



Title	ふ化放流事業における初期生育環境がサケ稚魚の分子応答と生理特性に与える影響
Author(s)	小亀, 友也
Description	この博士論文の全文は利用可能日以降に公開されます。利用可能日以前の閲覧方法は https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/ をご参照ください。
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(水産科学)
Dissertation Number	甲第16711号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16711
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99556
Type	doctoral thesis
File Information	Yuya_Kogame_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称：博士（水産科学）

氏名：小亀 友也

学 位 論 文 題 目

ふ化放流事業における初期生育環境がサケ稚魚の分子応答と 生理特性に与える影響

サケ *Oncorhynchus keta* は北太平洋沿岸域に広く分布し、日本では北海道を中心に重要な水産資源として利用されてきた。北海道では 19 世紀末から人工ふ化放流事業が本格化し、現在では年間約 10 億尾の稚魚が放流されている。しかし、放流規模の拡大にもかかわらず、2000 年代以降は北海道集団を中心に来遊数の減少が続いている。この問題には、温暖化による海洋環境変化と長期的なふ化放流の影響が複合的に関与していると考えられている。

サケの稚魚は降海直後から高い遊泳能力、代謝能、浸透圧調節、捕食回避行動などの能力を同時に要求される。また、サケの回帰率は、沿岸滞在期の成長速度や肥満度、それらを支える餌環境と密接に関連している。近年の温暖化に伴う水温上昇や餌環境の変化により、成長速度や肥満度が十分でない個体の割合が増加し、その結果、初期海洋期における減耗が強まっていると考えられる。

一方、ふ化場環境は高密度飼育や給餌条件、水温などが自然河川とは大きく異なる。ふ化場での飼育は、稚魚の成長促進には有利である反面、行動や生理特性の発達が十分に促されない可能性がある。ふ化場から放流した個体は野生個体に比べて降海後の生残率が低いことが報告されており、ふ化場における飼育条件が回帰率に影響すると考えられる。放流個体の生残率を高めるためには、生育環境の違いが稚魚に与える影響を明らかにし、それを踏まえた飼育環境の改善が求められる。また、放流後の個体には、ふ化場飼育時に起因する選択圧が作用し、野生個体とは異なる形質を有する個体が回帰する可能性がある。回帰した個体は再生産に用いられるため、遺伝的・表現型的な変化が世代を通じて集団に蓄積すると考えられる。そのため、ふ化放流の影響を短期的な飼育環境の問題にとどめず、長期的に反映される形質の変化についても考慮する必要がある。

近年、稚魚の形質の変化を説明する分子基盤としてエピジェネティクス、特に DNA メチル化が注目されている。DNA メチル化は塩基配列を変化させることなく遺伝子発現を調節する仕組みであり、栄養状態やストレス、化学物質曝露など多様な環境要因に応答して変化し得る。自然環境とふ化場環境といった生育環境の違いは、異なる DNA メチル化状態を誘導し、稚魚の形質に影響している可能性がある。したがって、DNA メチル化状態を調べることは、初期環境が稚魚の形質に及ぼす影響を分子レベルで捉えるための有効な手段となり得る。

そこで、本研究では、サケにおける初期発生段階の水温条件と浮上後の飼育環境、さらに親魚由来の違いが、分子応答と生理特性に与える影響を明らかにすることを目的とした。

第一章では、ふ化放流事業で行われる飼育水温の人為的な操作が稚魚に与える影響を明らかにするため、異なる水温条件で飼育した稚魚の成長および白筋と肝臓における総メチル化率を比較した。受精卵を 5℃ で浮上まで飼育し、浮上後は一方を 5℃ (L_L 群)、他方を 10℃ (L_H 群) で放流サイズ(尾叉長約 50 mm)まで飼育した。また、受精卵を 10℃ で放流サイズまで飼育し(H_H 群)、浮上までと浮上後の経験水温が異なる 3 群を作出した。L_H 群と H_H 群の比較により、浮上前の水温、L_H 群と L_L 群の比較により、浮上後の水温の影響を検証した。浮上後の瞬間成長率は、L_L 群が他の 2 群と比較して小さく、浮上後の水温に大きく規定されていたが、L_H 群は H_H 群に対して大きい値を示したことから、浮上前の水温もその後の成長に影響を与えることが明らかになった。放流サイズ時の白筋の総メチル化率は L_H 群が H_H 群に対して有意に低く、L_H 群と L_L 群の間に差が見られなかったことから、浮上前の水温が、放流サイズ時の DNA メチル化パターンの形成に影響する可能性が示唆された。

第二章では、飼育水温が白筋の遺伝子発現および筋形成に与える影響を解明することを目的に、第一章で作出した 3 群の放流サイズ時の白筋を対象とした RNA-seq 解析を行った。加えて、RNA-seq 解析で発現量に差が見られた遺伝子および筋形成に関わる遺伝子について、浮上時と放流サイズ時の qPCR による発現量およびメチル化状態を比較した。RNA-seq 解析の結果、発現変動遺伝子の数は L_L 群と L_H 群間に比べ L_H 群と H_H 群間で多かった。従って、浮上までの水温は浮上後の水温よりも放流サイズ時の遺伝子発現に影響する可能性が示唆された。さらに、KEGG 解析の結果、L_H 群では H_H 群に対し、解糖系経路にかかわる遺伝子の発現が高まっており、浮上まで低温で管理されることにより、白筋でのエネルギー産生能が高まると推察された。放流サイズ時では糖代謝に関わる *pyruvate kinase pkm-like* や筋成熟の指標である *creatine kinase M-type-like* の発現量が浮上前の水温によって異なる傾向が見られたが、メチル化状態に大きな違いは見られなかった。さらに、筋肉の組織切片を作製し白筋の筋線維径を測定し、各群の筋線維の太さを比較した結果、放流サイズ時に太い筋線維の割合は L_L 群、L_H 群、H_H 群の順に高かった。筋線維径が大きくなると、単位体積あたりの筋維持コストが相対的に小さく、基礎代謝における省エネルギー化が生じ得ることから、飼育水温は代謝特性の形成に関与することが示唆された。

第三章では、親魚の由来と飼育環境が稚魚の代謝特性と分子応答へ与える影響を明らかにすることを目的とし、次の試験を行った。放流由来の親魚と自然産卵由来の親魚を用いて親の由来の異なる交配群を作出し、浮上後にふ化場環境と自然環境で放流サイズになるまで飼育した。その後、同一の海水環境で 20 日間飼育を行った。放流サイズの稚魚の白筋と肝臓を用いて、親の由来と飼育環境の違いが遺伝子発現経路に及ぼす影響を RNA-seq 解析により検証した。次に放流サイズ時と海水飼育後のエネルギー指標の変化、qPCR による白筋と肝臓の代謝に関わる遺伝子発現量と DNA メチル化状態を解析し、親の由来および飼育環境の違いが与える影響とその持続性を調査した。その結果、ふ化場環境で放流サイズまで飼育された稚魚は、自然環境で飼育された同サイズの稚魚に比べて、白筋や肝臓では同化的成長を支える代謝経路等が活性化することが判明した。また、成長率やエネルギー指標の値、代謝に関与する遺伝子発現が高く、海水移行後もこれらの特性の一部は持続することが明らかとなった。しかし、遺伝子の発現量と DNA メチル化状態に相関は見られなかった。また、親の由来による影響も検証したところ、放流由来の親を持つ稚魚は自然産卵由来の親を持つ稚魚に比べて、自然環境においてエネルギー産生系等の代謝経路が高く維持されており、ふ化放流事業でもこのような遺伝的・分子機能的変化が蓄積される可能性が示唆された。

高い標準代謝率や高い代謝余地をもつ個体は、餌が豊富な条件では急速な成長が可能である一方で、餌が乏しい条件下では維持コストが相対的に大きくなり、生残上不利になり得ると指摘されている。これらのことから、飼育水温や飼育環境の違いは、稚魚の代謝特性の形成に関与し、放流後の生残に影響する可能性が示唆された。