

学位論文題名

Physiological biotelemetry study on
migratory behavior in salmon

（バイオテレメトリー手法を用いたサケ科魚類の行動生理学的研究）

学位論文内容の要旨

サケ科魚類は生まれた河川に回帰する性質（母川回帰）を持つため、河川環境はサケ科魚類の再生産のみならず生息環境として非常に重要な場所である。しかし、我国では、治水・利水を優先した河川整備のために複雑な生態系を有した環境が改変され、野生のサケ科魚類が河川において再生産および生息できる環境が失われてきた。河川環境の復元と保全するかを考えると場合に、我国の重要な水産資源であるサケ科魚類が河川において利用する河川環境要因を明らかにすることは、野生のサケ科魚類を保全すると同時に、サケ科魚類をはじめとして魚類が利用可能な河川環境を構築するための重要な研究である。近年、拘束されていない状態の水生動物から遠隔的に、行動・生理情報を取得できるバイオテレメトリー手法が広く用いられている。本研究では従来のバイオテレメトリー手法に生理学的なアプローチを積極的に融合させることにより、サケ科魚類の行動に伴う生理学的な情報を取得し、遊泳行動や物理環境に対する反応を複合的に解析することを目的として、以下の研究を行った。

（1）標津川の蛇行復元がシロザケおよびカラフトマスの遡上行動に与える影響

日本有数のサケ漁獲高を誇る北海道道東の標津川において、旧川の三日月湖に本川を通水させることにより蛇行が復元され、蛇行復元がシロザケ親魚 (*Oncorhynchus keta*) およびカラフトマス親魚 (*O. gorbuscha*) の遡上行動に与える影響を明らかにする目的で、バイオテレメトリー手法を用いた行動学的解析を行った。筋電位(EMG: Electromyogram)発信機により水平的な位置情報を解析し、実験魚の行動を詳細に解析した。さらに、EMG 電波発信機は遊泳中の魚の筋電位情報を電波で発信し、魚の水平的な位置情報およびその筋電位情報から遊泳速度を求めることができる。本研究では蛇行復元区間における経年的な物理環境変化と両魚種の遡上行動の関係に着目し、研究を行った。両魚種において経年的に蛇行区間で定位行動（遡上中の休息）が長く観察されるようになり、それに伴い蛇行区間では流速および水深に多様性が確認された。つまり、蛇行復元によって形成された複雑な物理環境によって両魚種の遡上中の休息場が形成されていることが示された。

（2）カラフトマス親魚の二次性徴が遊泳エネルギーコストに与える影響

一般的にサケ科魚類は河川に遡上する際に摂餌を止めることができておらず、体に蓄えたエネルギーのみを使って産卵場まで到達し産卵を完結させなくてはならない。つまり、遡上のためのエネルギー消費（代謝）を最小にすることはサケ科魚類の遡上・産卵には重要な問題である。本研究ではカラフトマスの二次性徴による雌雄の形態の違いが遊泳エネルギー消費に与える影響に着目し、流速が調節可能な密閉型水槽

を用いて遊泳速度とエネルギー消費の関係についてモデルを作成し、実験を行い、さらに EMG 発信機を用いて雌雄の遡上行動を比較した。遊泳エネルギー消費は雌に比べて雄において流速が上昇するほど大きくなつた。さらに、Swimming efficiency index(SEI)は雄に比べて雌で高くなり、エネルギー消費は雄で高くなつた。つまり、成熟したカラフトマスのオスに特異的にみられる背中のこぶ（せっぱり）が水の抵抗となりせっぱりの発達がないメスに比べてエネルギー消費が大きくなり、雌雄の形態の違いが遡上のエネルギー消費に大きな影響を与えることが明らかになつた。

（3）河川増水が台湾のサラマオマスの河川内行動に与える影響

台湾のごく一部の高地河川にのみ生息するサラマオマス (*O. masou formosanus*) は固有亜種であり、台湾の天然記念物にも指定されている世界で最も南に生息するサケ科魚類である。サラマオマスは近年周辺の農地開発および大規模な砂防ダムの設置によりその生息数が減少し、絶滅が危惧されており、緊急の保護対策が必要であるが、その河川内行動生態には不明な点が数多く残されている。サラマオマスが生息する河川は台風の通り道に位置しており、毎年大規模な増水が発生する。増水によりサラマオマスが水温の高い下流側に流された場合、砂防ダムにより河川が分断されているためサラマオマスの生態に大きな影響を及ぼす可能性が考えられた。しかし、従来の水中観察などの古典的手法では増水時におけるサラマオマスの行動を時系列で知ることはできない。そこで増水時におけるサラマオマスの行動生態を明らかにするため、ナノタグを用いたバイオテレメトリー手法により本種の河川内行動を調査した。調査を行った期間の台風通過により平常時より 3m 水位が上昇した。しかし、実験魚は増水期を通して主に巨石の下流側に定位し大きな移動は見せなかつた。つまりサラマオマスは大規模な増水でも下流側に流されることはなく、巨石が生息環境としてだけでなく増水時の避難場所としても機能しており本種の生存にとって重要な河川環境要因であることが示された。また、本研究で得られた研究成果は絶滅危惧種であるサラマオマスの生息環境保全を行うための重要な情報を提供した。

（4）シロザケの産卵行動時における心停止およびその制御に関する研究

サケ科魚類の産卵行動は水中観察によって非常に深く研究が進められてきた。しかし、サケ科魚類の産卵行動は非常に激しい運動を伴うが、産卵行動時的心拍変化など生理学的な変化については不明な点が多かつた。本研究では産卵行動時におけるシロザケから心電図ロガーを用いて心電図を導出するための手法を確立し、産卵行動時のシロザケ親魚 13 尾（オス 5 尾、メス 8 尾）から各個体 4-8 時間程度の心電図を導出することに成功した。その結果、産卵の瞬間にオスで 5 秒、メスで 7 秒の心停止が起きていることが明らかとなつた。さらに、心電図の波形解析を導入した。波形解析により心停止前後において通常とは異なる特異的な波形変化（T 波）を見出した。また、魚類の自律神経系による心拍制御機能に着目し薬理学的実験を行つた。心電図ロガーを装着したシロザケに交感神経を遮断する薬（ソタロール）または副交感神経を遮断する薬（アトロピン）を投与し、産卵行動を観察した。その結果、すべての個体で産卵行動が観察されたが副交感神経を遮断するアトロピンを投与した個体でのみ心停止が観察されなかつた。つまり、産卵の瞬間の心停止は副交感神経によって制御されていることを示した。

本研究は、バイオテレメトリー手法によりサケ科魚類の環境変化に伴つた行動生理学的機能を明らかにし、サケ科魚類の河川における生息環境保全のための基礎的知見を収集した。さらに、従来のバイオテレメトリー手法と生理的手法を融合させることにより、野外におけるサケ科魚類の行動生理学的知見と河川の物理環境要因との関係性を解析する有効性を提示した。

学位論文審査の要旨

主査教授 上田 宏
副査教授 東 正剛
副査助教 三谷 曜子
副査講師 坂本 健太郎 (大学院獣医学研究科)
副査准教授 小島 隆人 (日本大学)

生物資源科学部)

学位論文題名

Physiological biotelemetry study on migratory behavior in salmon

(バイオテレメトリー手法を用いたサケ科魚類の行動生理学的研究)

生まれた河川に回帰する性質をもつサケ科魚類にとって河川環境は再生産のみならず生息環境として非常に重要な場所である。しかし、我国では、治水・利水を優先した河川整備のために複雑な生態系を有した環境が改変され、野生のサケ科魚類が河川において再生産および生息できる環境が失われてきた。河川環境の復元と保全を考える場合に、我国の重要な水産資源であるサケ科魚類が河川において利用する環境要因を明らかにすることは、野生のサケ科魚類を保全すると同時に、サケ科魚類をはじめとして魚類が利用可能な河川環境を構築するための重要な研究である。本研究では従来のバイオテレメトリー手法に生理学的なアプローチを積極的に融合させることにより、サケ科魚類の行動に伴う生理学的な情報を取得し、遊泳行動や物理環境に対する反応を複合的に解析することを目的として、以下の研究を行った。

(1) 標津川の蛇行復元がシロザケおよびカラフトマスの遡上行動に与える影響

北海道道東の標津川において、旧川の三日月湖に本川を通水させることにより蛇行が復元され、蛇行復元がシロザケ親魚 (*Oncorhynchus keta*) およびカラフトマス親魚 (*O. gorbuscha*) の遡上行動に与える影響を明らかにする目的で、筋電位(EMG: Electromyogram)発信機を用いたバイオテレメトリー手法によりこれらの遡上行動を解析した。両魚種において経年に蛇行区間で定位行動(遡上中の休息)が長く観察されるようになり、それに伴い蛇行区間では流速および水深に多様性が確認された。つまり、蛇行復元によって形成された複雑な物理環境によって両魚種の遡上中の休息場が形成されていることが示された。

(2) カラフトマス親魚の二次性徴が遊泳エネルギーコストに与える影響

河川に遡上する際に摂餌を止めるサケ科魚類にとって、遡上のためのエネルギー消費（代謝）を最小にすることは遡上・産卵にとって重要な問題である。本研究ではカラフトマスの二次性徴による雌雄の形態の違いが遊泳エネルギー消費に与える影響に着目し、流速が調節可能な密閉型水槽を用いた室内実験を行い、さらにEMG発信機を用いて雌雄の遡上行動を比較した。遊泳エネルギー消費は雌に比べて雄において流速が上昇するほど大きくなった。さらに、遡上効率は雄に比べて雌で高くなり、エネルギー消費は雄で高くなかった。つまり、成熟したカラフトマスのオスに特異的にみられる背中のこぶ（せっぽり）が水の抵抗となり、メスに比べてエネルギー消費が大きくなり、雌雄の形態の違いが遡上のエネルギー消費に大きな影響を与えることが明らかになった。

(3) 河川増水が台湾のサラマオマスの河川内行動に与える影響

台湾のごく一部の高地河川にのみ生息するサラマオマス (*O. masou formosanus*) は台湾の天然記念物にも指定されている世界で最も南に生息するサケ科魚類である。サラマオマスは近年周辺の農地開発および大規模な砂防ダムの設置によりその生息数が減少し、絶滅が危惧されているが、河川内行動生態には不明な点が数多く残されている。また、サラマオマスが生息する河川は台風の通り道に位置しており、毎年大規模な増水が発生するが、増水時の行動生態は不明であった。本研究ではナノタグを用いたバイオテレメトリー手法により増水時における本種の河川内行動を調査した。調査を行った期間の台風通過により平常時より 3m 水位が上昇した。しかし、実験魚は増水期を通して主に巨石の下流側に定位し大きな移動は見せなかった。つまりサラマオマスは大規模な増水でも下流側に流されることなく、巨石が生息環境としてだけでなく増水時の避難場所としても機能していることが示された。

(4) ECGロガーを用いたシロザケ産卵行動時における心拍変動に関する研究

本研究では産卵行動時におけるシロザケから心電図ロガーを用いて心電図を導出するための手法を確立し、産卵行動時のシロザケ親魚、雄 5 尾、雌 8 尾から各個体 4-8 時間程度の心電図を導出することに成功した。その結果、産卵の瞬間に雄で 5 秒、雌で 7 秒の心停止が起きていることが明らかとなった。さらに、心電図の波形解析により心停止前後において通常とは異なる特異的な波形変化 (T 波) を見出した。また、魚類の自律神経系による心拍制御機能に着目し薬理学的実験を行った。その結果、すべての個体で産卵行動が観察されたが副交感神経阻害剤を投与した個体でのみ心停止が観察されず、産卵の瞬間の心停止は副交感神経によって制御されていることを示した。

本研究はバイオテレメトリー手法と生理学的手法を融合させ、野外でのサケ科魚の行動生理学的知見と河川の物理環境要因との関係性を解析する有効性を提示した。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が 3 カ月短縮により、博士（環境科学）の学位を受けるのに充分な資格を有するものと判定した。