. Effects of chronic turbidity on density and growth of steelheads and coho salmon. *Trans. Am. Fish. Soc.* 1984; **113**: 142-150.
- 13) 田中英樹, 鈴木究真, 星野勝弘, 松岡栄一. アユの冷水と濁水に対する移動性とストレス反応. 群馬県水産試験場研究報告 2015; **21**: 1-6.
- 14) 前川光司, 高橋剛一郎. 溪流魚と砂防工事. 砂防学会誌 1997; **50**: 61-66.
- 15) 吉沢和俱, 林不二雄, 高橋麻次郎. イワナの増殖に関する研究-II (資料) 地付天然イワナの採捕・採卵. 群馬県農業研究 E 水産 1985; **1**: 67-69.
- 16) 中村智幸. 聞き取り調査によるイワナ在来個体群の生息分布推定. 砂防学会誌 2001; **53**: 3-9.
- 17) Reimchen TE, Temple NF. Hydro dynamic and phylogenetic aspects of the adipose fin in fishes. *Can. J. Zool.* 2004; **82**: 910-916.
- 18) 藤井良宜. 「R で学ぶデータサイエンス 1 カテゴリーカルデータ解析」(金 明哲編) 共立出版, 東京. 2010.
- 19) Northcote TG. Juvenile current response, growth and maturity of above and below waterfall stocks of rainbow trout, *Salmo gairdneri*. *J. Fish Biol.* 1981; **18**: 741-751.
- 20) Morita K, Yamamoto S. Contrasts in movement behavior of juvenile white-spotted charr between stocks above and below a dam. *Fish. Sci.* 2001; **67**: 179-181.