天然個体の移植によるアマゴ集団再生の試みとその遺伝的検証

宮原 寿恵,¹ 山田 英幸,¹ 佐藤 拓哉,² 原田 泰志,¹ 河村 功一^{1*}

(2013 年 7 月 29 日受付, 2013 年 11 月 17 日受理)

¹三重大学大学院生物資源学研究科, ²神戸大学大学院理学研究科Genetic evaluation of reintroduced amago salmon *Oncorhynchus masou ishikawae*HISAE MIYAHARA¹, HIDEYUKI YAMADA¹, TAKUYA SATO²,
YASUSHI HARADA¹ AND KOUICHI KAWAMURA^{1*}¹Graduate School of Bioresources, Mie University, Tsu, Mie 514-8507, ²Graduate School of Science, Kobe University, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan

Population revival of amago salmon *Oncorhynchus masou ishikawae* was attempted by reintroducing wild individuals to an isolated tributary, in which this species had once become extinct, from a neighboring tributary in the same drainage basin, and its effects were evaluated by genetic analyses with nine microsatellite markers. The number of transplants steadily increased, approximately reaching a plateau of population size two years after reintroduction. Although the revived population kept almost the same level of heterozygosity and relatedness as its founding population, the richness of alleles, especially rare alleles, has declined slightly. These results show that, in stream-dwelling fish such as amago salmon, exchange of individuals among neighboring populations in the same drainage basin is important for the long-term preservation of genetic characteristics including genetic diversity, although population revival within a short period is possible by transplanting a small number of parental fish.

キーワード：アマゴ, 移植, 遺伝的多様性, 血縁度, ボトルネック

サケ科魚類をはじめとする日本の渓流魚は、乱獲や山林の開発、河川改修に伴う河川環境の悪化のため各地で減少傾向にあるとされている。^{1,2)} こうした魚種においてはダムや堰堤によりしばしば生息地が分断化され、これに伴う小集団化が遺伝的多様性や適応度に与える影響が危惧されている。^{3,4)} 渓流魚資源の減少に対する対策として資源回復を目的とした放流が日本各地で行われているが、¹⁾ 放流に際し他河川産個体が用いられることも多く、放流個体との交雑が在来集団の遺伝的特徴を喪失させるといった問題が生じている。⁵⁾ このような状況下、近年、渓流魚の在来集団の保全手法の一つとして「絶滅水域移植法」が中村・飯田¹⁾により提唱されている。この方法は水涸れや台風による出水によって在来集団が絶滅した水域に対し、同一水系内の他集団から在来個体の移植を行うことで在来集団の再生を図る方法である。本手法では移植に際し、移植に用いる集団の選定を必要とし、移植先にかつて存在していた集団と生態的かつ遺伝的特徴がなるべく近いものを用いることが望ましいとし

ている。^{1,6)} 加えて、本手法では移植後の集団の長期的存続を図るため、定期的に集団サイズだけでなく遺伝的モニタリングも併せて行うことを推奨している。⁶⁾

三重県中央部を東西に流れる宮川は伊勢湾に流入する大型河川であり、その源を日本有数の多雨地帯である大台ヶ原に発することから、この流域は過去に幾度となく大規模な氾濫を経験している。⁷⁾ そのため、治水を主な目的として1957年に宮川ダムが、1966年には三瀬谷ダムがそれぞれ上流域に建設された。またダムの建設と平行して貯水湖・砂防堰堤等が整備されたことにより、大規模な災害は著しく減少した。しかし、2004年9月の台風21号による豪雨のため、1959年の伊勢湾台風以来の大規模な土砂災害が発生した。⁸⁾ その結果、本災害により三瀬谷ダムより上流の河川環境は大きく変化し、魚類を始めとする水生生物は個体数ならびにその分布が縮小したことが報告されている。⁹⁾ このため、宮川上流漁業協同組合（以降、宮川上流漁協と記す）はこの災害後、アマゴ *Oncorhynchus masou ishikawae* の資源量の

* Tel : 81-59-231-9549. Fax : 81-59-231-9540. Email : kawa-k@bio.mie-u.ac.jp

回復を目的として、全流域において2年間の禁漁を実施した。その結果、一部の支流では個体数の回復が見られたものの、再生産が行われず絶滅に至った水域も存在する(山田ら, 未発表)。

宮川上流域のアマゴ集団は Miyahara *et al.*¹⁰⁾ による mtDNA とマイクロサテライト DNA を用いた集団解析において、支流間の遺伝的分化がほとんど生じておらず、遺伝的に単一の保全単位である可能性が高いことが示唆されている。この理由として、ダムや堰堤が作られる以前には本流と支流の間で個体交流があり、一つのメタ個体群^{11,12)}を形成していた可能性が指摘されている。また宮川上流域においては、宮川産種苗を用いた放流が広範囲で行われているが、一部の水域においては放流履歴の無い在来個体群が存在し、その中にはアリル数、ヘテロ接合度において遺伝的多様性の高い集団も存在することもわかっている。¹⁰⁾ 本研究では中村・飯田¹⁾の絶滅水域移植法の有効性を検証するため、宮川の支流において在来個体を用いた絶滅水域への移植を行い、移植後4年間にわたり定期的な個体群動態と遺伝的特徴のモニタリングを実施した。本報では本調査によって得られた結果について報告するとともに、その有効性について議論する。

材料と方法

移植の概要 宮川の一支流である八知山谷は、2004年の災害以前には、種苗放流が行われており漁場として利用されていたが、災害後、アマゴが絶滅した水域である (Fig. 1)。この支流は本流との合流点に高さ約5mの天然の滝が存在し、本流から個体の遡上は不可能である。また滝から520m上流には人工堰堤(魚道なし)が設けられ、かつてはこれより上流域にもアマゴが生息していたが、2004年の災害後、堰堤下の集団と同じく絶滅した(山田ら, 未発表)。以上のことから、人工堰堤から滝までの隔離された520m区間を絶滅水域移植法の実施ならびに調査区域とした (Fig. 1)。

アマゴの移植は2007年10月2日に行った。移植には宮川上流漁協の情報から宮川集団において放流履歴がなく、Miyahara *et al.*¹⁰⁾の結果から遺伝的多様性が高いとされる垣外俣谷産の51個体を用いた (Fig. 1)。移植にあたってはエレクトロフィッシャー(モデル12A, Smith-Root社製、直流300ボルトに設定)を用いて1歳魚以上と思われる51個体(平均 149.2 ± 31.8 mm)を捕獲し、採捕個体はオイゲノールで麻酔後、尾叉長を計測した。なお、採集時に触診法¹³⁾により性別判定が可能であった成熟個体については、性比がほぼ等しくなるように23個体を選別した。移植に用いた個体は計測後、イラストマー蛍光タグ(NMT社製)を用いた頭部の標識により個体識別を行い、遺伝子分析用に尾鰭の一

Fig. 1 Sampling localities of *Oncorhynchus masou ishikawae* in this study. The small map shows the location of our study area, the River Miya, Japan. Arrows on the large map indicate research sites of the Kaitomatadani and Yachiyamadani tributaries, respectively. Founder fish for population revival were captured at the former site, then released at the latter.

部を切除し99%エタノールで固定した。個体の移植は堰堤から200m下流までの間に個体を分散させるように行った。なお調査地は移植後、宮川上流漁協により全面禁漁区とした。

個体数推定 2007年10月の移植から2011年10月までの4年間、春と秋に定期調査を行い、個体数推定を行った。Chapmanの修正式¹⁴⁾を用いたPetersen法により個体数を推定するため、調査にはエレクトロフィッシャーを使用し、2~3日の間隔において採捕調査を2回行った。採捕個体はオイゲノールで麻酔後、尾叉長を計測するとともに捕獲地点の位置情報を記録した。また追跡調査のため、尾叉長90mm以上の個体はイラストマー蛍光タグによる個体識別を行った後、尾鰭の一部を遺伝子分析用試料として99%エタノールで固定した。魚は麻酔から覚醒した後、採捕地点にて放流した。なお、宮川のアマゴ集団の過去の成長データに基づき、尾叉長130mm以下の個体を当歳魚とみなした(山田ら, 未発表)。

マイクロサテライト多型解析 移植に用いた51個体に、移植後の調査において採捕した当歳魚の中から無作為に抽出した各年30個体を併せた計171個体を遺伝子分析に供した (Table 1)。DNAをフェノール・クロロホルム法¹⁵⁾により抽出した後、蛍光プライマーを用いたPCRにより各マイクロサテライト遺伝子座について

Table 1 Changes in genetic diversity of a revived population of *Oncorhynchus masou ishikawae* in the Yachiyamadani tributary of the River Miya, estimated with nine microsatellite loci

Generation	Year of sampling	<i>n</i>	A_R	H_E	H_O	F_{IS}	r
Founder	October 2007 (stocking)	51	4.424	0.497	0.481	0.031	-0.020 ± 0.299
1 st gen	August 2008	30	3.778	0.488	0.530	-0.085	-0.034 ± 0.341
2 nd gen	May 2009	30	4.111	0.508	0.530	-0.043	-0.034 ± 0.301
3 rd gen	October 2010	30	3.556	0.503	0.463	0.080	-0.034 ± 0.307
4 th gen	May 2011	30	3.889	0.520	0.496	0.046	-0.034 ± 0.312

Founder means fish transplanted to the Yachiyamadani tributary in 2007 and 1st to 4th generations are its offspring born in this area. *n*, number of samples; A_R , allelic richness; H_E , expected heterozygosity; H_O , observed heterozygosity; r , mean pairwise genetic relatedness.

アリの増幅を行った。マイクロサテライトのPCRは、予備試験において多型の確認された *Ots4*, *Omy325*¹⁶⁾, *Oma3ke*, *Oma02*¹⁷⁾, *One μ5*¹⁸⁾, *Mst73*¹⁹⁾, *One110*²⁰⁾, *OMM1311*²¹⁾, *OMM1375*²²⁾ の9座について行った。PCR反応条件は、94℃ 60秒に続き、94℃ 60秒、52℃ 60秒、72℃ 30秒のサイクルを7回、94℃ 45秒、52℃ 60秒、72℃ 30秒のサイクルを23回それぞれ繰り返し、最後に72℃ 2分とした。PCR産物はGeneScan-500LIZ Size Standard (Applied Biosystem社) とともにABI 3130xl Genetic Analyzer (Applied Biosystem社) 上で電気泳動を行った後、GeneMapper v.4.1 (Applied Biosystem社) を用いてアリの検出を行った。

アリサイズの決定後、各世代の集団におけるアリ頻度をFSTAT 2.9.3.2²³⁾により求め、連鎖不平衡²⁴⁾およびハーディーワインベルグ平衡からの逸脱の有無をGENEPOP 4.0.10²⁵⁾により検定した。平均アリリッチネス (A_R) ならびに平均ヘテロ接合度の期待値 (H_E) と観察値 (H_O) は、それぞれFSTATとGENEPOPにより算出した。近交係数 (F_{IS}) はFSTATにより求めた。

各世代の集団内の個体間の血縁度 (r)²⁶⁾ は、アリ数が2以下と多型性が低い *Ots4*, *One μ5*, *Mst73* を除く6座を用い、GENALEX 6.41²⁷⁾により求めた。各世代における有効集団サイズ (N_e) は、単一世代のサンプルから推定可能であるLDNe 1.31²⁸⁾ならびにONeSAMP²⁹⁾を用いて算出した。有効集団サイズの推定にはアリ数が1の世代を持つ *Mst73* を除く8座を用いた。また、再生産による八知山集団の遺伝的特徴の経年変化を見るため、PCA-GEN 1.2 (<http://www2.unil.ch/popgen/softwares/pcagen.htm>) による主成分分析を行い、比較対象として宮川上流域の他支流集団ならびに宮川産在来個体を起源とする養殖場集団を用いた。主成分分析には *Ots4*, *Oma02*, *Omy325*, *One μ3*, *Mst73* の5座を用い、他支流集団ならびに養殖場集団の遺伝情報はMiyahara *et al.*¹⁰⁾を使用した。

移植に用いた個体の繁殖貢献度を見るため、CER-

VUS 3.0.3³⁰⁾を用いた親子判定を最尤法により行った。野外調査の結果から、移植個体は2007年と2008年の秋に繁殖を行った可能性が高いことから、移植に用いた51個体と2008年ならびに2009年に採集された当歳魚各30個体の計111個体を解析に用いた。なお親魚の判定においては、シミュレーションにより求めた尤度の信頼度が60%以上の個体をその当歳魚の親とみなした。

結 果

個体数の推移 移植1年後の2008年8月の調査において、当歳魚と思われる個体が放流地点付近で多数確認された。10月の産卵期直前の調査においては、当歳魚が調査区間全域で確認されただけでなく、移植個体もほぼ全域に渡って分布していた (Fig. 2)。当調査では生息個体数が移植個体も含めて約200個体と推定され、そのうち当歳魚が全体の83%を占めていた (Fig. 3)。移植から2年後の2009年には個体数は300個体以上にまで増加し、当歳魚は全体の7割以上を占めた。その後は、個体数は250個体から300個体の間を安定して推移したが、当歳魚の占める割合はやや低下し、約6割程度となった。しかし、移植4年後の2011年9月の台風により個体数は激減し、1カ月後の10月に確認された個体は6個体のみであった。

遺伝的多様性 移植集団と当歳魚集団におけるアリ組成を見ると、*Oma02* の140と*Omy325* の94の2つを除き、移植集団で確認されたアリは当歳魚集団のいずれかにおいて認められた (Fig. 4)。*Mst73* の130、*One110* の260のように移植後、徐々に頻度が低下し消失するものも見られたが、移植集団が保持していたアリの81.4%は移植4年後の当歳魚集団においても認められた。連鎖不平衡は移植集団の*Omy325*-*One μ5* ($p < 0.05$)、*Ots4*-*One110* ($p < 0.01$)、*Omy325*-*OMM1375* ($p < 0.001$)、*One110*-*OMM1375* ($p < 0.001$) の4組において認められたものの、当歳魚集団においてはいずれの世代においても全く見られなかった。ハーディーワインベルグ平衡からの逸脱は、移植集団の*OMM1311* ($p < 0.01$)、移植3年後の当歳魚集団

Fig. 2 Temporal changes in the distribution of transplanted fish in the Yachiyamadani tributary of the River Miya in October in 2007 and 2008.

Fig. 3 Temporal changes in population size of revived *Oncorhynchus masou ishikawae* in the Yachiyamadani tributary of the River Miya. Vertical bars show standard deviation of estimated population size by the Petersen method. Exceptionally, one asterisk indicates the actual number of transplanted fish on October 2, 2007, and two asterisks indicate the actual number of fish caught on October 9, 2011.

の *Omy325* ($p < 0.001$) および 4 年後の当歳魚集団の *Omy325* ($p < 0.001$) においてそれぞれ認められた。

各集団の遺伝的多様性は, A_R が 3.556 から 4.424, H_E が 0.488 から 0.520 の間で推移し, A_R においては継代に伴う低下傾向が見られたものの世代間で有意な増減は認められなかった (Kruskal-Wallis test, $p > 0.05$) (Table 1)。また, F_{IS} は -0.085 から 0.080 の間を推移し, 0 からの有意な逸脱はいずれの世代においても認められなかった (Table 1)。

遺伝的特徴 血縁度において, 移植集団は -0.020 , 当歳魚集団はいずれも -0.034 の値をとり, 世代間での

Fig. 4 Allele frequencies and size distribution of nine microsatellite loci in each generation in a revived population of *Oncorhynchus masou ishikawae* in the Yachiyamadani tributary of the River Miya. The sizes of the bubbles correlate with relative frequencies of alleles in given generations. “Founder” means fish transplanted to the Yachiyamadani tributary in 2007, and the first to the fourth generations are their offspring born in this area.

有意差は認められなかった (Kruskal-Wallis test, $p > 0.05$) (Table 1)。移植集団の有効集団サイズは $LDNe$ においては 21.1, $ONeSAMP$ においては 32.6 となり, いずれも 2007 年の当歳魚においては移植集団の約 1/2 にまで低下したが, 翌年の 2008 年の当歳魚においては増加が認められ, 移植集団に匹敵する値を示した (Table 2)。しかしながら, 2009 年の当歳魚においては再び有効集団サイズは低下し, 2007 年の当歳魚に匹敵する値となったが, 翌年の 2010 年の当歳魚においては再度増加し, 移植集団と 2008 年の当歳魚にはほぼ匹敵する値を示した。主成分分析において, 第 1 主成分 (寄与

Table 2 Estimates of effective population size (N_e) of a revived population of *Oncorhynchus masou ishikawae* in the Yachiyamadani tributary of the River Miya

Hatching year	Generation	N_e	
		LDNe	ONeSAMP
	Founder	21.1 (15.3–29.7)	32.6 (23.6–59.0)
2007	1 st gen	9.8 (5.9–16.1)	18.4 (14.3–26.4)
2008	2 nd gen	33.3 (17.7–92.1)	21.0 (16.1–33.4)
2009	3 rd gen	14.8 (9.7–23.4)	18.5 (13.8–28.3)
2010	4 th gen	26.5 (13.6–73.1)	23.1 (17.6–35.3)

N_e were estimated with LDNe (95% confidence interval in parentheses) and ONeSAMP (95% credible limits in parentheses)

Fig. 5 Principal component analysis (PCA) plot showing the genetic relationships of 13 populations of *Oncorhynchus masou ishikawae* in the River Miya, using five microsatellite loci. Open circles, each generation of a revived population of the Yachiyamadani tributary (1st to 4th) including the founder population (F); solid circles, wild population of other tributaries in the River Miya; solid triangles, hatchery populations of River Miya origin. Genetic information of populations from other tributaries and hatchery populations is cited from Miyahara *et al.* (2012).¹⁰⁾

率 38.8%) と第 2 主成分 (寄与率 17.3%) の得点を基に散布図を作成したところ、移植集団を含む八知山谷の各当歳魚集団は、第 1 主成分得点において養殖場集団を含む他集団から識別された (Fig. 5)。八知山谷の集団は第 1 主成分においては世代間で違いは見られなかったものの、第 2 主成分において世代間で若干の相違が見られ、経年に伴う変化傾向が認められた。なお、各主成分において各遺伝子座の固有得点を見ると、第 1 主成分においては *Oma02* が、第 2 主成分においては *Omy325* が高い値を示した。

繁殖貢献度 親子判定は、2007 年生まれの 30 個体と 3 個体を除く 2008 年生まれの 27 個体を合わせた計 57 個体において可能であった。移植個体において親魚と判定された個体は、2007 年が 21 個体、2008 年が 29 個体で

Fig. 6 Histogram of the number of offspring reproduced in 2007 and 2008 by fish transplanted to the Yachiyamadani tributary of the River Miya in 2007. Horizontal bar indicates the number of offspring per parental fish estimated from parentage analysis and vertical bar shows the number of founder fish.

あり、移植個体に占める親魚の割合は前者が 41.2%、後者が 56.9% となった (Fig. 6)。親魚 1 個体あたりの繁殖貢献度の平均は、2007 年が 1.18 ± 2.81 個体、2008 年が 1.06 ± 1.64 となり、標準偏差において前者は後者の 1.7 倍となったが、両者の間に有意差は認められなかった (Wilcoxon test, $p=0.74$)。その中で 2007 年の雄 1 個体は 17 個体 (2008 年の当歳魚の分析個体に占める割合: 56.7%) の稚魚の親である可能性が示唆され、この雄は少なくとも 7 個体のメスとの配偶が推定された。

考 察

絶滅集団の再生 八知山谷では 2007 年秋の移植後、個体数は順調に増加し、推定生息個体数は移植 2 年後には移植個体の 6 倍にあたる約 300 個体にまで達した。その後、個体数はやや減少したものの、移植 4 年後の春まで 250 個体前後の状態を推移した (Fig. 3)。以上の結果から、八知山谷の現在の環境下で推定される最大生息個体数は約 300 個体であり、移植個体は約 2 年ではほぼピークに達したと考えられる。また、今回の移植に用いた個体は 51 個体であったことから、生息環境が良好であれば推定最大個体数の 2 割程度の個体の移植により、短期の集団再生が可能であることが明らかと

なった。

移植個体と当歳魚を用いた親子判定において有意ではなかったものの ($p=0.74$), 繁殖個体数と繁殖貢献度において2008年は2007年よりも高い値を示した。逆に繁殖貢献度における標準偏差は2008年(標準偏差: 1.64)よりも2007年(標準偏差: 2.81)の方が高く, 2007年には17個体という著しく繁殖貢献度を示す大型雄の存在が認められた(Fig. 6)。また, 有効集団サイズについて見ると, 2007年当歳魚とその子供と考えられる2009年当歳魚は移植個体の約5割の値を示したのに対し, 2008年当歳魚とその子供と考えられる2010年当歳魚は, 移植個体に匹敵する高い値を示した(Table 2)。この2007年と2008年における繁殖貢献度のばらつきと有効集団サイズの違いが生じた理由の一つとして, 産卵期における親魚の偏った分布が考えられる(Fig. 2)。産卵期における親魚の分布は, 移植直後の2007年秋には放流を行った上流域に偏っていたのに対し, 1年後の2008年秋には調査区間のほぼ全域に広がっていた。これらの結果は親魚放流による集団再生において, 放流個体の数だけでなく, 放流方法も重要であることを意味している。アマゴのようなわばりを形成する種においては, 繁殖期の個体移動は低いとされている。³¹⁾ このことから親魚放流において放流個体の繁殖貢献度を向上させるためには, 局所的に多数の個体を放流するよりも, より多くの地点に少数個体を小分けに放流した方が効果的であると考えられる。その理由の一つとして, 産卵床の形成促進効果が挙げられる。³²⁾ このことは, 遺伝的多様性の保持と遺伝的ボトルネックを防止する上でも重要であると考えられる。²⁴⁾

再生集団の遺伝的特徴 各年の当歳魚における遺伝的多様性について見ると, A_R , H_E , 血縁度については移植集団とはほぼ同レベルを維持していた(Table 1)。しかしながら, アリルレベルでみると移植集団で認められた低頻度のアリルをはじめとする1割以上のアリルの喪失が, 移植4年後の当歳魚集団において認められ(Fig. 4, Table 1), また主成分分析においてはわずかなものではあるものの, 第2主成分において経年に伴う値の継続した変化が認められた(Fig. 5)。以上のことから八知山谷において再生した集団は, 移植集団の遺伝的特徴を比較的よく保持しているものの, 遺伝的浮動による遺伝的多様性の低下が少なからず生じていることが明らかとなった。

今回の移植試験において, 個体群動態と遺伝的特徴についての調査結果から, 移植による短期間での集団の再生はほぼ成功したと思われる。しかしながら, 八知山谷の集団は下流の滝により本流の集団とは完全に隔離されていることから, 長期的に見た場合, 遺伝的多様性の低下に伴う遺伝的劣化の影響は避けられないと考えられ

る。^{24,33)} こうした問題への対処法の一つとして, 同一の保全単位を形成する近隣集団からの定期的な個体移植を挙げることができ,^{24,34)} イワナにおいてはその有効性が証明されている。³⁵⁾

絶滅水域移植法の課題 八知山谷においては2007年の移植後, 個体数は順調に増加し集団は再生したが, 4年後の2011年9月の台風に伴う出水により, 再び集団は壊滅した(Fig. 3)。この状況は八知山谷における2004年秋の災害後とよく似ている(宮原ら, 未発表)。なお, この2004年と2011年の水害は発生確率として100年に一度といった頻度のもので報告されている(紀伊半島大水害〜平成23年台風第12号による災害の記録〜: <http://www.pref.mie.lg.jp/D1BOUSAI/taisaku/kiihanntoudaisuigai/>, 三重県, 2013年11月5日)。³⁶⁾

宮川上流域においては八知山谷と同様, 台風等による出水によりアマゴが絶滅した支流が複数存在し, 絶滅した支流に共通する特徴として人工堰堤, 砂防ダムにより本流から隔離されていることが挙げられる。現在, こうした上流域における隔離水域は宮川に限らず日本各地に存在し, 溪流魚を始めとする水生生物の保全上の問題となっている。^{37,38,39)} 今回の結果から絶滅水域移植法は, 小規模河川における短期的な資源回復の方法として有効であることが示された。しかしながら, 長期的に見た場合には, 遺伝的多様性の低下の問題に加え, 偶発的な天災等による絶滅に対し, どう対処するかが大きな課題であると言える。こうした対策の一つとして, 同一水系内の複数の支流に集団を創出し, 定期的に個体交流を行うことが挙げられる。遺伝的特徴を共有する複数の集団は, 今回の八知山谷で見られたような集団の絶滅に対し, 保険となることが期待されるとともに, 在来の天然集団から移植のための個体の採捕の必要性がなくなる。このため, 採捕が在来集団へ与える影響を低減させることも期待できる。本手法は, 今回本研究で行ったような定期的な個体数調査と遺伝的モニタリングを併せて行うことで, 中村・飯田¹⁾が述べているように, より効果的なものになることが期待される。⁶⁾ しかしながら, 本手法の欠点としてはこうした作業において長期的なコストと労力を少なからず必要とすることが挙げられる。保全遺伝学的見地から見た場合, 溪流魚保全のあるべき姿として次のことが考えられる。すなわち, 人工堰堤やダムにより分断された集団間での個体交流を魚道等の設置により促進し, 在来集団全体を一繁殖集団に近い状態で機能させることにより, 遺伝的浮動や近親交配による適応度の低下を抑制し, 絶滅リスクを軽減させることが最も重要である。⁴⁰⁾

謝 辞

本研究を行うにあたり, 宮川上流漁業協同組合の水谷

幸夫組合長ならびに宮川上流アユ種苗センターの川端清之センター長には多大な御協力を頂いた。また、野外調査においては、三重大学生物資源学部個体群動態学研究室の学生諸氏に大変お世話になった。なお、本研究は水産庁溪流資源増大技術開発事業の一環として行われた。

文 献

- 1) 中村智幸, 飯田 遙. 「守る・増やす溪流魚-イワナとヤマメの保全・増殖・釣り場作り」農村漁村文化協会, 東京. 2004.
- 2) 溪流資源増大技術開発事業研究報告書. 水産庁, 東京. 2013.
- 3) 遠藤辰典, 坪井潤一, 岩田智也. 河川工作物がイワナとアマゴの個体群存続におよぼす影響. 保全生態学研究 2006; **11**: 4-12.
- 4) 小泉逸郎, 山本祥一郎. サケ科魚類の遺伝的構造. 「サケ・マスの生態と進化」(前川光司編) 文一総合出版, 東京. 2004; 243-279.
- 5) Kawamura K, Kubota M, Furukawa M, Harada Y. The genetic structure of endangered indigenous populations of the amago salmon, *Oncorhynchus masou ishikawae*, in Japan. *Conserv. Genet.* 2007; **8**: 1163-1176.
- 6) IUCN. Guidelines for Re-introductions. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. 1998.
- 7) 三重県電気局. 「宮川総合開発事業史」三重県, 三重. 1960.
- 8) 林 拙郎, 土屋 智, 近藤観慈, 芝野博文, 沼本晋也, 小林賢一郎, 山越隆雄, 池田暁彦. 2004年9月29日, 台風21号に伴って発生した三重県宮川村の土砂災害(速報). 砂防学会誌 2004; **57**: 48-55.
- 9) Kano Y, Tomida Y, Ikeda N, Iwasaki N, Miyagawa M, Harada Y, Ichikawa, Watanabe K. Fluctuation and variation in stream-fish assemblages after a catastrophic flood in the Miyagawa River, Japan. *Environ. Biol. Fish.* 2011; **92**: 447-460.
- 10) Miyahara H, Yamada H, Sato T, Harada Y, Yamamoto S, Kawamura K. Mitochondrial-nuclear discordance in the amago salmon, *Oncorhynchus masou ishikawae*, in the River Miya, Japan. *Conserv. Genet.* 2012; **13**: 1343-1353.
- 11) 巖佐 庸, 松本忠夫, 菊沢喜八郎, 日本生態学会. 「生態学辞典」共立出版, 東京. 2004.
- 12) Hanski I. Metapopulations of animals in highly fragmented landscapes and population viability analysis. In: Beissinger SR, McCullough DR (eds). *Population Viability Analysis*. The University of Chicago Press, USA. 2002.
- 13) Kano Y. Sexing fish by palpation: a simple method for gonadal assessment of fluvial salmonids. *J. Fish. Biol.* 2005; **66**: 1735-1739.
- 14) Chapman DG. Some properties of the hyper-geometric distribution with applications to zoological censuses. *Univ. Calif. Publ. Stat.* 1951; **1**: 131-160.
- 15) Lansman RA, Shade PO, Shapira JF, Avise JC. The use of restriction endonucleases to measure mitochondrial DNA sequence relatedness in natural populations. III. Techniques and potential applications. *J. Mol. Evol.* 1981; **17**: 214-226.
- 16) Olsen JB, Wenburg JK, Bentzen P. Semiautomated multilocus genotyping of Pacific salmon (*Oncorhynchus* spp.) using microsatellites. *Mol. Mar. Biol. Biotechnol.* 1996; **5**: 259-272.
- 17) 野口大毅, 池田 実, 中嶋正道, 谷口順彦. サクラマス集団解析のためマイクロサテライト DNA マーカーの開発とその特性について. 水産育種 2003; **33**: 61-66.
- 18) Scribner KT, Gust JR, Fields RL. Isolation and characterization of novel salmon microsatellite loci: cross-species amplification and population genetic applications. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1996; **53**: 833-841.
- 19) Poteaux C, Bonhomme F, Berrrebi. Microsatellite polymorphism and genetic impact of restocking in Mediterranean brown trout (*Salmo trutta* L.). *Heredity* 1999; **82**: 645-653.
- 20) Olsen JB, Wilson SL, Kretschmer EJ, Jones KC, Seeb JE. Characterization of 14 tetranucleotide microsatellite loci derived from sockeye salmon. *Mol. Ecol.* 2000; **9**: 2185-2187.
- 21) Palti Y, Fincham MR, Rexroad III CE. Characterization of 38 polymorphic microsatellite markers for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Mol. Ecol. Notes* 2002; **2**: 449-452.
- 22) Rodriguez F, Rexroad CE III, Palti Y. Characterization of twenty-four microsatellite markers for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Mol. Ecol. Notes* 2003; **3**: 619-622.
- 23) Goudet J. FSTAT (version 1.2): a computer program to calculate F-statistics. *J. Hered.* 1995; **86**: 485-486.
- 24) Allendorf FW, Luitkart G. *Conservation and the genetics of Populations*. Blackwell Publishing, USA. 2007.
- 25) Raymond M, Rousset F. GENEPOP (version 1.2): population genetics software for exact tests and ecumenicism. *J. Hered.* 1995; **86**: 248-249.
- 26) Queller DC, Goodnight KF. Estimating relatedness using genetic markers. *Evolution* 1989; **43**: 258-275.
- 27) Peakall R, Smouse PE. GENALEX 6: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research. *Mol. Ecol. Notes* 2006; **6**: 288-295.
- 28) Waples RS, Do C. LDNE: a program for estimating effective population size from data on linkage disequilibrium. *Mol. Ecol. Resour.* 2007; **8**: 753-756.
- 29) Tallmon DA, Koyuk A, Luikart GA, Beaumont MA. ONeSAMP: a program to estimate effective population size using approximate Bayesian computation. *Mol. Ecol. Resour.* 2008; **8**: 753-756.
- 30) Kalinowski ST, Taper ML, Marshall TC. Revising how the computer program CERVUS accommodates genotyping error increases success in paternity assignment *Mol. Ecol.* 2007; **16**: 1099-1106.
- 31) Nakano S, Kachi T, Nagoshi M. Restricted movement of the fluvial form of red-spotted masu salmon, *Oncorhynchus masou rhodurus*, in a mountain stream, central Japan. *J. Ichthyol.* 1990; **37**: 158-163.
- 32) 中村智幸. 人工産卵場におけるイワナの産卵と産着卵のふ化. 日本水誌 1999; **65**: 434-440.
- 33) Hedrick PW. *Genetics of populations*, 4th ed. Jones and Bartlett, USA. 2011.
- 34) Weeks AR, Sgro CM, Young AG, Frankham R, Mitchell NJ, Miller KA, Byrne M, Coates DJ, Eldridge MDB, Sunnucks P, Breed MF, James EA, Hoffmann AA. Assessing the benefits and risks of translocations in changing environments: a genetic perspective. *Evol. Appl.* 2011; **4**: 709-725.
- 35) Yamamoto S, Maekawa K, Tamate T, Koizumi I, Hasegawa K, Kubota H. Genetic evaluation of translocation in artificially isolated populations of white-spotted charr (*Salvelinus leucomaenis*). *Fish. Res.* 2006; **78**: 352-358.
- 36) 諏訪 浩, 石井孝行, 藤田 崇. 2004年21号台風豪雨

- で三重県宮川流域に発生した崩壊, 土石流, 岩屑なだれ. 1989 年十津川崩壊災害の防災科学的総合研究, 京都大学防災研究所, 京都. 2005; 29-37.
- 37) Morita K, Yamamoto S. Effects of habitat fragmentation by damming on the persistence of stream-dwelling charr populations. *Consev. Biol.* 2002; **16**: 1318-1323.
- 38) Tsuboi J, Iwata T, Morita K, Endou S, Oohama H, Kaji K. Strategies for the conservation and management of isolated salmonid populations: lessons from Japanese streams. *Freshw. Biol.* 2013; **58**: 908-917.
- 39) Fukushima M, Kameyama S, Kaneko M, Nakao K, Steel EA. Modelling the effects of dams on freshwater fish distributions in Hokkaido, Japan. *Freshw. Biol.* 2007; **52**, 1511-1524.
- 40) Young KA. Managing the decline of Pacific salmon: metapopulation theory and artificial recolonization as ecological mitigation. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1999; **56**: 1700-1706.