

令和3年度 河川砂防技術研究開発公募 地域課題分野(河川生態) 研究開発テーマ
＜一般研究:事後評価結果＞

テーマおよび概要		研究代表者名	評価	審議結果
テーマ	木曽三川流域における生物群集を対象とした河川生態系の管理手法に関する研究	岐阜経済大学 森 誠一	A	研究目的は達成され、 十分な研究成果があった。
概要	木曽三川流域の地史的背景を踏まえて、特に氾濫原及び扇状地の河川生態系を構成する生物多様性を進化学的視点で捉え、その人為的変化の影響を把握し、河川環境目標の検討における生態系サービス評価を提示する。			

評価の凡例

- A: 研究目的は達成され、十分な研究成果があった。
- B: 研究目的は概ね達成され、研究成果があった。
- C: 一定の研究成果があった。
- D: 研究成果があったと言い難い。

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

① 研究代表者	氏 名 （ふりがな）		所 属		役 職		
	森 誠一		岐阜協立大学院 地域創生研究所		教授		
② 技術研究 開発テーマ	名称	木曾三川流域における生物群集を対象とした河川生態系の管理手法に関する研究					
③ 研究経費 （単位：万円）	28年度	29年度	30年度	31年度	令和2年度	年度	総 合 計
※端数切り捨て。	490 万円	983 万円	983 万円	983 万円	561 万円	－ 万円	4001 万円
④研究者氏名 （研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）							
氏 名		所属機関・役職（※令和 年3月31日現在）					
鷺見哲也		大同大学・教授（博士・工学）					
田代 喬		名古屋大学・特任教授（博士・工学）					
陀安一郎		総合地球環境学研究所・教授（理学博士）					
渡辺勝敏		京都大学・准教授（水産学博士）					
永山滋也		岐阜大学流域圏科学研究センター・研究員（博士・農学）					
山崎裕治		富山大学理学部・准教授（水産学博士）					
北村淳一		三重県立総合博物館・学芸員（博士・理学）					
⑤研究の目的・目標 （様式地生-1、地生-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。） 河川生態系を生物の進化史的な視点を踏まえて、人為的時間における改変（物理的・化学的および生物的イベント）の影響を取り込み、河川環境の実態を把握し、問題解決への提案と事業化への実践、およびその効果検証を目的とする。人為的時間には有史以降、江戸期の新田開発期、明治以降の近代治水期、高度経済成長期以降、環境配慮も目的とする河川法改正以降などの時間スケールを含意する。本研究は、生物の進化時間を視野に入れつつ、縄文時代の海岸線の後退期（数千年前）以降、おもに木曾三川によって形成された濃尾平野の河川生態史を背景に、その過程解析を踏まえて、人為的に分断された河川環境の変化が生物生息にどのような影響を与えてきたかを把握し、今後の河川管理における環境改善に対して具体的活用を検討・提示する。特に氾濫原環境のワンド形成と扇状地河川の湧水河川における湧水域動態を明らかにし、生物の地史的短時間スケールに応答する適応現象（＝生息場の変化過程と生態・遺伝的応答）を検証する。その成果をもって、保全・再生を目的とする環境配慮事業の工程等や、事業実施に際して効果モニタリングに必要な視点・手法を提示する。さらに、外来種対策など事業化の実践においては、地域連携の活動育成を含む河川整備・管理に資するシナリオ構築を具体の現場で提示する。							

⑥研究成果

(10頁程度)

木曽川における二枚貝類生息環境の10年変化 揖斐川高水敷掘削後のワンド・二枚貝の再生と経年劣化

木曽川では、河床低下に起因して裸地状の砂州が樹林に置き換わる「樹林化」が生じてから30年以上が経過した。樹林化した河道内氾濫原には、希少なイタセンパラやイシガイ科二枚貝類（イシガイ類）の生息場となるワンドやたまり（以下、氾濫原水域）が存在し、野生個体群の存続を支えてきた。しかし、底泥や有機物（枝葉など）の慢性的な堆積の進行に伴うワンドやたまりの生息場機能の劣化が懸念されている。木曽川における河道内氾濫原環境と希少な依存種を保全するためには、既存氾濫原水域の生息場機能の経年変化のトレンドや、新しく形成される氾濫原水域の生息場としての効果を把握する必要がある。本研究では、木曽川の自然堤防帯区間に存在する氾濫原水域において、イシガイ類生息環境の10年間（2007～2017）の変化とその要因を検討した。

対象49箇所の氾濫原水域のうち、2007年にイシガイ類の生息が確認されたのは19箇所であった。約10年後の2018年には、そのうち17箇所において生息数が減少した（生息数ゼロ：7箇所、減少率50%以上：9箇所）。生息数の増加は2箇所のみで、そのうち顕著な増加（2→67個体）は1箇所のみであった。2007年に生息数ゼロであった水域では、2018年も同様であった。既存水域における生息場機能の劣化要因として、土砂堆積と本川水位の低下による本川－水域間の連結性の低下が示唆された。一方、ここ10年の間に新たに自然形成されたすべての水域においてイシガイ類の生息が確認され、イタセンパラの産卵も確認された。しかし、新規水域はわずか5箇所だけであり、既存水域における劣化を補うほどではなかった。

既存水域の全体的な劣化傾向と新規水域の良好さは、二枚貝とイタセンパラの生息場としてみた場合、ワンドの機能には寿命があることを示唆する。そのため、新規水域による保全効果を期待したいが、流路が固定され、砂の供給量も制限された現況河道の条件では川の営力に依存した新規水域の形成はほぼ見込めない。よって、河道掘削などを通して新規水域の形成や生息場シフトを促進する積極的な働きかけが必要であろう。

その根拠となる「河道掘削後の新規ワンドの自然形成＝二枚貝の生息場の再生」については、過年度成果の揖斐川高水敷掘削地の研究成果。ただし、揖斐川でも自然にできたワンドが徐々に劣化する様子が分かっている。よって、主な治水整備メニューである河道掘削を利用した「循環的氾濫原再生」、すなわちゾーニングと掘削回帰年に基づき定期的に掘削しつつ、常に区間内のどこかにフレッシュなワンドが存在するよう戦略的な管理を行う必要があるだろう。

営力依存の限界と循環的氾濫原再生の合理性～二枚貝類生息環境の10年変化から～

木曽川では、河床低下に起因して裸地状の砂州が樹林に置き換わる「樹林化」が生じてから30年以上が経過した。樹林化した河道内氾濫原には、希少なイタセンパラやイシガイ科二枚貝類（イシガイ類）の生息場となるワンドやたまり（以下、氾濫原水域）が存在し、野生個体群の存続を支えてきた。しかし、底泥や有機物（枝葉など）の慢性的な堆積の進行に伴うワンドやたまりの生息場機能の劣化が懸念されている。木曽川における河道内氾濫原環境と希少な依存種を保全するためには、既存氾濫原水域の生息場機能の経年変化のトレンドや、新しく形成される氾濫原水域の生息場としての効果を把握する必要がある。本研究では、木曽川の自然堤防帯区間に存在する氾濫原水域において、イシガイ類生息環境の10年間（2007～2017）の変化とその要因を検討した。

対象49箇所の氾濫原水域のうち、2007年にイシガイ類の生息が確認されたのは19箇所であった。約10年後の2018年には、そのうち17箇所において生息数が減少した（生息数ゼロ：7箇所、減少率50%以上：9箇所）。生息数の増加は2箇所のみで、そのうち顕著な増加（2→67個体）は1箇所のみであった。2007年に生息数ゼロであった水域では、2018年も同様であった。既存水域における生息場機能の劣化要因として、土砂堆積と本川水位の低下による本川－水域間の連結性の低下が示唆された。一方、ここ10年の間に新たに自然形成されたすべての水域においてイシガイ類の生息が確認され、イタセンパラの産卵も確認された。しかし、新規水域はわずか5箇所だけであり、既存水域における劣化を補うほどではなかった。

既存水域が劣化する中、新規水域による保全効果を期待したいが、流路が固定され、砂の供給量も制限された現況河道の条件では難しいと考えられる。つまり、木曽川では川の営力に依存した河道内氾濫原環境の保全には限界があり、河道掘削などを通して新規水域の形成や生息場シフトを促進する

積極的な働きかけが必要であろう。

環境 DNA を用いたイタセンパラ移動特性の解明～分散戦略と相反する現実～

生物の移動生態は個体群の分布や維持に関わる重要なファクターである。経験的には、イタセンパラは産卵期によく移動するとされるが科学的な裏付けはとれていない。また、木曽川のように、本種の主たる生息場がワンドやたまり（以下、氾濫原水域）である大規模な河川において移動生態はベールに包まれたままである。本研究では、稚魚期から産卵期（5 月～10 月）にかけての季節的な移動を明らかにするために環境 DNA を活用した。木曽川の氾濫原水域 14 箇所において概ね 1 ヶ月おきに採水し、リアルタイム PCR を用いた種特異的解析を行った。採水方法は過年度成果に依った。1 つの水域につき、水域全体にばらつくように設定した 5 箇所から 1 L ずつ採水を行い、その混合水 400mL を解析に使用した。

5 月以降、河川の増水により全ワンドが連結（冠水）する機会は度々あったが、8 月 13 日から 9 月 25 日にかけてのみイタセンパラの出現する（DNA が検出される）ワンドが顕著に増加した。これは産卵期に移動が活発化したことを示唆する。この産卵期の移動とワンド環境特性（冠水持続時間、ワンド面積、本川水際からの距離）との関係を検討した結果、本川水際からの距離が近いワンドに本種が移入する傾向が見られた。イタセンパラは産卵期に生じる河川の増水に乗じて、比較的本川寄りの氾濫域を移動し、産卵に適したワンドへの移入機会を増やし、分布の拡大や維持を図っていることが示唆される。しかし近年、イタセンパラの産卵基質となるイシガイ科二枚貝類が生息できる氾濫原水域は減少傾向にある。これは、イタセンパラが移動した先で再生産できずに死亡する無効分散を結果として増やしている可能性がある。二枚貝類の生息、特にリクルートに適した水域の積極的な保全が望まれる。

イタセンパラの産卵移動と再生産ワンドの特性

生物の移動生態は個体群の分布や維持に関わる重要なファクターである。経験的には、イタセンパラは産卵期によく移動するとされるが科学的な裏付けはとれていない。また、木曽川のように、本種の主たる生息場がワンドやたまり（以下、氾濫原水域）である大規模な河川において移動生態はベールに包まれたままである。本研究では、稚魚期から産卵期（5 月～10 月）にかけての季節的な移動を明らかにするために環境 DNA を活用した。また翌春の稚魚調査から、再生産に成功した水域とその特徴を検討した。木曽川の氾濫原水域 14 箇所において概ね 1 ヶ月おきに採水し、リアルタイム PCR を用いた種特異的解析を行った。採水方法は過年度成果に依った。1 つの水域につき、水域全体にばらつくように設定した 5 箇所から 1 L ずつ採水を行い、その混合水 400mL を解析に使用した。

浮出期 5 月以降、河川の増水により全ワンドが連結（冠水）する機会は度々あったが、8 月 13 日から 9 月 25 日にかけてのみイタセンパラの出現する（DNA が検出される）ワンドが顕著に増加した。これは秋の産卵期に移動が活発化したことを示唆する。この産卵期の移動とワンド環境特性（本川からの比高、ワンド面積、本川水際からの距離）との間には一貫した関係はなく、本種の産卵期における移動は“好適な生息場の選択”よりも“分散”に主眼が置かれた戦略であることが示唆された。イタセンパラは産卵期に生じる河川の増水に乗じて、氾濫域を移動し、分散の結果として産卵成功度を高め、分布の拡大や維持を図るという生活史戦略を獲得していると考えられる。

しかし、秋に親魚が分散した 10 水域のうち、翌春に稚魚の浮出が確認された水域は 2 箇所だけであり、残り 8 水域では再生産が確認されなかった。稚魚が確認された水域は本川と常に連結しているワンドであった。これは、56 箇所の水域を対象にした稚魚調査の結果とも整合的であった：再生産に寄与した水域の割合は、ワンドで 50%以上（9/17）だったのに対し、本川から孤立した“たまり”では約 5%（2/39）であった。イタセンパラが進化的に獲得してきた秋の産卵移動は、陸域化して孤立したたまりが多くなった現在の河道内氾濫原では結果的に無効分散を増やしている可能性がある。無効分散を減らし、イタセンパラの再生産効率を高めるには、本川と連結した既存ワンドの保全のみならず、河道掘削等による新規ワンドの形成や生息場シフトを促進する積極的な働きかけが必要である。

航空レーザー測量による河道内氾濫原の地形 DEM～2008 年と 2018 年の測定精度の相違

2007 年から 2009 年にかけて、全国の直轄河川において航空レーザー測量によるデジタル標高モデル（地形 DEM）が整備され、高精細な河道内地形データとして活用されてきた。その整備から 10 年以上が経過し、河道内地形の変化を詳細に把握して、現況河川が持つ特性を理解するとともに、今後の河川整備に活かす取り組みが各地で始まっている。初期の地形 DEM が整備されたとき、木曽川

は既に本川と陸域部が二極化し、河原はほとんどなく、樹林化していた。現在もその外観に変化はないが、ワンドやたまりにおける二枚貝の生息量減少の実態が明らかになり、その要因が土砂堆積によるワンド・たまりの冠水頻度の低下に起因するのではないかと考えられている。そこで、初期の地形 DEM と 2018 年に取得した新規地形 DEM から、河道内氾濫原の地形変化を検討しようとしたところ、現地で土砂堆積している実際の状態を反映できない結果が多く示されることに気が付いた。特に、樹林地のように、照射されたレーザーが地面に届きにくい景観区分において、この傾向が顕著であった。これは、初期と新規の地形 DEM のベースデータとなる航空レーザー測定の精度の違いに原因があると考えられた。そこで、初期 DEM と新規 DEM について、河道内氾濫原の景観区分ごとに実測値（横断測量成果）との差分をとり、精度検証を行った。また、精度に影響する要因として、ground データ（地面の高さを捉えたと判断されたレーザー照射点）の点群密度の差を検討した。

初期 DEM と新規 DEM の実測値からの平均差分（すなわち平均誤差）は、裸地である砂州ではほぼ変わりなかったが、その他の景観区分（芝地、樹林地、草地、竹林、道路・市街地）では初期 DEM の方が 1.8～2.7 倍大きかった。つまり、新規 DEM の方が高い精度であった。また、ground データの点群密度はいずれの景観区分においても圧倒的に 2018 年の方が高かった。特に、2018 年における樹林地と竹林の点群密度は、それぞれ 2008 年の 8.7 倍、16.1 倍であった。ground データは、周辺の点データの標高値の中で相対的に低い値として選ばれているため、必ずしも地面を捉えた点であるとは限らない。そのため、点群密度が高ければ、より地面に近い高さを捉えた低い標高値を持つ点を ground データとして採用している確率が高まり、逆に点群密度が低ければ地面を捉える確率が下がる。それゆえ、点群密度の高い ground データに基づく新規 DEM は、初期 DEM に比べて高い精度（小さい差分）を示したと考えられる。なお、全体的に 2018 年の方が、点群密度が高い理由は、レーザー測量機器の技術進展に伴い照射密度がそもそも高いことに起因する。

以上より、2007～2009 年に整備された地形 DEM と現在取得される地形 DEM を用いて河道内における地形変化を検討する際には、景観区分ごとの誤差を考慮する必要がある。そうすることで、土砂の堆積や洗堀の実態、ならびに河道内氾濫原における冠水頻度の変化などを、正確に把握することが可能になる。

木曽川におけるヌートリアの食性～二枚貝および陸上植物の捕食実態～

木曽川に定着している特定外来生物ヌートリアが二枚貝類を捕食している可能性が長らく指摘されていた。もしそうであれば、二枚貝類個体群への影響だけでなく、二枚貝類を産卵に利用するイタセンパラにも間接的に悪影響が及ぶ。ヌートリアは原産地では植物食を示す。そこで、二枚貝類と陸上植物を対象としたヌートリアの糞 DNA 分析を行い、捕食の実態と季節的な食性の検討を行った。

4 つのワンドのうち 2 つで、ヌートリアの糞から二枚貝類の DNA が検出された。そのうち 1 つのワンドでは通年にわたって二枚貝の DNA が検出された。すなわち、ヌートリアは通年にわたり二枚貝類を捕食していた。かつて二枚貝が多く捕食されていた水域（過去の貝塚調査に基づく）では、二枚貝の大型個体が減少していた。陸上植物ではノイバラとスゲ類が通年にわたる主食であり、いくつかの多年生草本もよく食べられていた。加えて温暖期には 1 年生草本もメニューに加わった。

原産地では植物食を示すヌートリアが、木曽川では動物・植物の両方を食べる雑食性を示した。近縁種のマスカラットで報告されているような、植物体が減少する冬季に二枚貝類の捕食が増えるという傾向はなく、通年にわたって二枚貝類を食べていることが明らかとなった。また、それによって、二枚貝のサイズ構成や密度が変化し、二枚貝の再生産効率に悪影響を及ぼしていることが示唆される。

木曽川ワンド群におけるイタセンパラ局所集団の遺伝的動態

希少種保全を行う上で、対象生物の遺伝的動態の把握、すなわち、集団構造や集団間の移出入の理解は不可欠である。濃尾平野を流れる木曽川には、複数のワンドが集中して存在するワンド群が、流程に沿って点在している。これまでの研究において、木曽川に生息する国指定天然記念物のイタセンパラは、ワンド群を局所的な生息地としたメタ集団構造を呈していることが判明している。しかし、調査したワンド群や個体数が限られており、集団構造やワンド群間の交流パタンの詳細は明らかになっていない。そこで本研究では、木曽川におけるイタセンパラ生息域のほぼ全域から得られた標本を用い、10 多型遺伝子座に基づくマイクロサテライト DNA 分析を行った。

まず、ワンド群および流域全体のそれぞれの階層において、ハーディ・ワインベルグ平衡 (HWE) からの逸脱を検定した結果、流域全体の階層においては、ほとんどの遺伝子座において HWE からの逸脱が認められたが、ワンド群の階層においては、HWE から逸脱した遺伝子座数は少ない傾向が示された。この結果は、主にワンド毎に繁殖が行われており、ワンド群間において、自由な交流が保たれていないことを示唆する。

次に、対応分析の結果、河川右岸のワンド群と左岸のワンド群との間で、集団の遺伝的組成が異なり、中洲のワンド群の集団はそれらの中間的な遺伝的組成を示した。また、ベイズ推定に基づく集団構造解析において、2つの祖先集団の存在が推定され、それらに由来する遺伝的特徴の保有率は、右岸のワンド群と左岸のそれとの間で互いに異なったが、中洲のワンド群では両祖先集団由来の遺伝的特徴を概ね均等に保有していた。さらに、遺伝子流動量を推定した結果、いずれのワンド群においても、遺伝子移入の9割近くが同一河岸のワンド群に由来した。

以上の結果から、木曽川に生息するイタセンパラにおいて、ワンド群間の交流は、主に同一河岸内で生じており、河川を横断する交流には、流心部の流れが障害となっているが、中洲の存在が河岸間の交流の維持に寄与していることが考えられる。そして、木曽川におけるイタセンパラの保全のためには、河岸におけるワンドおよび中洲の存在が不可欠であると考えられる。

イタセンパラの全ゲノム決定と歴史集団動態

木曽三川流域を中心とする濃尾平野の歴史的な環境変遷を魚類の集団動態から探るため、氾濫原の存在と密接に関係した生態をもつイタセンパラ (コイ科タナゴ亜科) の全ゲノム決定に基づく歴史的集団動態の遺伝集団構造の推定を行った。

イタセンパラは、濃尾平野、大阪平野、および富山平野に分断的に分布する希少魚であり、河川氾濫原様環境を繁殖に利用する。そのため、本種の集団の歴史は沖積平野の環境変遷をよく反映することが期待される。本研究では、本種の歴史集団動態を推定し、また今後の進化生物学や保全を含む多方面での活用を目指して、木曽川産のイタセンパラ飼育集団の1個体について全ゲノムを決定した (10X Genomics-Chromium と HiSeq X による合成ロングリード; 推定ゲノムサイズ、1.03 Gb; アセンブリ率、81%; Scaffold NG50、1.5Mb)。さらに他の平野とも対比を行うため、現在までに濃尾平野産7個体 (野生5個体、飼育2個体)、大阪平野産7個体 (半野生5個体、飼育2個体)、富山平野5個体 (野生) の計19個体の全ゲノム・リシーケンシングを行い、合計20個体の全ゲノムデータを得た。新型コロナ対策のために材料の入手や実験に滞りが生じたために、現在解析途中であるが、これまでに濃尾と大阪両集団の一部の個体の全ゲノム配列データを用い、PSMC、MAGIC、SMC++等の手法により歴史集団動態を推定した。両集団の分岐が鈴鹿山脈の隆起によると仮定して突然変異率を選択した場合、両集団とも更新世中期に増大していた集団サイズが最終氷期から完新世前半に縮小したことや集団再拡大時期にずれがあることなどが推察された。今後、得られた全個体の全ゲノムデータを解析し、3平野間の対比の中で、濃尾平野における氾濫原様環境と生物集団・群集の形成に関して考察を深め、研究を完成させる計画である。

木曽川河道内氾濫原内のワンド・たまりにおけるイタセンパラの生活史と繁殖生態および魚類の分布に影響する要因

木曽川下流域の河道内氾濫原には、様々な面積の「ワンド」や「たまり」といった恒久水域が存在し、それらの水域には様々な淡水魚類が生息している。本研究では、それら水域の魚類相を調査し、それらの魚類群集構造が成立し維持される物理環境要因や生物環境要因を明らかにしようとするものである。

特に、木曽川下流域の河道内氾濫原の「ワンド」や「たまり」には、コイ科タナゴ亜科魚類のイタセンパラ *Acheilognathus logipinnis* が生息する。タナゴ亜科魚類は生きたイシガイ科淡水二枚貝類の鰓内に卵を産み込み、子は卵黄を吸収し終えるまで貝内で過ごすという特徴的な繁殖生態をもっている。本種は日本固有種で、国の天然記念物 (1974年、文化庁) と国内希少野生動植物種 (1995年、環境省) に指定され、国のレッドリストで絶滅危惧IA類 (環境省、2020) に選定されており、現在最も絶滅が危惧される淡水魚類の1種である。本種は富山平野、琵琶湖淀川水系、濃尾平野に分布し、富山平野では、氷見市の流水であるやや小規模の河川に多く生息している。一方、琵琶湖淀川水系や濃尾平野では、河道内氾濫原の「ワンド」や「たまり」に生息し、淀川では野生個体群が近年確

認できなくなり、増殖施設における保存個体の放流による野生復帰が行われている状況である。

本研究では、木曽川の河道内氾濫原の「ワンド」や「たまり」におけるイタセンパラの生活史と繁殖生態、および約 110 水域において、淡水魚類各種が生息していた物理・生物環境条件を抽出した。

その結果、イタセンパラの生活史と繁殖生態は、産卵期が 9 月下旬から 10 月上旬で、その仔魚はタテボシガイや小型のヌマガイの外鰓内で見つかり、貝内で越冬し、翌年の 5 月上旬から 6 月上旬に貝から全長約 9 mm で泳出した。その後、9 月まで成長し、標準体長約 50 mm に達すると成熟し産卵する。産卵後の成魚は、一部の極わずかな個体は越冬するが、ほとんどの個体は死亡し、寿命はほぼ 1 年であると推定された。

河道内氾濫原水域における淡水魚類の分布傾向は、大まかに他の水域と接続する水域数が多く、冠水する標高の低い冠水し易い、本川との連結性の高い水域に良く出現する種（イタセンパラ、ツチフキ、ゼゼラ、ニゴイ、イトモロコなど）と、他の水域と接続する水域数が少なく、冠水する標高の高い冠水しにくい、孤立性の高い水域に良く出現する種（モツゴ、ギンブナ、タモロコ、オイカワ、ミナミメダカ、オオクチバス、ブルーギル）に分かれた。特に、イタセンパラは、その傾向が強く、冠水による水域の更新頻度、いわゆる水域の鮮度がより新鮮である水域に出現しやすいことが明らかとなった。

全体的に孤立性の高い水域が多いことから、イタセンパラを保全するためには、接続水域が多く冠水し易い水域を創出するため、接続水域や冠水標高を低くする人為的な造成や、水位操作による人為的な冠水管理などを行い、本川との連結性の高い水域を増やす試みが必要と考えられる。

平成 30（2018）年 7 月豪雨（西日本豪雨）や令和 2（2020）年 7 月豪雨により、近年、すべての水域が冠水する大規模な冠水イベントが生じており、イタセンパラを含む魚類の氾濫原水域の移動が確認されている。特にイタセンパラが冠水規模による移動分散および定着成功に及ぼす要因については、今後生じる冠水イベント前後の魚類相を比較し、例数を増やすことにより、より確度の高い推論が可能になると考えられる。

木曽川の河道内氾濫原における淡水魚類の分布に影響する要因

木曽川の河口から 26 km から 41 km 地点の間に、堤外地の氾濫原が発達し、大小様々な約 150 個の恒久的な水域であるワンドやたまりが存在する。これらの水域は増水のたびに冠水し、その時には物理的な攪乱を受け、物理環境を更新する。さらに冠水時は生物にとっては、様々な水域での移出入の機会となっている。そのため、木曽川は、低平地に多様な氾濫原水域を持ち、冠水規模による水域内の淡水魚類群集の時空間的な動態を評価できる面白い河川である。

本研究では、2018 年 9-10 月、2019 年 4-10 月、2020 年 9-10 月に、約 100 水域の淡水魚類相を調査し、各種の分布する環境要因を明らかにした。その結果、冠水する標高が高くて冠水しにくく他との接続水域数の少ない孤立性の高い水域に卓越する種（オオクチバス、ブルーギル、モツゴ等）と、冠水する標高が低くて冠水しやすく他との接続水域数の多い連結性の高い水域に卓越する種（ニゴイ、ゼゼラ、イタセンパラ等）に別れる傾向が明らかとなった。

さらに、国の天然記念物で、国内希少野生動植物種である希少淡水魚のコイ科タナゴ亜科魚類のイタセンパラにおいては、これまでの生息記録を用いて、恒常的に確認される水域、2018 年と 2020 年の規模の大きい出水後に希に確認された水域、過去確認された水域であるがしばらく確認されていない水域、恒常的に確認されない水域の特徴を示した。

2018 年に初めて確認された 16 水域においては、そのほとんどの 14 水域で翌年度のイタセンパラの稚魚の泳出が確認されず、繁殖できていないことが明らかとなった。また、その 1 つの水域ではイタセンパラの成魚 2 個体が確認され、成魚が越冬していたことが解った。引き続き生息が確認された 2 水域は、近年、国土交通省木曽川上流事務所が水域環境改善のため、本川との接続水域を造成した水域と浚渫した水域であった。2020 年にはさらに 4 水域で初めて確認された。

イタセンパラは本川との連結性の高い水域でよく生息が確認されるものの、比較的規模の大きい出水では、広く様々な水域に分散し生息域を拡大する。しかしながら、侵入先の環境が適さない場合は、その水域では再生産することができず、再度の出水を待ち、適した水域に移動する機会を待っているのかもしれない。

木曽川ワンドが両生類に果たす役割：ニホンアカガエル

河道内氾濫原は、魚類や二枚類以外の多くの生物にも生息場を提供しうる。ただし、生物によって好適な生息場は異なり、それは本川との連結性（冠水頻度や攪乱強度）で説明されると言われている。

つまり、河道内氾濫原における生物多様性を最大化するためには、連結性に関わる広い環境傾度が必要となる。そこで、最も連結性の低い水域で種多様性が最大になると言われている両生類（カエル類）を対象として、河道内氾濫原における生息実態、ならびに河川間比較からその生息要因を検討した。

揖斐川、長良川、木曽川のワンド（ここでいうワンドは“孤立しているたまり”）と、堤防を挟んで隣接する水田で、両生類の生息実態を調査した。水田ではアマガエル、ヌマガエル、ナゴヤダルマガエルが優占し、ワンドではツチガエル、ニホンアカガエル、ウシガエルが多かった。特に、ニホンアカガエルは木曽川のワンドにのみ出現した。また、ニホンアカガエルは堤間幅の広い場所に形成されたワンドに生息する傾向が見られた。

以上から、ワンドは冬季でも水域を必要とする種の生息場（ツチガエル：幼生で越冬、ニホンアカガエル：冬季に産卵、ウシガエル：幼生で越冬、成体は水底で冬眠）となっていることが分かった。特に、冬季に産卵するニホンアカガエルにとって、木曽川は濃尾平野における残された希少な生息地となっていた。ニホンアカガエルが木曽川にのみ残存しているのは、広い堤間幅に関係していた。すなわち、堤間幅が広いことで低水路内に形成された河道内氾濫原も広く、両生類の好む連結性の低い水域（安定した水域）が存在していたためと考えられる。

よって、河道内氾濫原において、連結性に関わる環境傾度を広く確保することは、生物多様性の最大化に寄与する。魚類や二枚貝類にのみ着目すると、連結性の高いワンドだけが重要ということになりがちである。今後は、連結性が中～低の領域にも重要な生態的機能があることを認識し、その領域を確保することが望まれる。これは、無理にすべてを高い連結性を有する領域に誘導（掘削等により低い地盤高を創出）する必要はないことを意味しており、河道内氾濫原が陸域化している現在の状況や管理コストに照らしても、調和的な保全対策である。

近世以降の濃尾平野揖斐川右岸地域における水域の変遷

濃尾平野は、傾動地塊運動に伴って生じた沈降盆地に、木曽、長良、揖斐の三川からの流出土砂が堆積することにより形成されてきた。西端には養老山地があつてその東側は沈降し続けていることから、西側の標高は相対的に低い。江戸時代には、尾張藩領を守る「御囲堤」（連続堤）が築かれた一方、その対岸地域では各集落単位を堤防で囲う「輪中集落」が展開されてきた歴史を有する。近代以降に各河川に築かれた連続堤は「氾濫原」を河道から隔離し、大規模な圃場整備は湿田を乾田に変えてきた。かつての湿田は、周囲から集めて盛り土した「堀田」とそれに伴う「堀潰れ」（掘り上げた堀）によって構成されたこともあり、当地の水域環境は劇的に変貌してきた経緯がある。揖斐川右岸地域は濃尾平野西方の海岸/氾濫平野にあつて、揖斐川右支川津屋川（流域面積71.2 km²、幹線流路延長 12.6 km）の排水域に位置付けられる。津屋川の本川流路は1656 年以降に人為的に定められ、養老山地からの複数の扇状地の末端を繋いで流れており（養老町教育委員会 1991）、平時には湧水 河川の様相を呈する（岐阜県 2001）。本研究では氾濫原における水域変遷の実態を探るため、揖斐川右岸から広がる低地域を対象に、これまでに発行された地図を分析して池沼の変遷を考察する。また、この一帯には湧水・泉（河間）との接続する水域が散在し、ハリヨやホトケドジョウ、タナゴ類が生息し、豊かな淡水生物を呈している。

調査地は、養老郡養老町・海津市南濃町に属し、揖斐川支川の牧田川と養老山地から連なる小規模扇状地に囲まれた低地域である。このうち牧田川と津屋川に挟まれた海岸/氾濫平野は「多芸(たぎ)地区」と呼ばれ、小規模な集落を含む複合輪中を呈する。水域の変遷を把握するため、1891~2015 年測量の9年代の地形図(大日本帝国陸地測量部 1893, 1924, 1935;国土地理院 1965, 1973, 1981, 1986, 1993, 2016)から抽出して経年変化を調査した。養老郡史(岐阜県地方改良協会養老郡支会・岐阜県郷土資料刊行会 1970)、養老町史(岐阜県養老郡養老町 1978)、南濃町史(岐阜県海津郡南濃町 1982)や養老町教育委員会などによる各種文献、および土地条件図(地理院地図)、空中写真(国土地理院撮影、地図センター販売)、水害地形分類図(建設省中部地方建設局木曽川上流工事事務所 1976)などの各種地図情報を参照することによって、近世以降に生じた土地改変から水域の変化を考察した。

地形図から抽出した水域数によると、1891年(68カ所)から 1959 年(85カ所)にかけて増加した後、現在は減少している(2015年、55カ所)。近世以降、連続堤の整備に伴って浸水リスクが低減した氾濫原の農地転用が進む中で、大湖沼の干拓が進み水域が細分化されたが、その後の伊勢湾台風襲来(1959年)などに伴う大規模氾濫(養老町 1962)により土地改良(圃場整備)が進展する副次的影響が生じ、水域が減少してきた様子が確認された。文献調査からは、養老町と南濃町は養老山地から連なる微高地に依拠しつつ低地域の新田開発によって発展してきたこと、その過程で集落や新田を守るために整備された輪中堤は水域の形成・維持に寄与してきたことが示唆された。すなわち、小水域は

それぞれに機能を有し、①輪中集落の合間を縫う排水路(旧○○村落江などと呼称)、②排水先の調節池(干拓された下池など)や③集落内で共同利用されてきた池沼(細池など)などに区分された。なお、現存水域は③が多く、地域の入会地(私有地)として共同管理されていることが存続要因として推察された。こうした管理の中には、掘り潰れや溜池に生息する魚介類の水産利用が含まれている。

濃尾平野西部を流れる揖斐川水系津屋川に生じた過去数十年間における堆積速度の変動

濃尾平野は、中部地方の木曽三川(木曽川、伊部川、長良川で構成される)の流送土砂によって形成されてきた。揖斐川の支川である津屋川(流域面積 71.2km²、幹線流路延長 12.6km)は「養老の滝」に源を発し、急峻で脆い養老山地の東麓にあつて南流する。地下水が豊富な濃尾平野の西縁に位置する。津屋川の現在の幹線流路は、東側にのみ連続堤防を有し、西側から養老山地に由来する多くの湧水と土砂を受け、山麓に連なる扇状地群の端を横切って伏流水を集水している。右岸(西)側には堤防が無く、養老山地の崖錐地形に起因する複数の小規模扇状地の扇端部と近接する一方、左岸(東)側には堤防が築かれ、かつての輪中地帯であった低平地と隔絶されている。この堤防は、左岸地域の集落を囲う輪中堤防と接続され、江戸時代初期(1656年)に整備されたもので、現在の川筋も人為的影響を受けたものとなっている。この江戸時代に連続堤の整備とともに出現した「排水路」(＝津屋川)という歴史が、図らずも多量の湧水を受け入れる「湧水河川」としての性質を獲得したといえ、湧水依存種の生息にとって大きく寄与し、ハリヨの最大の生息域となった可能を示している。

本研究は、津屋川の環境変化を、自然および人工的な影響を伴う土砂動態の観点から明らかにすることを目的とする。津屋川における過去数十年間の土砂動態について、鉛-210年代測定法によって評価した。堆積速度は、幹線流路の西側(右岸)に連なる池の堆積物コアにCIC(Constant Initial Concentration)およびCRS(Constant Rate of Supply)モデルを適用することによって決定した。CRSモデルはCs-137年代測定とほぼ一致した一方、鉛-210の鉛直分布は変動したためにCICモデルは適用できなかった。結果として、0.24～0.44 g cm⁻² yr⁻¹の平均堆積速度が得られたが、これは日本のほとんどの湖で報告されている値よりも大きかった。さらに、1961年から1984年にかけて、0.59、0.71、2.62 g cm⁻² yr⁻¹などの3つの極大値を持つ、より大きな堆積速度が得られており、既存の文献資料によると、これらは同時期に津屋川流域で生じた洪水や改修工事にそれぞれ対応していた。以上の結果により、河川堆積物の動態は、古典的な鉛210法(CRSモデル)でも説明できる可能性が示された。

安定同位体を用いた魚類移動の履歴分析

濃尾平野の西端を流れる揖斐川水系の津屋川は、養老山地の複合扇状地の扇端に沿って、養老山地からの水を集めながら流下する。これらの扇端から湧き出す湧水は、津屋川の環境に影響を与える重要な要素である。津屋川には、トゲウオ科イトヨ属に属するハリヨが生息している。トゲウオ科は北半球高緯度地域に広く分布する冷水性の魚類で、岐阜県の津屋川はその分布南限に位置する。温暖な気候である津屋川においてハリヨが繁栄してきた背景には、豊富な湧水により夏場でも比較的冷たい水温に保たれてきたことが大きな理由だと考えられる。しかし、1960年代以降、湧水の枯渇やそれに伴う河川環境の悪化および水域の埋め立ての進行とともにハリヨの生息地や個体数は減少しており、現在では絶滅危惧種に指定されている。そこで、ハリヨが存続するために必要な生息範囲を、生活史を通して理解することが必要である。

ストロンチウム同位体比(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)は、岩石の年代やその起源の研究に用いられてきたが、近年環境学の研究にも広く用いられるようになってきた。河川水に溶存する⁸⁷Sr/⁸⁶Sr値は、その水が辿ってきた経路の岩石に含まれるストロンチウムの⁸⁷Sr/⁸⁶Sr値が反映されるため、集水域河川の水の混合状態をトレースすることができる。本川における⁸⁷Sr/⁸⁶Sr値の流程変化は、本川に流入する湧水との混合によって生じると考えられるため、本川と湧水の⁸⁷Sr/⁸⁶Sr値の流程変化を明らかにすることで、魚類耳石の分析による移動履歴の研究に活用することができると考えられる。

本調査は、2016年12月に本川2地点と湧水6地点、2017年11月に本川8地点と湧水10地点、2018年6月に本川9地点と湧水10地点を選定し、試水について現地で0.20μmメンブランフィルターを用いて濾過を行った。濾液中の元素濃度はICP-MS(Agilent 7500cx)、⁸⁷Sr/⁸⁶Sr値は表面電離型質量分析計(Thermo Fisher Scientific TRITON)を用いて分析した。本研究における各⁸⁷Sr/⁸⁶Sr値の分析精度は、1×10⁻⁵以下であった(1SE)。

津屋川本川の最上流地点においては最も低い⁸⁷Sr/⁸⁶Sr値(0.70983)を持っており、下流に向かって連続的に⁸⁷Sr/⁸⁶Sr値が上昇していることが分かった。また、本川に流れ込んでいる湧水の⁸⁷Sr/⁸⁶Sr値

は本川に比べると高く、流程変化を説明できると考えられた。この結果は、この津屋川集水域で最も低い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値を示すと考えられる石灰岩が、最上流域のみに存在するという地質情報とも矛盾しない。本研究においては、養老山地の南北方向に沿って $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値の異なる湧水が生じていることが明らかとなったが、これは母岩となる地質の違いによるものと考えられる。

今回の結果から、津屋川の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値は本川の最上流域から下流域に向けて、また本川と湧水の間で違いがあることが明らかとなり、調査地点を選ぶことで、ハリヨが湧水のみを利用しているのか、また上流域と下流域での交流があるのかを調べるということが可能であると考えられる。

ハリヨの遺伝的多様性と集団構造

木曽三川流域を中心とする濃尾平野の歴史的な環境変遷を魚類の集団動態から探るため、湧水湿地環境に依存するトゲウオ科ハリヨ *Gasterosteus aculeatus* subsp. の遺伝集団構造の推定を行った。

イトヨの分布最南限集団の一つであるハリヨは、滋賀県（近江盆地東部）と岐阜県（濃尾平野西部）の限られた湧水地や周辺河川にのみ局所的に点在分布する。ハリヨは人為的な生息地の消失や分断化の影響により、集団の急速な縮小を経験し、一部の局所集団は人為的に再整備された環境で維持されている。種の生息場の理解に加えて、種の健全性のため集団遺伝構造の解明は基礎的な保全として重要である。

本研究では、2002–2018 年の 3 つの時期に濃尾平野各地から採集されたハリヨのサンプル（計約 900 個体）を用いて、マイクロサテライト 16 座のデータにより、遺伝的集団構造および遺伝的多様性を明らかにすることを目的とした。なお、この解析対象には、天然絶滅した三重県系統の保存集団を含んでいる。集団帰属性解析の結果、濃尾平野のハリヨは北西部と南西部の 2 集団に大きく分けられることがわかった。この結果は、生息地が分断化される以前には、ハリヨは北西部と南西部それぞれで遺伝的に交流のある局所集団からなるメタ集団を形成し、両メタ集団間では遺伝子流動が制限されていたことを示唆する。この 2 つのメタ集団の形成時期と機構を特定することはできなかったが、後氷期における濃尾平野縮小時期の退避場所を反映するか、あるいは近世の河川整備の中で人為的に生じた可能性が考えられた。この約 15 年間で各局所集団の遺伝的多様性の低下は特に認められなかったが、一部の閉鎖的な局所集団では遺伝的多様性が低く、創始者効果や過去の集団サイズの縮小が示唆された。人為的に再整備された生息地における集団の多くは、周辺の生息地に由来することが支持されたが、異なるメタ集団からの放流が強く疑われる生息地も存在した。濃尾平野の水環境と密接に関係し、象徴種ともいえるハリヨの今後の保全・管理においては、メタ集団構造を考慮しながら、遺伝的多様性の維持を図っていく必要がある。

津屋川湧水群と本川の水文学的検討

津屋川流域についてまとめた資料は多くはなく、河川整備計画の資料（岐阜県、2001）でも河道や水文分析に関する情報の詳細はほとんどない。津屋川は流域面積 71.2km²、揖斐川合流部からの管理延長は 12.6km とされている。その流域は大きく東西に分かれ、東が濃尾平野、西が養老山地東斜面とその扇状地群、である。本川の東側は揖斐川本川との間にある多芸輪中にあり、揖斐川合流点に近く合流する五三川の流域である。昭和以前は池・湿地・堀田・水田が多くを占める低平地低平地である。本研究ではこのエリアを対象とはしていない。

一方、西側は養老山地東斜面を、北から滝谷（養老の滝）、小倉谷、風呂谷・今熊谷、志津谷、徳田谷、腰越谷、羽根谷の山沢に雨を集水し、それぞれの東側への谷の出口で扇状地を形成する。扇頂部は扇端から標高差 100m を超える場所もあり、扇状地のサイズは 1–2km が多く、1/20 程度の急勾配となっている。また、隣接する扇状地と重なり合っている。沢からの流れの平時は、ほぼ全量が覆没している。これが地表に復帰するものとして東側扇端付近で湧水地を多数形成し、その水をすぐ東側で津屋川が集め、南流して揖斐川に合流する。後述するが、湧水群は扇状地どうしの重なり合う点に比較的集中している。

河道については、最下流の揖斐川合流部直前には水門が設けられている。本川の中上流部は左岸（東側）の片側堤防であり、扇状地側には設けられていないため、湧水は自由に川に流れ込むが、本川の増水時は湧水地にむかって背水となる。湧水地と本川は小さく短い水路によってつながって流れ込んでおり、湧水地の水位と、普段の河川水位との差は小さい。大きくて 1 m 程度であり、ほとんどが 50cm 程度以下となっているため、洪水時には冠水・流水による生息場の攪乱の恐れがある。主な調査対象は、津屋川中上流部の主要なハリヨ生息地を含む、志津谷～小倉谷～滝谷の小流域、ハリヨ橋から上流の本川、戸田から上流の各湧水地とした。

南濃町および養老町に位置する複合輪中である多芸輪中は、揖斐川・津屋川・牧田川に囲まれた低平地の総称であり、津屋川の左岸堤防（片側堤防）はその一部となしている。江戸初期の輪中内部の新田開発で、山側からの水を防除するために津屋川の堤防は作られた。それ以降何度も氾濫と堤防強化を繰り返しているが、養老山地の各谷・扇状地が急峻なため土砂が津屋川に流れ混むことによる閉塞化などの要素が安定した農地確保を困難にしてきた歴史があり、現在も続く課題となっている。扇端に沿って流れる津屋川の平面線形が蛇行的であるのは、扇状地の地形としてだけではなく、谷正面ほど河道閉塞を避けるために堤防が東に引かれてきたことと関係していることがわかる。扇端での谷の出口は、河口閉塞を緩和するために下流または上流側に曲がるように落とされている。また、砂防工事の重要性が認識され、特に明治以降は大規模な砂防工事が養老山地で行われてきた。湧水河川である津屋川は、生息地のイメージとは大きく異なり、土砂流入や河道変遷と言った動的な環境と、水田の維持との間に成立していたことがうかがえる。2001 年の河川整備計画では、中上流部の右岸扇状地側の無堤部での浸水、支川（谷）合流部閉塞による溢水の危険、左岸堤防の漏水（平地と水位の差が大きい）、の 3 つが治水上の危険とされている。

津屋川や谷、湧水群について、流量などの基本的な情報は、研究期間の当初は全く把握できていない状況であった。雨量観測点は国土交通省上多度観測点が収集しているため、経年の雨量変動も把握できる状況であったが、流量についてはわかっていない。また、概念的には、山地の沢への流出、扇状地覆没、湧水復帰、津屋川が集水流下という流れが基本であると想定できた。しかし、

- ・扇状地地下水が濃尾平野地下水へと逸失する量が、どの程度あるのか、無視できるのか。

- ・沢への流出と、扇状地覆没を経由しての津屋川への流出には、貯留性が想定でき、それがどの程度の遅れ・安定性をもたらすのか（湧水の水資源として有利に作用しているのか）

といった点は、直接的に把握されておらず、河川での基本的な水文調査から行うとともに、沢と湧水の流量応答について調査・計算する必要がある、以下の調査を行った。

①水文観測による湧水量の空間分布の推定

2017 年と 2020 年に本川中上流における多地点（最大 9 地点）での流量分布を計測した。5 月から 10 月の月 1 回程度、流況は平水から渇水の流況とした。川の中で 3 断面以上に分割し、電磁流速計（KENEK VE-20）で 1 点法とした。結果から、縦断方向に流量が急増する区間とそうでない区間が明瞭に分かれて見られた。主要湧水地での増加が目立ったが、湧水地からの流量を実測したところ、それ以外の隠れた湧水がないと本川流量は説明できなかった。

②電気伝導率を利用した湧水ポテンシャル分布のより詳細な把握

流量観測は時間的なコストが大きい、高密度には計測できない。そこで、電気伝導率計でさらに多地点で計測することで、上流に流入する高い EC の水が湧水流入で希釈される効果を用いて、水収支と物質収支の式を組み合わせることで計算することにより、より EC 観測点に応じた細かさの湧水ポテンシャル分布を得ることができた。

これらの湧水量の分布が集中するのは、谷毎の扇状地が隣り合う境界で、平野に張り出す扇状地からやや山側に地形がくぼんだエリアにあたる。これについては、平面 2 次元の浸透流モデル（Dupuit-Forchheimer 仮定、定常流）で模擬計算したところ、このように川への流出が集中するような地下水位ポテンシャル分布を形成することを定性的に確認できた。

③水収支解析と現地調査による、濃尾平野への溢水可能性の検討

先の結果は、単に本川の流量による（みかけの）湧水量を推定したものであるが、支川流域が西側（右岸側）に南北に並んでいるため、支川の扇状地区間ごとに水収支がどうなるのかを把握した。その結果、最上流の滝谷の浸透水は本川にほとんど復帰せず、平野側に流失していることが分かった。またそれ以外の谷（小倉・志津谷）は、両者は同等であったため、平野への逸失はほぼないものとみなせることが分かった。このことから、津屋川の本川上流は、平野への流域面積の観点ではもっと多い流量が獲得できるはずである。湧水地どうしにハリヨなどの水生生物の個体の移動が可能になるには、本川がそれに近い環境になることが必要になるが、上流部は流量が少なすぎて水温等が安定しないため、湧水環境は孤立していると考えられる。また、連続的なデータで確かめる必要があったが、扇状地にいったん覆没してからの流出は、きわめて遅い流出ピークを持っていることを示唆した。

④津屋川・湧水の流量変動（流出解析・地下水位観測）

湧水河川としての津屋川の流出特性がわかっていないため、先の流量観測結果と流出解析、湧水地からの流量変動データを用いて推定することとした。清水池の西側に海津市の許可を得て深さ 70cm ほどの井戸を設置し、その水位を自記水位計で 1 時間データとして連続計測している。その解析結果から、2017 年の秋、2021 年の春季～秋季の流量波形を推定した。降雨直後の波形では数日間のピ

ーク・低減ののち、10 日を超えるゆっくりした流量増加・減少の山が現れることが明らかになり、津屋川本川の観測流量が前 3 日および前 10 日雨量と相関が現れることと対応しており、津屋川の流出特性、特に時間特性がこの調査で明らかになった。

また、このような山地流出・扇状地貯留流出という流出プロセスは、湧水地群および津屋川の水文循環を安定させ、湧水地の水温・水質環境を安定させるとともに、津屋川の流況変動を抑制する効果を保たせているということも示した。一方で、清水池のデータをみると、流量変動自体は大きく、ベースとなる地下水位が低下してしまうと、湧水が極端に少ない期間が現れやすくなる懸念も同時に示している。よって、周辺の地下水位の低下をもたらす要素（例えば、河道掘削による水位低下、事業所の連続揚水など）には、注意を払う予防措置が必要であると考えられる。

湧水群の出水かく乱に関する調査（水位観測・資料調査・氾濫解析）

湧水という本来安定的であるとみなされる環境でありながら、津屋川が増水すれば水位差がほとんどないこれらの湧水地は、周辺も含めて水没することがわかっている。通常の河川であれば、出水に伴う氾濫原の冠水は、流速等の物理的かく乱、土砂・シルトの流入・堆積、濁質水質など、生息場・避難場としての機能は大きく低下し、魚類等は流失する危険もある。それが、本来安定的であるべき湧水環境であればなおのことであるが、実際には出水があっても生息環境は比較的保たれている。本項ではこれについて、①冠水頻度の調査、②流れ場の評価を行った。

①湧水地の冠水動向

津屋川沿川にある 10 か所の湧水地について、それが河川水位の上昇によりどの程度の冠水頻度があるのかを、ダイバー自記水位計の設置により調査した。年に数度程度以上の出水時における、本川の出水特性を見ると、津屋川流域への降雨出水に伴う本川流量増加がもたらす水位上昇は大きくはなく、下流の揖斐川からの背水による水位上昇が顕著であった。ピーク時の下流からの背水はほぼ水平に遡上しており、湧水地の多い 7k~10k 付近は、その水位次第で冠水の頻度を決することであることがわかった。

湧水地の標高と内挿によって得られた近隣河道水位との比較をみると、2019 年はほとんどの地点で年に 2 回以上冠水しており、過去 3 年の清水池の冠水回数の変化をみると、これよりも多い頻度が平均的であることが推測された。2018 年、2017 年は大規模な出水があったため、冠水時の最大水深は 2 m 以上となっている。

揖斐川の増水が、主要な湧水地群の冠水頻度と、その水深をほぼ決めていることがわかった。これは、流域としての津屋川での水循環が決めるのではなく、濃尾傾動運動がなした揖斐川や津屋川の勾配・低さがこの状況を支配しているという点が特徴的である。また、このような出水では、下流からのゆっくりした水位上昇による冠水であることから、湧水が途切れない中で冠水していく現場での水質は、高濁度の揖斐川の水がそのまま湧水地に流れ込むのではないため、環境としては緩やかで変化は小さいのではないかと推測できる。

②流水のシミュレーションによる湧水地の流速の計算

津屋川の左岸堤防が破堤しない条件で、計算ソフト iRIC（エンジン：Nays2DH）を用いて、流動計算を行い、各湧水地での流速がどの程度となるのかを推定した。下流端は揖斐川西小島地点水位の時間波形を与え、流入流量は流出解析計算に基づいて波形を与えた。粗度係数は氾濫シミュレーションマニュアルに沿って与え、地形は地理院 5m メッシュ標高と、現地測量にをベースとした河道地形を与えた。対象洪水は、3 年間で最大の出水であった 2017 年 10 月 23 日に洪水とした。

計算の結果、主な湧水地の流速は 10cm/s にも及ばず、それも池中心付近での流れであることがわかった。これは、下流からの背水による増水であること、多くの湧水地は周辺に高い場所があり、低地が広く氾濫域の断面が大きいことなどがあげられる。

例えばハリヨの遊泳力との比較でみれば十分遅い流れであり、さらには増水で水位が上がるに従い、扇状地斜面側の湧水する斜面の浅い部分に避難できていれば、流速はほとんどなく、水質も問題ない状況で出水をやり過ごすことができると考えられる。

津屋川本川の水温安定化の検討

湧水地はそこから流れ出る水が水路を經由して津屋川につながっており、同環境であれば湧水地間の諸生物の往来は可能であるが、津屋川中流部は川が幅広となり流れは緩く浅く、日射や気温の影響受けやすく、水温変動が大きいいため、湧水と同環境とはなっていない。しかし、ソースである水は湧水起源であるから、通常の河川よりは冷涼で安定的である。北方系魚種であるハリヨにとっては 15℃

前後の水温域が必須であり、本研究の成果は湧水に依存する種にとって極めて重要である。

また、上流部は先に得た結論のとおり、支川扇状地からの湧水の復帰量は少なく、濃尾平野に逸失しているため、同様に湧水地間を往来させるに十分とは言えない環境をもたらしていると考えられ、以下の2つの調査を行った。

①河床堆積層下の水圧と本川環境改善可能性の検討（現地河床掘削調査）

中流部（浄水公園湧水地付近、下流から8km付近）の本川で、河床の湧水が回復すれば、河道の一部の水温環境を回復できるのではないかと考え、それが可能かどうかを検討する現地調査を行った。この付近の河床は厚く泥が堆積しており、事前の調査ではその下には透水層の砂または砂利の層があるとわかっていた。そこで、①その砂層の被圧の度合い、②泥層に孔をあけて開放した場合の湧水量の2つを測り、どの程度の掘削でどの程度の量を得られるのかを検討した。

具体的には浄水公園（扇状地側）からすぐの地点1'、地点1（岸から約6m）、地点2（岸から約12m）の地点で、内径3cmまたは10cmの塩ビパイプを打ち込み、内部を空にして、①その水位がどこまで上がるのか、②河川水位と同じ高さでいくらの湧水速度となるのか、を計測した。

2017年11月の地点1'、1の設置時は、扇状地に近い地点1'で11cm、遠い地点1で6mmの湧水圧がみられ、1'を水面付近でカットした場合の湧水流量を断面積で割ったところ、0.55cm/sであった。これは1m²の河床面積に換算すると5.5L/sの流量に相当する。その後の観測で水圧は、雨（季節）に応じて上下しており、地点1でも数cmまで上昇がみられる。2020年10月19日にさらに扇状地から遠い地点2で内径10cmの塩ビパイプを打ち込んだところ、0.078cm/sとなり、1m²の河床面積に換算すると0.78L/sの量となった。これらから、河道全面では困難だが、扇状地側（右岸側）の河床の一部を掘削すれば、岸寄りに比較的安定した水温のエリアを形成できる可能性があることを示している。

②平野側井戸群の本川還元の可能性の検討（現地井戸調査）

本川上流部の流量を回復させることができないかを調べるため、上流部（源氏橋付近）での地下水の行き場を探したところ、左岸堤防すぐ東の飯ノ木の集落では多くの自噴井がありかなりの流量で流出していることがわかった。そこで、①滝谷の水収支（逸失流量の推計、②逸失した地下水の川への還元可能性の検討を行った。

滝谷の山地流量から推定される支川流域への供給量と本川上下流の流量増分を比較し逸失したと推定される量は夏場に多く、0.16-0.2m³/sであった。一方、飯ノ木集落を出入りする流量差を計測したところ、夏場は上記の流量を上回る月が多かった。別の水質調査（井戸など）を行ったところ、さらに北の牧田川の伏流水による自噴もあることから、より多い流量となったことがわかっている。

この地下水位が、津屋川本川の水位よりも高ければ、物理的に還元できることになるため、津屋川に最も近い井戸について、閉塞しながらチューブを立てて高さを測ったところ、川の水位より1.3m前後高い地下水位であることがわかり、十分に本川に供給可能であることが判明した。

小規模扇状地群の扇端部を横断する河川の流況に関する現地観測

扇状地では、扇頂部から放射状の流路痕跡を留めつつ網状流路が直線的に流れ、扇央部で覆没した伏流水が扇端部で湧出する。山地からの激しい土砂流出を伴うことから流向・流路の制御は困難であるが、小河川では集落発達に伴う用排水目的のため、歴史的に改変されてきた事例が見られる。特に複数の扇端部を縫うように流れ、豊富な伏流水を集める「湧水河川」的特性も備えることになる。

調査対象地は、揖斐川合流点から8.3km上流に位置し、側方に人工的な河間（清水池）があって湧水が集中的に流入する瀬・淵を含む約60mのリーチ（平均勾配1/450）を選定した。津屋川の本川流路、流域と調査地の位置関係についてGoogle Earthで作成して、ドローンの空中写真からAgisoft Photoscan Professionalにて処理・作成した調査地周辺のオルソ写真を示した。

データ収集として、2016年6月から2021年3月にかけて、湧水を集めた水路（spring creek、流程約60m）が流入する上下流の4地点（上・中・下流区・湧水池）における水温・電気伝導度と上流の水深について、投げ込み式の自記式測器（HOBO Onset Logger U24 & U20L）により連続観測した。さらに、出水期と非出水期（2016年6月7日、12月2日、2017年6月13日の3回）において、河川地形と3次元流向・流速分布を超音波流向・流速計（Xylem社、Sontek RiverSurveyor M9、以下ADCPと記載）により計測した。計測の際は、ADCPと移動局を専用小型艇（Xylem社）に搭載して調査範囲の水面を曳航し、別に設置した固定局とも無線接続したタブレットPC上にて、専用制御ソフトSontek Hydro Surveyor（Xylem社）を操作しデータ収集を行い、処理・分析をした。

①水温、電気伝導度の変動特性

上流区における水深、各地点における水温、電気伝導度の変動状況について、調査地に最も近い観測所（松山観測所、国土交通省水文水質データベース）における当該期間中の降雨状況とともに示した。地点ごとに異なる、断続的な欠測期間が少なからずあるが、水温、電気伝導度において地点間の違いが顕著に見られる。すなわち、水温に関して、湧水のそれは若干の日周変動を伴いつつも、ほぼ同じ水準（17～18℃）で推移したのに対し、他の本川3地点の水温は日周変動に加え、降雨や季節などによって大きく変化した。また、電気伝導度の時空間分析によって、いずれの地点においても降雨に対する鋭敏な応答が見受けられたが、表示値の範囲は、湧水池、下流、中流、上流区の順に高くなっていた。電気伝導度の低い湧水が本川に流入することによる希釈効果の存在が示唆された。

②河川流量に対する湧水寄与率

湧水寄与率は、湧水流入地点からより近い、中流地点での流量に対する湧水の寄与が大きくなった。既往の調査実績に対し高い水準であることから、津屋川の河川流量に対する湧水の寄与は非常に大きいことが確認された。また、中・下流間の比較からは、下流地点の流量に対する湧水の寄与は中流地点のそれに比べて相対的に小さくなったと考えるのがより自然であるが、下流地点により近い流入水に異なる水質の水塊（別起源の湧水含む）が影響した可能性も考えられる。

③流れ場の空間的変異

今回実施したうち、2016年の2時期における計測結果によると、調査地の河川流量は、6月7日に平均0.16 m³/s（最大0.43 m³/s）、12月2日に平均0.21 m³/s（最大0.47 m³/s）、湧水流入量については、それぞれ0.022 m³/s、0.027 m³/sと推定されたことから、出水期後の12月にいずれもやや多くなった。この結果は前記した冬季の湧水寄与率が大きくなることと反しないが、降雨から浸透し涵養された地下水の影響か、6月に活発と思われる蒸発散の影響かは精査が必要である。

12月2日における計測結果により、全体的に低流速ながらも本川上流部の淵と中・下流部の瀬の分布が可視化された。なお、本調査地では、1988年にも水深、流速分布が計測されており、最深部は水深約2.1 m、最速部は流速0.3 m/sに達するなど、全般に大水深で高流速域が広がっていた。なお、当時の空中写真（国土地理院：1987年10月の写真、地理院地図）を参照したところ、図との違いは明らかで、河道内の植生繁茂域が大規模に拡大してきた様子が窺われる。したがって、河道内への植生域拡大と土砂堆積により、全般的な低流速化、浅水域化が顕著になったと推察される。

また、河川流量のリーチスケールにおける変化を検討した。12月2日における観測結果から、水面と河床の標高分布と各横断面で算定された流量の縦断分布を示し、それにより縦断的に分布する河床の凹凸（瀬・淵構造）の存在が確認できた。この瀬・淵構造の縦断的な遷移に伴って、大きく流量が変動している様子が窺えた（平均値の10～220%）。このことから、津屋川では側方からの湧水の流入だけによらず、浸透・湧出などの河床形状を介した表流水と伏流水の水交換により、流量の空間的変異が生じていること確認された。

次いで12月2日における観測結果から、側方から流入する湧水を集める水路（湧水流入水路）に沿った各横断面で算定された流量分布と磁北からの流向（角度）の縦断分布を示す。流向90°付近が左から右に向かう流れが生じている様子を表すが、本川への流入が近づくにつれて、一意的な流向になっていなかった。この方向に沿った流量の変化を見ても、図示の左半分が増加した一方で、右半分では減少に転じている様子が窺えることから、本川流入点からの背水の影響が示唆される。

湧水流入水路に沿ったデータを、2017年6月13日の観測結果について整理した。この年は入梅がやや遅く、水路内の流れが滞って渇水期の様相を呈しており、右方向に向かう流れが確認できなかった。ただし、中程（約642605 m地点付近）から流向が大きく変化している様子が見受けられ、ここから左右に発散する流れの存在が示唆された。流量の分布もこの変化に対応しており、中程で最大流量を呈していた。以上から読み解くに、この分布は中程の位置からの湧水の湧き出しを検出し得たものと考えられる。渇水により水路内の流量が小さかったために確認されたが、同じ個所を見ても、やや不自然な流量の極大値が確認されることから間接的に裏付けられたものと考えられ、恒常的に湧出している水源が確認されたものと言えよう。

湧水環境に生息するハリヨの繁殖生態と保全

本研究の対象河川が流れる濃尾平野は、過去100万年ほどにわたり、養老山地麓の断層傾動（地塊）運動により沈降して低くなった「濃尾盆地」に、木曽三川をはじめとする河川が流れ込んで氾濫原を形成して広がってきた。そのため、平野の西側に河川が集中して流れ、分厚い堆積層を有する。この分厚い堆積層には豊富な地下水が含まれ、かつて多数の自噴帯が見られ、ハリヨを中心とする湧水に

依存する生物種が広く分布していたが、高度経済成長期の大量の地下水利用に伴って地盤沈下が引き起こされ、湧水量が激減している。近年では、地下水利用の規制に伴い、水位は上昇し地盤沈下は収束傾向にあるが、自噴帯や湧水量の回復までには至っていない。かつての干拓、近年の圃場整備やインフラ整備などの土地改変に伴って進められてきた、池沼や「河間」（泉）の埋め立てなども相俟って、現地では、かつて豊富にあった湧水域の存続が危惧されている。こうした背景を抱える地域に現在も残された「湧水河川」を対象に、河川流況の詳細な観測を通じた水動態の解明によって、ハリヨ等の湧水生態系の構成種が生息する場の改善を具体的に提示・実践することは喫緊の課題である。

津屋川湧水群は、濃尾傾動運動の沈下する低地の西端にあたり勾配が小さく、その湧水群は標高 10m に満たない低平地であるとともに、揖斐川本川の水位変動（洪水・潮位）を強く受けるという河川水理学的な特徴を併せ持っている。つまり、その湧水群は、ハリヨ等にとって湧水特有の生息場を提供しているが、本川との標高差は小さく攪乱の影響を受けやすく、イタセンパラを対象とした木曽川ワンド群と比して環境も規模も異なるものの、氾濫原の小水域、攪乱と水交換といった環境要素において概念的に類似する水際構造があった。

津屋川中流域における最大のハリヨ生息地である湧水域の涵養域を、地形・地質・水質などから同定し、その区域内の各湧水域の湧水量の津屋川流量への寄与を場所と時期的に比較した。これをもって変動する湧水域（水温 13～18℃の水域）ごとの湧水域面積を算出した。その面積はハリヨ営巣数とおおよそ相関を示したが、面積以外の要因（湧水期間・底質・水深）の存在を示唆した。

また、25 年前の湧水域と本流域における営巣地の分布状況を当該研究期間のそれと比較したところ、土砂堆積が進行し浅所化・軟泥化し、営巣に不適状況となっていた。特に、本流の土砂堆積・陸化が著しく、2011 年から営巣激減した。1990 年代初期には流程 50m 右岸区域で、1 日最多 60 個の営巣が、2018 年には年間通して数個に過ぎなかった。今回の詳細な水文調査によって、生息域、個体数や営巣地点は湧水動態との強い関係が合理的に認められ、その選択性が精度をもって確認された。特に、2006 年からの個体数変動調査により、湧水量と土砂堆積がもたらす環境変化に伴って営巣数・個体数が変動した。さらに、実際の営巣成功率や孵化仔魚数などの繁殖成功度を営巣地の環境要件とともに計測し、環境改善の事業化（海津市津屋地区等の生息環境の回復事業）に高度に反映させ、その効果検証をした。

木曽三川流域における生物群集を対象とした 河川生態系の管理手法に関する研究

Study on river ecosystem management for fish habitat restoration in the Kiso Three Rivers basin

研究代表者 森 誠一（岐阜協立大学 教授）

The Kiso Three Rivers system is the main factor that developed alluvial fans in the foothills around the Nobi Plain and formed the flood plain in the downstream area, and is one of the largest river water systems in Japan with vast deltas and environmental characteristics such as floodplains, and abundant underground water and springs. This basin constitutes one of the most abundant freshwater biota, including rare species in Japan, and is distributed with species and populations that are important for evolution and conservation. This study is conducted to describe the changes of riverine environments from the viewpoints of the underground water and sedimentation dynamics with natural and artificial impacts. The purpose of this study is to understand the river ecosystem, including the effects of artificial alterations since the dawn of history, from the perspective of the geological background such as the Holocene glacial retreat and the historical perspective of biological evolution. We examined the impact of changes in the riverine environment on fish life-history and proposed how to utilize it in future river management.

Key Words : *floodplain, sedimentation dynamics, alluvial fan, spring-fed waterbodies, environment improvement, biodiversity conservation, endangered species*

緒言：魚、ざわめく川に

少年の頃、私は魚を捕ったり、石を積んで流れを変えたりして川と親しんだ際に、素足を多くの魚族がツンツンと突つく「ざわめき」を実感したものだ。この私事からすると残念なことだが、この半世紀で、魚類とその生息地は確実に減少し、その群泳を見る機会は随分と減った。

おそらく、そうした「ざわめき」を取り戻そうとする動機が少なくとも一部の社会思潮や情勢にもなって、前世紀末 1997 年の河川法改正から、土地改良法改正、自然再生推進法や外来生物法などが制定施行された。すなわち、もう四半世紀にわたって、多くの労力と資本が投入されてきたといえる。にもかかわらず、絶滅危惧種は増え続けている。むろん、法・規範の制定や土木的改善事業の実施によって、生態系の劣化速度は減速してはいるのかもしれないし、現在は「しないよりはした方がいい」という過渡期と考えることもできる。ただ、かつてのざわめく魚群は見られないし、復活したところなど極めて少ないことに変わりはない。本稿は、生物多様性の保全・活用のため生息場の創出・再生を目指して、木曽川水系で行った河川生態学術研究（国交省受託研究）の概要を紹介し、「ざわめく川」の再現の一助とするものである。

研究者代表 森誠一

本研究の成果は、以下の目次にあるように多岐にわ

たりつつも互いに関連し合っており、研究の背景・目的、研究成果、施策成果、展望については、1】木曽川水系の河川史と生物多様性保全に向けて」に要約されている。その根拠となる詳細が2】以降に記載され、21】に成果の実務向上への反映が解説されている。

目次

- 1】木曽川水系の河川史と生物多様性保全に向けて
- 2】営力依存の限界と循環的氾濫原再生の合理性
～二枚貝類生息環境の 10 年変化から～
- 3】イタセンバラの移動特性と再生産ワンドの意義
- 4】航空レーザー測量による河道内氾濫原の地形
DEM～2008 年と 2018 年の測定精度の相違
- 5】木曽川におけるヌートリアの食性
～二枚貝および陸上植物の捕食実態～
- 6】木曽川ワンド群におけるイタセンバラ局所集団の
遺伝的動態
- 7】イタセンバラの全ゲノム決定と歴史集団動態
- 8】木曽川河道内氾濫原内のワンド・たまりにおける
イタセンバラの生活史と繁殖生態および魚類の
分布に影響する要因
- 9】木曽川の河道内氾濫原における淡水魚類の分布に
影響する要因
- 10】木曽川ワンドがカエル類に果たす役割
- 11】近世以降の濃尾平野揖斐川右岸地域における水域の

変遷

- 12】濃尾平野西部を流れる揖斐川水系津屋川に生じた過去数十年間における堆積速度の変動
 - 13】安定同位体を用いた魚類移動の履歴分析
 - 14】ハリヨの遺伝的多様性と集団構造
 - 15】津屋川湧水群と本川の水文学的検討
 - 16】湧水群の出水かく乱に関する調査（水位観測・資料調査・氾濫解析）
 - 17】津屋川本川の水温安定化の検討
 - 18】小規模扇状地群の扇端部を横断する河川の流況に関する現地観測
 - 19】湧水環境に生息するハリヨの繁殖生態と保全
 - 20】結びにかえて
 - 21】河川等政策への質の向上への寄与
- 謝辞

1】木曽川水系の河川史と生物多様性保全に向けて

木曽三川は、山麓部に扇状地を発達させつつ下流一帯に濃尾平野を形成させた主因の一つであり、本来的に広大なデルタ・氾濫原や潤沢な伏流水・湧水といった環境特性をもった日本最大級の河川水系である。現在、同流域は人的活動が盛んで、治水・利水を巡って多くのかつ大規模の河川事業が特に江戸期から実施されてきた。

当該河川流域は、淡水魚類をはじめ多くの固有種群が生息する生物地理学的に貴重な地域であり、保全上の価値も緊急性も高い。特に、固有種・希少種であるイタセンパラ、ネコギギ、ハリヨ（以上、種および生息場が国指定天然記念物）などの淡水魚をはじめ日本有数の豊かな淡水生物相を構成し、進化的かつ保全上重要な単位と見なされる集団が分布する。このような生物多様性に富んだ地域において、今後、実際の保全管理を計画し河川事業として進めていくためには、環境特性の成因を水理学的理解に加え環境 DNA や同位体比解析などからも把握し、生物の場への応答として種あるいは生物相レベルの歴史を系統地理学的な分子アプローチから明らかにし、本流域における魚類の保全的重要度の位置づけを整理し、現状の自然的攪乱と人為的インパクトが河川生態に与える影響を検証する。

1. 時間スケール：種の進化的時間と個体の生活史

多様な生物を含む河川生態の研究をするにあたって、議論すべき対象範囲としての時間・空間スケールの類型化あるいは重層化が重要であり、いわばそれは環境要素の標準化につながる。これまでの河川生態研究は、セグメント、リーチ、瀬淵など現況河川における地勢・地形・地理的空間において、近代的河川管理が実施されてきた百年以下もしくは現行ママの時間スケールを中心に議論される傾向が強かった。その結果、応用・事業の面において生物の進化的時間が扱われることは

少なく、個体の繁殖成功や集団の系統などに関わる生態・遺伝的要素が矮小化されるきらいがあり、保全において対処療法的な改善に終始することがあったといわざるをえない。河川生態系は過去の進化的時間の結果成立しており、どのような環境特性に生物が適応してきたかという進化生態学的・系統地理学的な視点の位置づけが重要である。また、河川生態学術研究では、個体の生活史における微環境レベルへの負荷の質・量を計量化し、その改善・軽減を検討する根拠が求められる。これをもって、木曽川水系における本研究の成果を踏まえて実施された生息場の環境改善および効果を評価し、自然の営力や地域特性を活用した保全シナリオの一般化を希求した。

2. 木曽三川の自然史と本研究の視点

木曽三川は、濃尾平野周縁の山麓域に扇状地を発達させつつ、その下流一帯に低平地を形成させた主要因であり、本来的に広大なデルタ・氾濫原や潤沢な伏流水・湧水といった環境特性をもった日本最大級の河川水系である。当該流域は、希少種のイタセンパラ、ハリヨ、ネコギギなどのいずれも国指定天然記念物の淡水魚をはじめ、日本有数の豊かな淡水生物相を構成し、進化的かつ保全上重要な種・集団が分布する。

本研究では、濃尾平野が海であった縄文海進期など地史的背景を視野に入れ、河川生態系を生物の進化史的な視点で捉えつつ、有史以降の人為的時間における多様な改変の影響を取り込み、河川環境の実態を把握する（図1）。

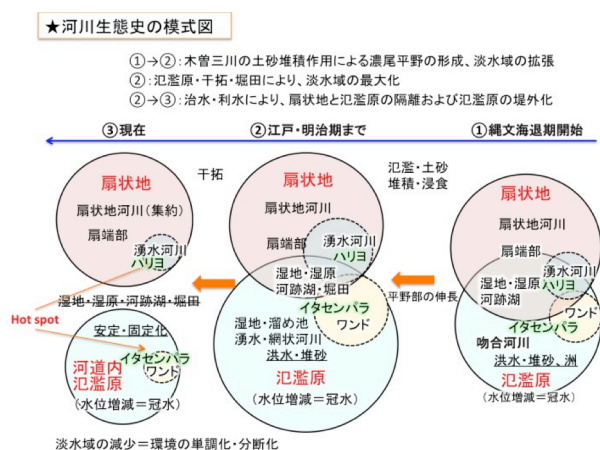


図1 木曽川流域の河川生態史の模式図

特に、イタセンパラとハリヨに焦点を置いて、それぞれの生息環境条件の解析を通して、その現状把握と課題抽出を行い、保全・再生のための河川環境管理への活用方法を検討した。イタセンパラの存続には産卵母貝が恒常的に生息する氾濫原環境が必須であり、また、ハリヨは北方系起源種で営巣繁殖することから湧水環境の存在が生命線となる。すなわち両種とも、特に繁殖の環境条件が生息・生存を明瞭に左右し、また年魚であり結果が早期に確認できる点などを含め、生息制限要因の因果関係を知る研究素材としても適した

対象種といえる。

3. 河道内氾濫原の環境変遷における魚類の生息実態

濃尾平野、大阪平野および富山平野に局所分布する希少淡水魚のイタセンパラ（図2）は、河川の氾濫原環境を繁殖に利用することから、本種の集団の歴史は沖積平野の環境変遷をよく反映することが期待される。人為的影響をもたない有史以前の個体群変動（歴史的集団動態）の解析を木曽川流域における氾濫原の増減を示す河川環境史と関連づけて、本種の分布や残存生息の要因を探究した。なお、本種はおそらく近代以前までは堤内・外の不明瞭な氾濫原環境に広く分布していたと想定される。



図2. イタセンパラと二枚貝内の卵

1) イタセンパラの歴史的集団動態

濃尾平野の木曽川水系産イタセンパラの全ゲノム配列データを導出し、淀川水系産と富山県氷見市産との比較を含め、PSMCやMAGIC等の手法により歴史的集団動態を解析した。その結果、更新世中期（78万～12万年前）に増大していた集団サイズが、最終氷期最盛期から縄文海進最大期（およそ1.9万年～6千年前）にかけて減少したことが推定された。それは淡水域面積の縮小と連動する濃尾平野の縮退を反映していると示唆され、まさに進化的時間スケールからも氾濫原の魚といえる。このことは今後の研究進展において、縄文海進後の海退期から現在に至る河川伸張による平野形成と集団サイズの増大が同調した結果となる可能性を想起させる。

2) ワンド群と魚類

木曽川の平野部（自然堤防帯）の約15km区間には、比較的広い河道内氾濫原に大小様々な約150個のワンドが存在する。これまで103ワンドの淡水魚類相を調査し、魚類群集構造が成立する物理環境要因や生物環境要因を検討した。その結果、冠水の頻度や水域連結性がワンド間の種組成の類似性に影響することがわかった（図3）。また、イタセンパラの分布は、本川に常時接続しているワンド、または、平常時に孤立しているが小さな増水でも冠水しやすいワンドで、かつ本

川・ワンド間の接続水域数も多いワンドに有意に生息する傾向があり、氾濫原環境への適応が推定された。

次いで、環境DNAを用いて、イタセンパラの生活史を通じた移動特性と、最終的に行き着いたワンドでの繁殖成功度を検討した。まず、本研究サイトに最適化させたサンプリング手法を考案し、それによって得られたDNA検出有無と実際のイタセンパラ生息有無を比較して精度検証を行い、十分な検出精度が得られることを確認した。次に、14ワンドで稚魚期から産卵期（5月～10月）にかけて採水・環境DNA解析を行い、産卵期において秋の出水と連動して成魚の移動分散の活発化が示された。しかし一方で、産卵期に分散した孤立

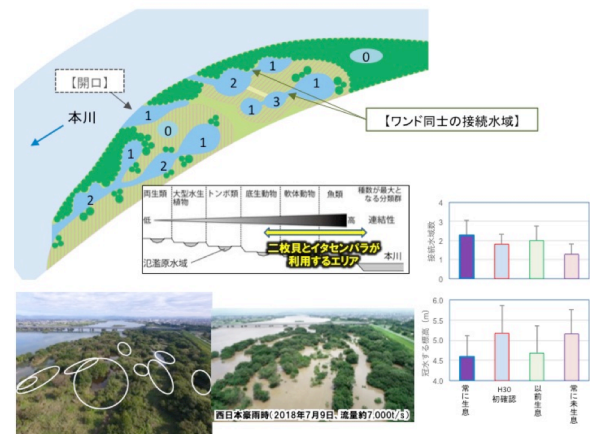


図3. 氾濫原ワンドにおける淡水魚類の生息要因

型のワンドでは翌春に稚魚が確認されなかったことから、再生産に寄与しない「無効分散」の実態も明らかになった。

さらに、集団遺伝学的解析によって、イタセンパラはワンド群間で自由交流が保たれておらず、また左右岸間で遺伝的組成が異なり、本流低水路が両岸間の集団交流を阻害する影響が示された。加えて興味深いことに、近年自然形成された中洲のワンド集団は両岸の中間的な遺伝的組成を示し、中洲の存在は両岸間の交流維持への寄与を示唆した。

以上より、イタセンパラの実態としては、ワンドの中でも常時本川と接続しているワンドを生息場・産卵場として利用していること、逆にここ60年ほどの間に増えてきた孤立ワンドはイタセンパラの存続にあまり貢献していないこと、そして、調査区間（15km区間）の左右岸および縦断的にも離れて形成されたワンド群それぞれで集団の孤立化が進行しているが、約10年前に形成された中洲が集団間の交流を再開させつつあることが分かった。

3) ワンド環境の整備・管理

繁殖に産卵母貝が必須であるイタセンパラの保全には、二枚貝が生息する環境づくりが求められる。ワンド49箇所を対象として、最近10年間の二枚貝生息量を比較した結果、2007年の生息ワンド19箇

所中 17 箇所で大減数がみられ、ワンド環境は全体的に劣化傾向であることが明らかになった。一方で、2007～2018 年の間で 5 箇所のワンドが形成され、いずれも二枚貝が定着し、加えてイタセンバラの産卵、稚魚の浮出が高い割合で確認された（図 4）。つまり、この 10 年間で新たに自然形成されたワンドは、二枚貝とイタセンバラの良好な再生産の場となっていることが分かった。ただ現状では、新しく形成されるワンド環境の何が、両者の再生産に最良の効果をもたらすのかは検討中である。

こうした新しいワンドの重要性は、治水対策として行われた高水敷掘削の跡地でも確認された。揖斐川では、潟水位～平水位に相当する地盤高で高水敷掘削された地区において、その後の出水による土砂の堆積、微地形変化に伴い新しくワンドが形成され、多数の二枚貝が自然に定着することが分かった。ただし 10 年以上経過すると、土砂の堆積と樹林化の進行により、ワンド面積の縮小・孤立化、さらに二枚貝生息量も減少傾向となり、ワンド環境の経年劣化が示された。これは、長い期間、本川から孤立した木曽川の多くのワンドが二枚貝やイタセンバラの生息場として機能しないことと同様のメカニズムが背景にあることを示唆するものであった。以上から、高水敷掘削を一定期間ごとに繰り返し行う「循環的氾濫原再生」を環境保全と治水対策を両立し得る合理的な手法として提案した。一方で、底泥（有機物を含む）浚渫や樹木伐開等を組み合わせることで、広範な掘削を行わずとも、一定の改善効果が望めることを過去のワンド環境保全事業のモニタリングデータから示した。

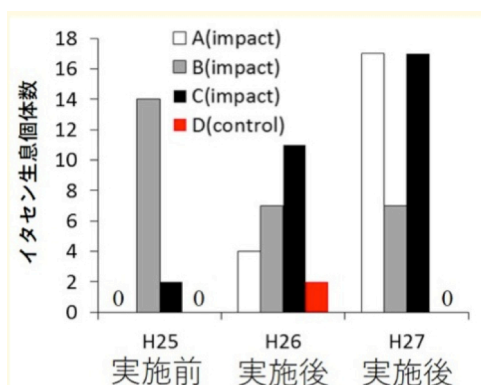


図 4. ワンド 4 カ所における環境改善前・後のイタセンバラの個体数変化

ただし、木曽川の調査区間の下流半分においては、馬飼頭首工（木曽川大堰）の湛水による水位安定が見られ、上流半分の区間とは異なるワンドの物理水文特性に支配されたイタセンバラと二枚貝の生息場維持機構

が存在すると示唆された。それゆえ、これら上下流では異なる保全対策が必要であると考えられた。例えば、上述の「循環的氾濫原再生」は土砂堆積に伴う地形変化を見越した手法のため、出水による土砂移動が生じやすい上流区間での適用性は高いが、湛水域にあたる下流での適用性は低いであろう。

4) ワンド環境と産卵母貝

ワンドの岸際部を中心に二枚貝の死殻の集積が散見

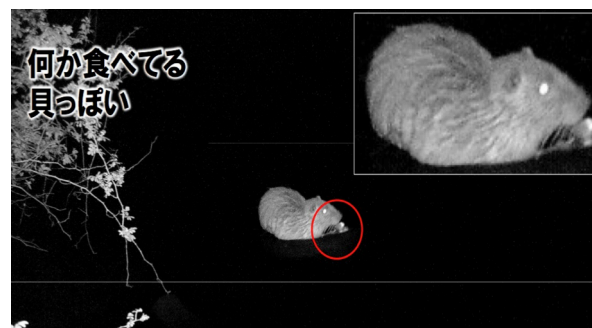


図 5. ヌートリアの二枚貝食の可能性写真（永山撮影）。

され、周辺の糞や足跡などの状況証拠から、特定外来種のヌートリアによる捕食が推察された（図 5）。これを確かめるため、カメラトラップおよびヌートリアの糞 DNA 解析による食性解析を行った。その結果、実際に、ヌートリアによる二枚貝の捕食シーンの撮影に成功した。さらに、ヌートリアはノイバラやスゲ類といった陸上植物を年中摂餌するとともに、二枚貝も年中捕食することが食性の季節変動を含め裏付けられた。二枚貝類はワンド環境の劣化のみならず、外来種による捕食によっても負荷を受け、その影響は産卵母貝の減少を通じて間接的にイタセンバラ個体群にも負の影響を与えていると想定された。

4. 湧水動態が魚類生態に及ぼす応答、復元および効果検証

トゲウオ科の世界的分布の最南限集団であるハリヨ（図 6）は、現在、滋賀県と岐阜県の限られた湧水地や周辺河川にのみに生息する。かつては濃尾平野西部の大垣湧水帯を中心に、面的に広く分布していた。本種の生息状況は、約 30 年前の資料と比較しても明らかに悪化している。元来、北方系魚類であるハリヨの生息条件として湧水が必須であり、その生息地の主たる減少原因は湧水量の減少・枯渇にある。ハリヨが生息する環境の解析は、湧水河川生態の有効な理解となり、その環境改善の効果的な根拠の提示が期待される。



図6. 湧水魚ともいえるハリオ（秦康之撮影）。
鮮やかな婚姻色を帯びた営巣雄。

1) 扇状地伏流水の集水河川の水文動態

津屋川は、養老山地の東側に30個以上ある扇状地扇端から湧く潤沢な湧水を集めながら、南流して揖斐川に注いでいる。右岸の流程に沿って氾濫原に分布する湧水群について、出水時の攪乱に関する基礎的な調査を行い、出水期の各湧水地の水位の連続観測を行い、その地点内挿によって10箇所の任意の湧水地の冠水頻度と水位の特徴を把握した。冠水頻度の高い湧水地とほとんど冠水しない湧水地があり、大きな変動があった。また、中下流部の水位上昇は本川上流からの降雨による流量増加ではなく、合流する揖斐川の出水状況に大きく依存する特徴が明らかになった。

現在、ハリオは、概して3箇所の湧水量の多い右岸湧水域をもつ幅広い河川域が主たる生息域になっている。そのうち中央に位置する最大の生息湧水域（中央湧水帯）を対象に、水位・水質・流量観測に基づき水文学的流況と伏流水・湧水の寄与度の把握として、山地支川から扇状地に全量覆没し、本川沿いで湧出することを場所的かつ時系的に解析した（図7）。



図7. 津屋川中流域の流量における湧水の寄与

また自明ながら湧水の保全には、涵養を図る伏流水の同定が必至であり、当該の中央湧水帯の範囲をおよそ明示した。さらに現状、緩流域の中央湧水帯では、泥が平均的に数十cm堆積しており、その下の砂層は扇状地からの地下水圧により湧水する作用があると把握された。河床の一部は泥の堆積が湧水を抑止し、湧水再生が創出される掘削面積を推定した。

2) 湧水河川における同位体環境の変動

津屋川全域的において、河川流水および湧水の溶存ストロンチウム同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) を分析した。その結果、河川上流から下流まで同位体比が上昇していく傾向が見られ、本同位体比が河川流程に沿った生息場所の良い指標であることがわかった。津屋川水系のストロンチウム同位体比は湧水地点によって異なるが、各湧水は年変動・季節変動せず安定していた。一方、

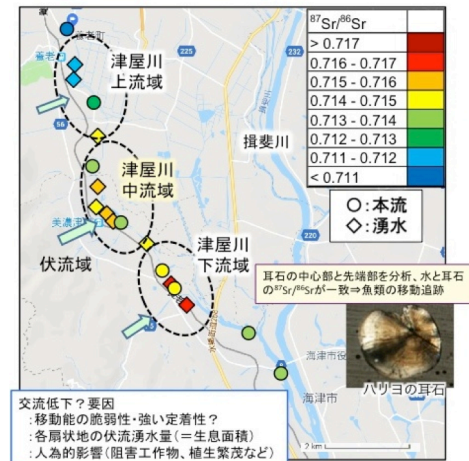


図8. 津屋川の流水および湧水の溶存ストロンチウム同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) とハリオ耳石

本川では、上流から下流にかけて縦断方向で同位体比が高く変化した。この結果から魚類の移動履歴に適用すべく検討をした。この結果や集団遺伝学的解析の蓄積を用いて、ハリオの移動交流の程度を明らかにし、湧水環境の依存性を解析し保全に応用する（図8）。この同位体比を用いて、ハリオの耳石解析から、湧水間や湧水ー本川間といった移動実態を検討可能であることが示唆された。

3) ハリオの集団帰属性解析

ハリオは人為的な生息地の消失や分断化の影響により、集団の急速な縮小が確認され、一部の局所集団は人為的に再整備された環境で維持されている。その遺伝的集団構造および遺伝的多様性を明らかにするため、2002年から2018年の間に3つの時期に、濃尾平野各地から採集されたサンプルから抽出されたマイクロサテライト・データを用いて解析した（図9）。なお、この解析対象には、天然絶滅した三重県系統の保存集団を含んでいる。

集団帰属性解析の結果、生息地が現在のように局所的に分断化される以前には、ハリオは北西部と南西部それぞれで遺伝的に交流のある局所集団から成る2つのメタ集団を形成し、この集団間では遺伝子流動の制限が示唆された。この約15年間で各局所集団の遺伝的多様性の低下は特に認められなかったが、一部の閉鎖的な局所集団では遺伝的多様性が低

く、創始者効果や過去の集団サイズの縮小が認められた。さらに再整備された生息地における集団においては、異なるメタ集団からの放流が強く疑われる生息地も存在した。この結果は、木曽三川水系の湧

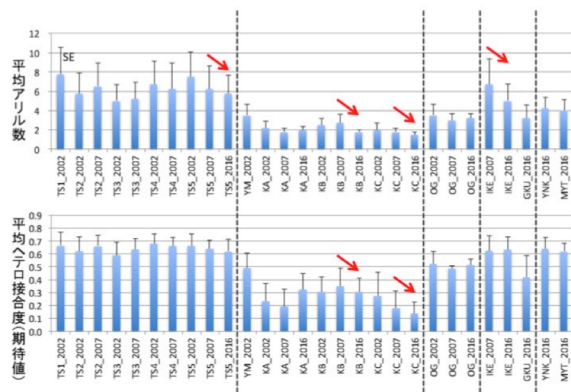


図9. ハリヨ集団ごとのアリアル数と平均ヘテロ接合体比較.

水環境と密接に関係し、象徴種ともいえるハリヨの今後の保全・管理において、メタ集団構造を考慮しながら遺伝的多様性の維持を図る必要がある。

4) 湧水動態とハリヨ

中央湧水帯の細流においてADCPによる流れ場観測によって3次元構造を可視化し、湧水の湧出・浸透過程を分析し、ハリヨの営巣地点との相関をみた(図10)。湧水動態とハリヨの繁殖成功(営巣、孵化成功、孵化仔魚数)の関係は解析中であるが、底質が砂泥、水深40cm以下、流速15cm/秒以下で、湧水湧出の影響の高い地点での営巣は有意に多かった。

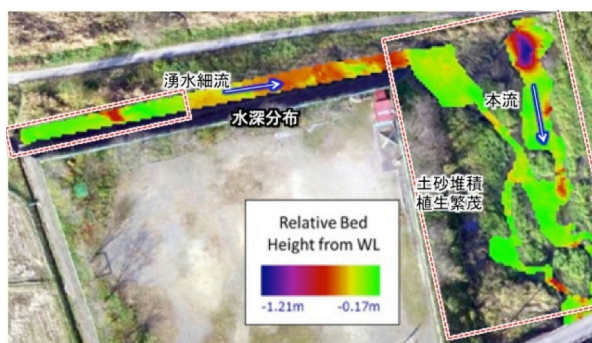


図10. 湧水動態と営巣条件の関係を把握するため、River Surveyor M9 (ADCP)による計測結果.

現在のハリヨの繁殖成功は、少なくとも30年前より低下していた(図11)。この事実は、ハリヨが「いる」現況環境をもって環境改善のレファレンスとする危険性を孕んでいる。ハリヨの確認有無だけでなく、繁殖生態の把握を踏まえて生息環境を再現する検討の必要性を明示している。これに基づき生息環境の最適状況を繁殖成功率等の計測から判定し、土木的な環境改善の根拠を提示し、湧水池を設置した。その効果を評価し、湧水生態系の修復手法に一助した。また、30年間

の湧水水温の測定記録は、温暖化や湧水量の減少に依るのかは不明ながら、明らかな上昇傾向が認められ、今後のハリヨの生息環境に懸念された。



図11. 30年間の営巣数変動、河床の土砂堆積と効果的な環境改善.

まとめ

おもに土砂と伏流水の動態に依拠するワンドや湧水域の環境特性の成因や変動を、水文・水理学的把握に加え環境DNAや安定同位体などの解析から追跡し、その応答としての生物挙動を群集生態や集団遺伝的なアプローチから明らかにし、現状の自然的撹乱と人為的インパクトが河川生態に与える影響を検証した。背景として地史的時間および人為的改変時間スケールにおける生息場の変化過程と生物応答の連関性を、氾濫原環境のワンド形成と湧水河川の湧水動態を対象に影響を検証した。その検証に基づいて、生物が多様な環境を持つ生息地間のランダムな移動交流を可能とする河川環境管理の事業化において、合意形成に基づく地域連携をもって、環境保全・改善再生の機能効果に必要な視点・手法の開拓を目標とした。

2】営力依存の限界と循環的氾濫原再生の合理性 ～二枚貝類生息環境の10年変化から～

木曽川では、河床低下に起因して裸地状の砂州が樹林に置き換わる「樹林化」が生じてから30年以上が経過した。樹林化した河道内氾濫原には、希少なイタセンパラやイシガイ科二枚貝類(イシガイ類)の生息場となるワンドやたまり(以下、氾濫原水域)が存在し、野生個体群の存続を支えてきた。しかし、底泥や有機物(枝葉など)の慢性的な堆積の進行に伴うワンドやたまりの生息場機能の劣化が懸念されている。木曽川における河道内氾濫原環境と希少な依存種を保全するためには、既存氾濫原水域の生息場機能の経年変化のトレンドや、新しく形成される氾濫原水域の生息場としての効果を把握する必要がある。本研究では、木曽川の自然堤防帯区間に存在

する氾濫原水域において、イシガイ類生息環境の10年間（2007～2018）の変化とその要因を検討した。
対象 49 箇所の氾濫原水域のうち、2007 年にイシ

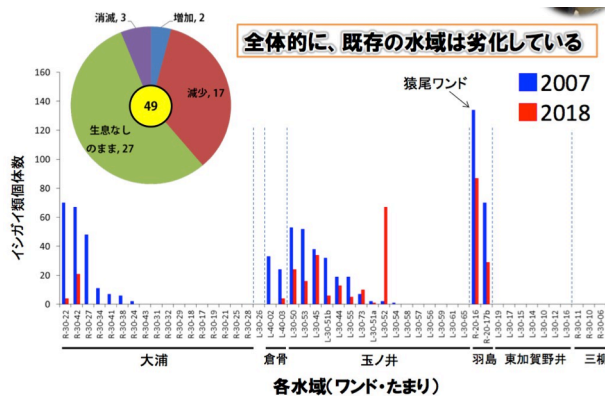


図 12. 二枚貝生息量の 10 年変化

ガイ類の生息が確認されたのは 19 箇所であった（図 12）。約 10 年後の 2018 年には、そのうち 17 箇所において生息数が減少した（生息数ゼロ：7 箇所、減少率 50%以上：9 箇所）。生息数の増加は 2 箇所のみで、そのうち顕著な増加（2→67 個体）は 1 箇所のみであった。2007 年に生息数ゼロであった水域では、2018 年も同様であった。既存水域における生息場機能の劣化要因として、土砂堆積と本川水位の低下による本川ー水域間の連結性の低下が示唆された。一方、ここ 10 年の間に新たに自然形成されたすべての水域においてイシガイ類の生息が確認され、イタセンパラの産卵も確認された（図 13）。しかし、新規水域はわずか 5 箇所だけであり、既存水域における劣化を補うほどではな

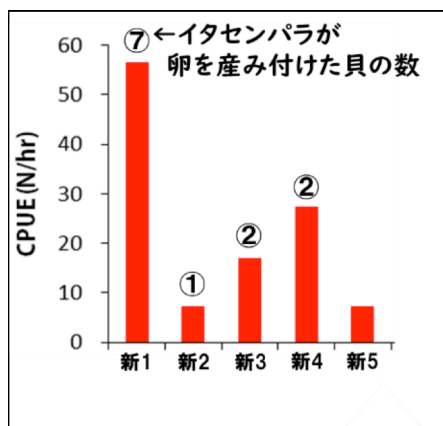


図 13. 新規ワンドの二枚貝生息量

かった。

既存水域の全体的な劣化傾向と新規水域の良好さは、二枚貝とイタセンパラの生息場としてみた場合、ワンドの機能には寿命があることを示唆する。そのため、新規水域による保全効果を期待したいが、流路が固定され、砂の供給量も制限された現況河道の条件では川の営力に依存した新規水域の形成はほぼ見込めない。よって、河道掘削などを通して新規水域の形成や生息場シフトを促進する積極的な働きかけが必要であろう。

その根拠となる「河道掘削後の新規ワンドの自然形成＝二枚貝の生息場の再生」については、過年度成果の揖斐川高水敷掘削地の研究成果。ただし、揖斐川でも自然にできたワンドが徐々に劣化する様子が分かっている。よって、主な治水整備メニューである河道掘削を利用した「循環的氾濫原再生」、すなわちゾーニングと掘削回帰年に基づき定期的に掘削しつつ、常に区間内のどこかにフレッシュなワンドが存在するよう戦略的な管理を行う必要があるだろう（図 14）。

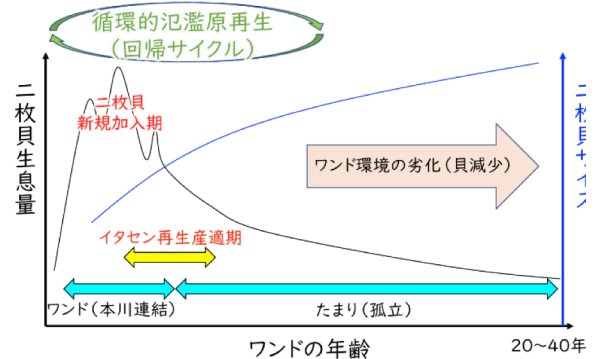


図 14. ワンド経年劣化と生物生活史を考慮した循環的氾濫原再生の概念図

3】イタセンパラの産動特性と再生産ワンドの意義

生物の移動生態は個体群の分布や維持に関わる重要なファクターである。経験的には、イタセンパラは産卵期によく移動するとされるが科学的な裏付けはとれていない。また、木曽川のように、本種の主たる生息場がワンドやたまり（以下、氾濫原水域）である大規模な河川において移動生態はベールに包まれたままである。本研究では、稚魚期から産卵期（5月～10月）にかけての季節的な移動を明らかにするために環境 DNA を活用した。また翌春の稚魚調査から、再生産に成功した水域とその特徴を検討した。木曽川の氾濫原水域 14 箇所において概ね 1 ヶ月おきに採水し、リアルタイム PCR を用いた種特異的解析を行った。採水方法は過年度成果に依った。1 つの水域につき、水域全体にばらつくように設定した 5 箇所から 1 L ずつ採水を行い、その混合水 400 mL を解析に使用した。

浮出期 5 月以降、河川の増水により全ワンドが連結（冠水）する機会は度々あったが、8 月 13 日から 9 月 25 日にかけてのみイタセンパラの出現する（DNA が検出される）ワンドが顕著に増加した。これは秋の産卵期に移動が活発化したことを示唆する。この産卵期の移動とワンド環境特性（本川からの比高、ワンド面積、本川水際からの距離）との間には一貫した関係はなく、本種の産卵期における移動は“好適な生息場の選択”よりも“分散”に主眼が置かれた戦略であることが示唆された。イタセンパラは産卵期に生じる河川の増水に乗じて、氾濫域を移動し、分散の結果として産卵成功率を高め、分布の拡大や維持を図るという生活史戦略を獲得していると考えられる。

しかし、秋に親魚が分散した 10 水域のうち、翌春に

稚魚の浮出が確認された水域は2箇所だけであり、残り8水域では再生産が確認されなかった。稚魚が確認された水域は本川と常に連結しているワンドであった。これは、56箇所の水域を対象にした稚魚調査の結果とも整合的であった：再生産に寄与した水域の割合は、ワンドで50%以上(9/17)だったのに対し、本川から孤立した“たまり”では約5%(2/39)であった。イタセンパラが進化的に獲得してきた秋の産卵移動は、陸域化して孤立したまりが多くなった現在の河道内氾濫原では結果的に無効分散を増やしている可能性がある。無効分散を減らし、イタセンパラの再生産効率を高めるには、本川と連結した既存ワンドの保全のみならず、河道掘削等による新規ワンドの形成や生息場シフトを促進する積極的な働きかけが必要である。

4】航空レーザー測量による河道内氾濫原の地形DEM ～2008年と2018年の測定精度の相違

2007年から2009年にかけて、全国の直轄河川において航空レーザー測量によるデジタル標高モデル(地形DEM)が整備され、高精細な河道内地形データとして活用されてきた。その整備から10年以上が経過し、河道内地形の変化を詳細に把握して、現況河川が持つ特性を理解するとともに、今後の河川整備に活かす取り組みが各地で始まっている。初期の地形DEMが整備されたとき、木曽川は既に本川と陸域部が二極化し、河原はほとんどなく、樹林化していた。現在もその外観に変化はないが、ワンドやたまりにおける二枚貝の生息量減少の実態が明らかになり、その要因が土砂堆積によるワンド・たまりの冠水頻度の低下に起因するのではないかと考えられている。そこで、初期の地形DEMと2018年に取得した新規地形DEMから、河道内氾濫原の地形変化を検討しようとしたところ、現地です砂堆積している実際の状態を反映できない結果が多く示されることに気が付いた。特に、樹林地のように、照射されたレーザーが地面に届きにくい景観区分において、この傾向が顕著であった。これは、初期と新規の地形DEMのベースデータとなる航空レーザー測量の精度の違いに原因があると考えられた。そこで、初期DEMと新規DEMについて、河道内氾濫原の景観区分ごとに実測値(横断測量成果)との差分をとり、精度検証を行った。また、精度に影響する要因として、groundデータ(地面の高さを捉えたと判断されたレーザー照射点)の点群密度の差を検討した。

初期DEMと新規DEMの実測値からの平均差分(すなわち平均誤差)は、裸地である砂州ではほぼ変わりなかったが、その他の景観区分(芝地、樹林地、草地、竹林、道路・市街地)では初期DEMの方が1.8～2.7倍大きかった。つまり、新規DEMの方が高い精度であった。また、groundデータの点群密度はいずれの景観区分においても圧倒的に2018年の方が高かった。特に、2018年における樹林地と竹林の点群密度は、それぞれ2008年の8.7倍、16.1倍であった。groundデータは、

周辺の点データの標高値の中で相対的に低い値として選ばれているため、必ずしも地面を捉えた点であるとは限らない。そのため、点群密度が高ければ、より地面に近い高さを捉えた低い標高値を持つ点をgroundデータとして採用している確率が高まり、逆に点群密度が低ければ地面を捉える確率が下がる。それゆえ、点群密度の高いgroundデータに基づく新規DEMは、初期DEMに比べて高い精度(小さい差分)を示したと考えられる。なお、全体的に2018年の方が、点群密度が高い理由は、レーザー測量機器の技術進展に伴い照射密度がそもそも高いことに起因する。

以上より、2007～2009年に整備された地形DEMと現在取得される地形DEMを用いて河道内における地形変化を検討する際には、景観区分ごとの誤差を考慮する必要がある。そうすることで、土砂の堆積や洗堀の実態、ならびに河道内氾濫原における冠水頻度の変化などを、正確に把握することが可能になる。

5】木曽川におけるヌートリアの食性

～二枚貝および陸上植物の捕食実態～

木曽川に定着している特定外来生物ヌートリアが二枚貝類を捕食している可能性が長らく指摘されていた。もしそうであれば、二枚貝類個体群への影響だけでなく、二枚貝類を産卵に利用するイタセンパラにも間接的に悪影響が及ぶ(図15)。ヌートリアは原産地では植物食を示す。そこで、二枚貝類と陸上植物を対象としたヌートリアの糞DNA分析を行い、捕食の実態と季節的な食性の検討を行った。



図15. ワンド内の二枚貝の貝塚

4つのワンドのうち2つで、ヌートリアの糞から二枚貝類のDNAが検出された。そのうち1つのワンドでは通年にわたって二枚貝のDNAが検出された。すなわち、ヌートリアは通年にわたり二枚貝類を捕食していた。かつて二枚貝が多く捕食されていた水域(過去の貝塚調査に基づく)では、二枚貝の大型個体が減少していた。陸上植物ではノイバラとスゲ類が通年にわたる主食であり、いくつかの多年生草本もよく食べられていた。加えて温暖期には1年生草本もメニューに加わった。

原産地では植物食を示すヌートリアが、木曽川では動物・植物の両方を食べる雑食性を示した。近縁種のマスカラットで報告されているような、植物体が減少する冬季に二枚貝類の捕食が増えるという傾向はなく、通年にわたって二枚貝類を食べていることが明らかと

なった。また、それによって、二枚貝のサイズ構成や密度が変化し、二枚貝の再生産効率に悪影響を及ぼしていることが示唆される。

6】木曽川ワンド群におけるイタセンパラ局所集団の遺伝的動態

希少種保全を行う上で、対象生物の遺伝的動態の把握、すなわち、集団構造や集団間の移出入の理解は不可欠である。濃尾平野を流れる木曽川には、複数のワンドが集中して存在するワンド群が、流程に沿って点在している。これまでの研究において、木曽川に生息する国指定天然記念物のイタセンパラは、ワンド群を局所的な生息地としたメタ集団構造を呈していることが判明している。しかし、調査したワンド群や個体数が限られており、集団構造やワンド群間の交流パターンの詳細は明らかになっていない。そこで、木曽川におけるイタセンパラ生息域のほぼ全域から得られた標本を用い、10 多型遺伝子座に基づくマイクロサテライト DNA 分析を行った(図 16)。

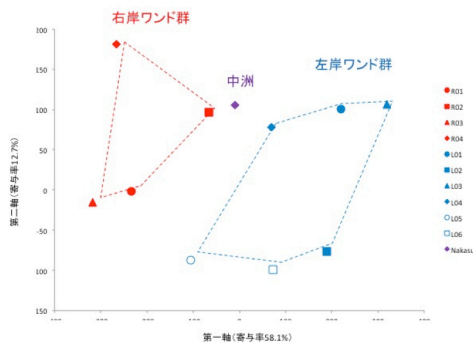


図 16 対応分析によるワンド群間の遺伝的組成

図 16. 対応分析によるワンド群間の遺伝的組成

まず、ワンド群および流域全体のそれぞれの階層において、ハーディ・ワインベルグ平衡 (HWE) からの逸脱を検定した結果、流域全体の階層においては、ほとんどの遺伝子座において HWE からの逸脱が認められたが、ワンド群の階層においては、HWE から逸脱した遺伝子座数は少ない傾向が示された。この結果は、主にワンド毎に繁殖が行われており、ワンド群間において、自由な交流が保たれていないことを示唆する。

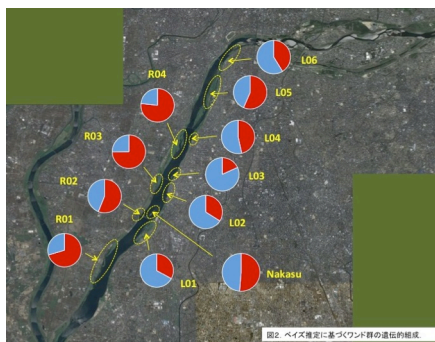


図 17 ベイズ推定に基づくワンド群間の遺伝的組成

次に、対応分析の結果、河川右岸のワンド群と左岸のワンド群との間で、集団の遺伝的組成が異なり、中洲のワンド群の集団はそれらの中間的な遺伝的組成を示した(図 17)。

また、ベイズ推定に基づく集団構造解析において、2つの祖先集団の存在が推定され、それらに由来する遺伝的特徴の保有率は、右岸のワンド群と左岸のそれとの間で互いに異なったが、中洲のワンド群では両祖先集団由来の遺伝的特徴を概ね均等に保有していた(図 18)。さらに、遺伝子流動量を推定した結果、いずれのワンド群においても、遺伝子移入の 9

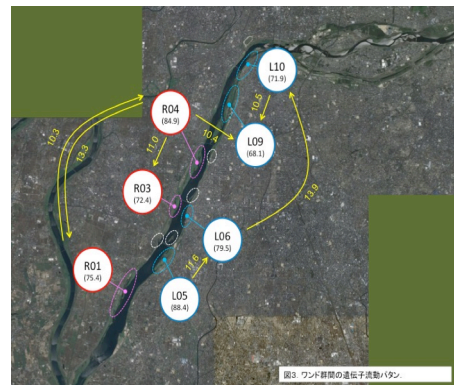


図 18 ワンド群間の遺伝的流動パターン

割近くが同一河岸のワンド群に由来した。

以上の結果から、木曽川に生息するイタセンパラにおいて、ワンド群間の交流は、主に同一河岸内で生じており、河川を横断する交流には、流心部の流れが障害となっているが、中洲の存在が河岸間の交流の維持に寄与していることが考えられる(図 19)。



図 19. 2000 年以降、発達している中洲

7】イタセンパラの全ゲノム決定と歴史集団動態

木曽三川流域を中心とする濃尾平野の歴史的な環境変遷を魚類の集団動態から探るため、氾濫原の存在と密接に関係した生態をもつイタセンパラ (コイ科タナゴ亜科) の全ゲノム決定に基づく歴史的集団動態の遺伝集団構造の推定を行った。

イタセンパラは、濃尾平野、大阪平野、および富山

平野に断片的に分布する希少魚であり、河川氾濫原様環境を繁殖に利用する。そのため、本種の集団の歴史は沖積平野の環境変遷をよく反映することが期待される。本研究では、本種の歴史集団動態を推定し、また今後の進化生物学や保全を含む多方面での活用を目指して、木曽川産のイタセンパラ飼育集団の1個体につ

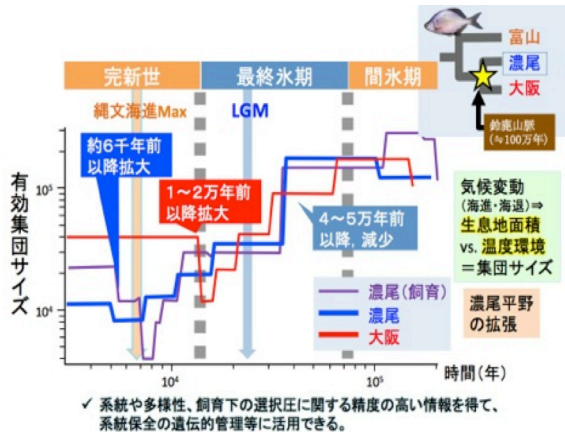


図 20. 全ゲノム解析による歴史的人口動態

いて全ゲノムを決定した (10X Genomics-Chromium と HiSeq X による合成ロングリード; 推定ゲノムサイズ、1.03 Gb; アセンブリ率、81%; Scaffold NG50、1.5 Mb)。

さらに他の平野とも対比を行うため、現在までに濃尾平野産 7 個体 (野生 5 個体、飼育 2 個体)、大阪平野産 7 個体 (半野生 5 個体、飼育 2 個体)、富山平野 5 個体 (野生) の計 19 個体の全ゲノム・リシーケンシングを行い、合計 20 個体の全ゲノムデータを得た。新型コロナ対策のために材料の入手や実験に滞りが生じたために、現在解析途中であるが、これまでに濃尾と大阪両集団の一部の個体の全ゲノム配列データを用い、PSMC、MAGIC、SMC++等の手法により歴史集団動態を推定した (図 20)。

両集団の分岐が鈴鹿山脈の隆起によると仮定して突然変異率を選択した場合、両集団とも更新世中期に増大していた集団サイズが最終氷期から完新世前半に縮小したことや集団再拡大時期にずれがあることなどが推察された。今後、得られた全個体の全ゲノムデータを解析し、3 平野間の対比の中で、濃尾平野における氾濫原様環境と生物集団・群集の形成に関して考察を深め、研究を完成させる計画である。

8】木曽川河道内氾濫原内のワンド・たまりにおけるイタセンパラの生活史と繁殖生態および魚類の分布に影響する要因

木曽川下流域の河道内氾濫原には、様々な面積の「ワンド」や「たまり」といった恒久水域が存在し、それらの水域には様々な淡水魚類が生息している。本研究では、それら水域の魚類相を調査し、それらの魚類群集構造が成立し維持される物理環境要因や生物環境要因を明らかにしようとするものである。

特に、木曽川下流域の河道内氾濫原の「ワンド」や「たまり」には、コイ科タナゴ亜科魚類のイタセンパラ *Acheilognathus logipinnis* が生息する。タナゴ亜科魚類は生きたイシガイ科淡水二枚貝類の鰓内に卵を産み込み、子は卵黄を吸収し終えるまで貝内で過ごすという特徴的な繁殖生態をもっている。本種は日本固有種で、国の天然記念物 (1974 年、文化庁) と国内希少野生動植物種 (1995 年、環境省) に指定され、国のレッドリストで絶滅危惧 IA 類 (環境省、2020) に選定されており、現在最も絶滅が危惧される淡水魚類の 1 種である。本種は富山平野、琵琶湖淀川水系、濃尾平野に分布し、富山平野では、氷見市の流水であるやや小規模の河川に多く生息している。一方、琵琶湖淀川水系や濃尾平野では、河道内氾濫原の「ワンド」や「たまり」に生息し、淀川では野生個体群が近年確認できなくなり、増殖施設における保存個体の放流による野生復帰が行われている状況である。

本研究では、木曽川の河道内氾濫原の「ワンド」や「たまり」におけるイタセンパラの生活史と繁殖生態、および約 110 水域において、淡水魚類各種が生息していた物理・生物環境条件を抽出した。

その結果、イタセンパラの生活史と繁殖生態は、産卵期が 9 月下旬から 10 月上旬で、その仔魚はタテボシガイや小型のヌマガイの外鰓内で見つかり、貝内で越冬し、翌年の 5 月上旬から 6 月上旬に貝から全長約 9 mm で泳出した。その後、9 月まで成長し、標準体長約 50 mm に達すると成熟し産卵する。産卵後の成魚は、一部の極わずかな個体は越冬するが、ほとんどの個体は死亡し、寿命はほぼ 1 年であると推定された。

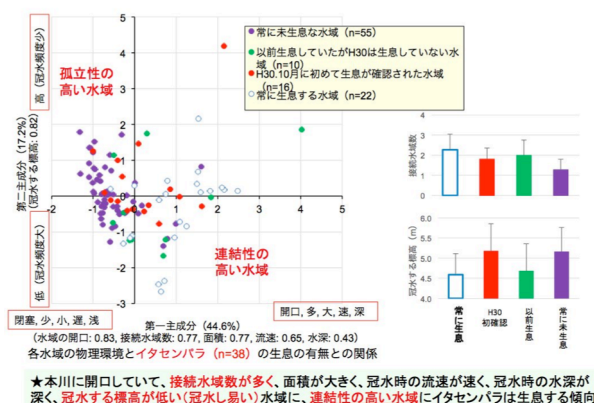


図 21. ワンド特性ごとのイタセンパラの生息状況

河道内氾濫原水域における淡水魚類の分布傾向は、大まかに他の水域と接続する水域数が多く、冠水する標高の低い冠水し易い、本川との連結性の高い水域に良く出現する種 (イタセンパラ、ツチフキ、ゼゼラ、ニゴイ、イトモロコなど) と、他の水域と接続する水域数が少なく、冠水する標高の高い冠水しにくい、孤立性の高い水域に良く出現する種 (モツゴ、ギンブナ、タモロコ、オイカワ、ミナミメダカ、オオクチバス、ブルーギル) に分かれた。特に、イタセンパラは、そ

の傾向が強く、冠水による水域の更新頻度、いわゆる水域の鮮度がより新鮮である水域に出現しやすいことが明らかとなった（図 21）。

全体的に孤立性の高い水域が多いことから、イタセンパラを保全するためには、接続水域が多く冠水しやすい水域を創出するため、接続水域や冠水標高を低くする人為的な造成や、水位操作による人為的な冠水管理などを行い、本川との連結性の高い水域を増やす試みが必要と考えられる。

平成 30（2018）年 7 月豪雨（西日本豪雨）や令和 2（2020）年 7 月豪雨により、近年、すべての水域が冠水する大規模な冠水イベントが生じており、イタセンパラを含む魚類の氾濫原水域の移動が確認されている。特にイタセンパラが冠水規模による移動分散および定着成功に及ぼす要因については、今後生じる冠水イベント前後の魚類相を比較し、例数を増やすことにより、より確度の高い推論が可能になると考えられる。

9】木曽川の河道内氾濫原における淡水魚類の分布に影響する要因

木曽川の河口から 26 km から 41 km 地点の間に、堤外地の氾濫原が発達し、大小様々な約 150 個の恒久的水域であるワンドやたまりが存在する。これらの水域は増水のたびに冠水し、その時には物理的な攪乱を受け、物理環境を更新する。さらに冠水時は生物にとっては、様々な水域での移出入の機会となっている。そのため、木曽川は、低平地に多様な氾濫原水域を持ち、冠水規模による水域内の淡水魚類群集の時空間的な動態を評価できる面白い河川である。

本研究では、2018 年 9-10 月、2019 年 4-10 月、2020 年 9-10 月に、約 100 水域の淡水魚類相を調査し、各種の分布する環境要因を明らかにした。その結果、冠水する標高が高くて冠水しにくく他との接続水域数の少ない孤立性の高い水域に卓越する種（オオクチバス、ブルーギル、モツゴ等）と、冠水する標高が低くて冠水しやすく他との接続水域数の多い連結性の高い水域に卓越する種（ニゴイ、ゼゼラ、イタセンパラ等）に別れる傾向が明らかとなった。

さらに、国の天然記念物で、国内希少野生動植物種である希少淡水魚のコイ科タナゴ亜科魚類のイタセンパラにおいては、これまでの生息記録を用いて、恒常的に確認される水域、2018 年と 2020 年の規模の大きい出水後に希に確認された水域、過去確認された水域であるがしばらく確認されていない水域、恒常的に確認されない水域の特徴を示した。

2018 年に初めて確認された 16 水域においては、そのほとんどの 14 水域で翌年度のイタセンパラの稚魚の泳出が確認されず、繁殖できていないことが明らかとなった。また、その 1 つの水域ではイタセンパラの成魚 2 個体が確認され、成魚が越冬していたことが解った。引き続き生息が確認された 2 水域は、近年、国

土交通省木曽川上流事務所が水域環境改善のため、本川との接続水域を造成した水域と浚渫した水域であった。2020 年にはさらに 4 水域で初めて確認された。

イタセンパラは本川との連結性の高い水域でよく生息が確認されるものの、比較的規模の大きい出水では、広く様々な水域に分散し生息域を拡大する。しかしながら、侵入先の環境が適さない場合は、その水域では再生産することができず、再度の出水を待ち、適した水域に移動する機会を待っているのかもしれない。

10】木曽川ワンドがカエル類に果たす役割

河道内氾濫原は、魚類や二枚貝類以外の多くの生物にも生息場を提供しうる。ただし、生物によって好適な生息場は異なり、それは本川との連結性（冠水頻度や攪乱強度）で説明されると言われている。つまり、河道内氾濫原における生物多様性を最大化するためには、連結性に関わる広い環境傾度が必要となる。そこで、最も連結性の低い水域で種多様性が最大になると言われている両生類（カエル類）を対象として、河道内氾濫原における生息実態、ならびに河川間比較からその生息要因を検討した。

揖斐川、長良川、木曽川のワンド（ここでいうワンドは“孤立しているたまり”）と、堤防を挟んで隣接する水田で、両生類の生息実態を調査した。水田ではアマガエル、ヌマガエル、ナゴヤダルマガエルが優占し、ワンドではツチガエル、ニホンアカガエル、ウシガエルが多かった。特に、ニホンアカガエルは木曽川のワンドにのみ出現した。また、ニホンアカガエルは堤間幅の広い場所に形成されたワンドに生息する傾向が見られた。

以上から、ワンドは冬季でも水域を必要とする種の生息場（ツチガエル：幼生で越冬、ニホンアカガエル：冬季に産卵、ウシガエル：幼生で越冬、成体は水底で冬眠）となっていることが分かった。特に、冬季に産卵するニホンアカガエルにとって、木曽川は濃尾平野における残された希少な生息地となっていた。ニホンアカガエルが木曽川にのみ残存しているのは、広い堤間幅に関係していた。すなわち、堤間幅が広いことで低水路内に形成された河道内氾濫原も広く、両生類の好む連結性の低い水域（安定した水域）が存在していたためと考えられる。

よって、河道内氾濫原において、連結性に関わる環境傾度を広く確保することは、生物多様性の最大化に寄与する。魚類や二枚貝類にのみ着目すると、連結性の高いワンドだけが重要ということになりがちである。今後は、連結性が中～低の領域にも重要な生態的機能があることを認識し、その領域を確保することが望まれる。これは、無理にすべてを高い連結性を有する領域に誘導（掘削等により低い地盤高を創出）する必要はないことを意味しており、河道内氾濫原が陸域化している現在の状況や管理コストに照らしても、調和的な保全対策である。

11】近世以降の濃尾平野揖斐川右岸地域における水域の変遷

濃尾平野は、傾動地塊運動に伴って生じた沈降盆地に、木曽、長良、揖斐の三川からの流出土砂が堆積することにより形成されてきた。西端には養老山地があつてその東側は沈降し続けていることから、西側の標高は相対的に低い。江戸時代には、尾張藩領を守る「御囲堤」（連続堤）が築かれた一方、その対岸地域では各集落単位を堤防で囲う「輪中集落」が展開されてきた歴史を有する。近代以降に各河川に築かれた連続堤は「氾濫原」を河道から隔離し、大規模な圃場整備は湿田を乾田に変えてきた。かつての湿田は、周囲から集めて盛り土した「堀田」とそれに伴う「堀つぶれ」（田舟が行き交う水路）によって構成されたこともあり、当地の水域環境は劇的に変貌してきた経緯がある。

揖斐川右岸地域は濃尾平野西方の海岸/氾濫平野にあつて、揖斐川右支川津屋川（流域面積71.2 km²、幹線流路延長12.6 km）の排水域に位置付けられる。津屋川の本川流路は1656年に降に人為的に定められ、養老山地からの複数の扇状地の末端を繋いで流れており（養老町教育委員会 1991）、平時には湧水 河川の様相を呈する（岐阜県 2001）。本研究では氾濫原における水域変遷の実態を探るため、揖斐川右岸から広がる低地域を対象に、これまでに発行された地図を分析して池沼の変遷を考察する（図22）。

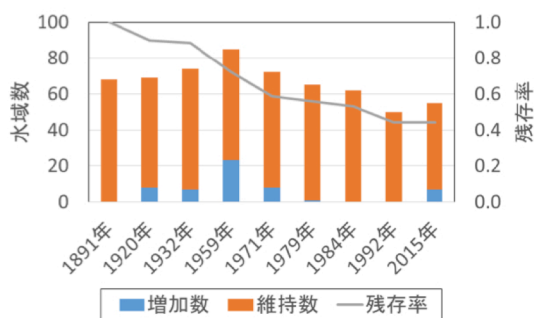


図 22. 揖斐川右岸域の水域数の経年変化

調査地は、養老郡養老町・海津市南濃町に属し、揖斐川支川の牧田川と養老山地から連なる小規模扇状地に囲まれた低地域である。このうち牧田川と津屋川に挟まれた海岸/氾濫平野は「多芸(たぎ)地区」と呼ばれ、小規模な集落を含む複合輪中を呈する。水域の変遷を把握するため、1891～2015年測量の9年代の地形図（大日本帝国陸地測量部 1893, 1924, 1935; 国土地理院 1965, 1973, 1981, 1986, 1993, 2016）から抽出して経年変化を調査した。養老郡史（岐阜県地方改良協会養老郡支会・岐阜県郷土資料 刊行会 1970）、養老町史（岐阜県養老郡養老町 1978）、南濃町史（岐阜県海津郡南濃町 1982）や養老町教育委員会などによる各種文献、および土地条件図（地理院地図 <https://maps.gsi.go.jp>）、空中写真（国土地理院撮影、地図センター販売）、水害

地形分類図（建設省中部地方建設局木曽川上流工事事務所 1976）などの各種地図情報を参照することによって、近世以降に生じた土地改変から水域の変化を考察した。

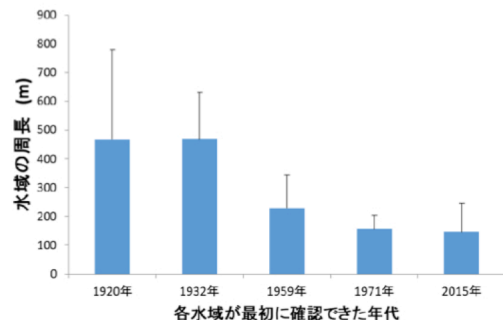


図 23. 新たに造成された水域規模（周長）の変化

地形図から抽出した水域数によると、1891年(68カ所)から 1959年(85カ所)にかけて増加した後、現在は減少している(2015年、55カ所)。近世以降、連続堤の整備に伴って浸水リスクが低減した氾濫原の農地転用が進む中で、大湖沼の干拓が進み水域が細分化されたが、その後の伊勢湾台風襲来(1959年)などに伴う大規模氾濫(養老町 1962)により土地改良(圃場整備)が進展する副次的影響が生じ、水域が減少してきた様子が確認された（図 23）。

文献調査からは、養老町と南濃町は養老山地から連なる微高地に依拠しつつ低地域の新田開発によって発展してきたこと、その過程で集落や新田を守るために整備された輪中堤は水域の形成・維持に寄与してきたことが示唆された。すなわち、小水域はそれぞれに機能を有し、①輪中集落の合間を縫う排水路(旧○○村落江などと呼称)、②排水先の調節池(干拓された下池など)や③集落内で共同利用されてきた池沼(細池など)などに区分された。なお、現存水域は③が多く、地域の入会地(私有地)として共同管理されていることが存続要因として推察された。

12】濃尾平野西部を流れる揖斐川水系津屋川に生じた過去数十年間における堆積速度の変動

濃尾平野は、中部地方の木曽三川(木曽川、長良川、揖斐川で構成される)の流送土砂によって形成されてきた。揖斐川の支川である津屋川は、岐阜県養老山地の東麓にあつて、地下水が豊富な濃尾平野の西縁に位置する。津屋川の現在の幹線流路は、東側にのみ連続堤防を有し、西側から養老山地に由来する多くの湧水と土砂を受け、山麓に連なる扇状地群の端を横切って流れている。本研究は、津屋川の変化を、自然および人工的な影響を伴う土砂動態の観点から明らかにすることを目的とする（図 24）。

津屋川における過去数十年間の土砂動態について、

鉛-210 年代測定法によって評価した。堆積速度（重量堆積速度）は、幹線 流路の西側(右岸)に連なる池の堆積物コアに CIC (Constant Initial Concentration) および CRS (Constant Rate of Supply)モデルを適用することによって決定した。CRS モデルは Cs-137 年代測定とほぼ一致した一方、鉛-210 の鉛直分布は変動したために CIC モデルは適用できなかった。結果として、 $0.24\sim0.44\text{ g cm}^{-2}$

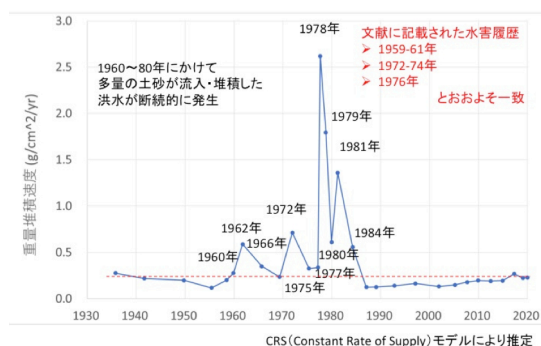


図 24. 津屋川中流右岸ワンドの堆積速度の変化

yr^{-1} の平均堆積速度が得られたが、これは日本のほとんどの湖で報告されている値よりも大きかった。

さらに、1961 年から 1984 年にかけて、 $0.59, 0.71, 2.62\text{ g cm}^{-2}\text{ yr}^{-1}$ などの 3 つの極大値を持つ、より大きな堆積速度が得られており、既存の文献資料によると、これらは同時期に津屋川流域で生じた洪水や改修工事にそれぞれ対応していた。以上の結果により、河川堆積物の動態は、古典的な鉛 210 法(CRS モデル)でも説明できる可能性が示された。

13] 安定同位体を用いた魚類移動の履歴分析

濃尾平野の西端を流れる揖斐川水系の津屋川は、養老山地の複合扇状地の扇端に沿って、養老山地からの水を集めながら流下する。これらの扇端から湧き出す湧水は、津屋川の環境に影響を与える重要な要素である。津屋川には、トゲウオ科イトヨ属に属するハリヨが生息している。トゲウオ科は北半球高緯度地域に広く分布する冷水性の魚類で、岐阜県の津屋川はその分布南限に位置する。温暖な気候である津屋川においてハリヨが繁栄してきた背景には、豊富な湧水により夏場でも比較的冷たい水温に保たれてきたことが大きな理由だと考えられる。しかし、1960 年代以降、湧水の枯渇やそれに伴う河川環境の悪化および水域の埋め立ての進行とともにハリヨの生息地や個体数は減少しており、現在では絶滅危惧種に指定されている。そこで、ハリヨが存続するために必要な生息範囲を、生活史を通して理解することが必要である。

ストロンチウム同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) は、岩石の年代やその起源の研究に用いられてきたが、近年環境学の研究にも広く用いられるようになってきた (図

25)。河川水に溶存する $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値は、その水が辿ってきた経路の岩石に含まれるストロンチウムの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値が反映されるため、集水域河川の水の混合状態をトレースすることができる。本川における $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値の流程変化は、本川に流入する湧水との混合によって生じると考えられるため、本川と湧水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値の流程変化を明らかにすることで、魚類耳石の分析による移動履歴の研究に活用することができると考えられる。

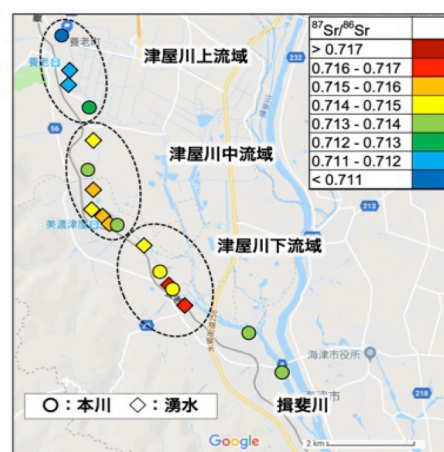


図 25. 本川と湧水の調査地と $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値の分布(2016 年 12 月と 2017 年 11 月)。Google, ZENRIN 地図の利用。

本調査は、2016 年 12 月に本川 2 地点と湧水 6 地点、2017 年 11 月に本川 8 地点と湧水 10 地点、2018 年 6 月に本川 9 地点と湧水 10 地点を選定し、試水について現地で $0.20\mu\text{m}$ メンブランフィルターを用いて濾過を行った。濾液中の元素濃度は ICP-MS (Agilent 7500cx)、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値は表面電離型質量分析計 (Thermo Fisher Scientific TRITON) を用いて分析した。本研究における各 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値の分析精度は、 1×10^{-5} 以下であった (1SE)。

津屋川本川の最上流地点においては最も低い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値 (0.70983) を持っており、下流に向かって連続的に $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値が上昇していることが分かった (図 26)。また、本川に流れ込んでいる湧水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値は本川に比べると高く、流程変化を説明できると考えられた。この結果は、この津屋川集水域で最も低い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値を示すと考えられる石灰岩が、最上流域の

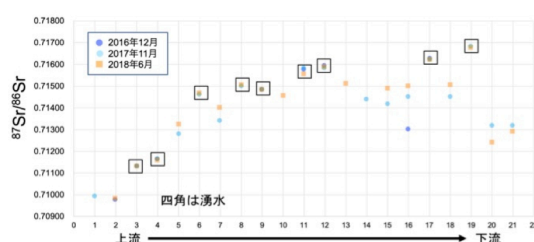


図 26. 上流から下流の本川と湧水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値。3 回調査の値。

みに存在するという地質情報とも矛盾しない。

本研究においては、養老山地の南北方向に沿って $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値の異なる湧水が生じていることが明らかとなったが、これは母岩となる地質の違いによるものと考えられる (図 5)。

今回の結果から、津屋川の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値は本川の最上流域から下流域に向けて、また本川と湧水の間で違いがあることが明らかとなり、調査地点を選ぶことで、ハリヨが湧水のみを利用しているのか、また上流域と下流域での交流があるのかを調べることが可能であると考えられる。

14) ハリヨの遺伝的多様性と集団構造

木曾三川流域を中心とする濃尾平野の歴史的な環境変遷を魚類の集団動態から探るため、湧水湿地環境に依存するトゲウオ科ハリヨ *Gasterosteus aculeatus* subsp. の遺伝集団構造の推定を行った。

イトヨの分布最南限集団の一つであるハリヨは、滋賀県 (近江盆地東部) と岐阜県 (濃尾平野西部) の限られた湧水地や周辺河川にのみ生息する。ハリヨは人為的な生息地の消失や分断化の影響により、集団の急速な縮小を経験し、一部の局所集団は人為的に再整備された環境で維持されている。本研究では、2002-2018 年の 3 つの時期に濃尾平野各地から採集されたハリヨのサンプル (計約 900 個体) を用いて、マイクロサテライト 16 座のデータにより、遺伝的集団構造および遺伝的多様性を明らかにすることを目的とした。集団帰属性解析の結果、濃尾平野のハリヨは北西部と南西部の 2 集団に大きく分けられることがわかった (図 27)。

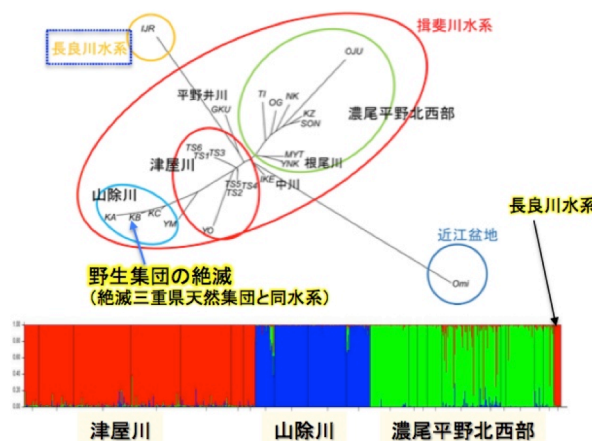


図 27. ハリヨ集団の系統関係 (ペアワイズ F_{st} 値をもとに NJ 法作成) と集団帰属性分析 (STRUCTURE)

この結果は、生息地が分断化される以前には、ハリヨは北西部と南西部それぞれで遺伝的に交流のある局所集団からなるメタ集団を形成し、両メタ集団間では遺伝子流動が制限されていたことを示唆する。この 2 つのメタ集団の形成時期と機構を特定することはできなかったが、後氷期における濃尾平野縮小

時期の退避場所を反映するか、あるいは近世の河川整備の中で人為的に生じた可能性が考えられた。この約 15 年間で各局所集団の遺伝的多様性の低下は特に認められなかったが、一部の閉鎖的な局所集団では遺伝的多様性が低く、創始者効果や過去の集団サイズの縮小が示唆された (図 28)。

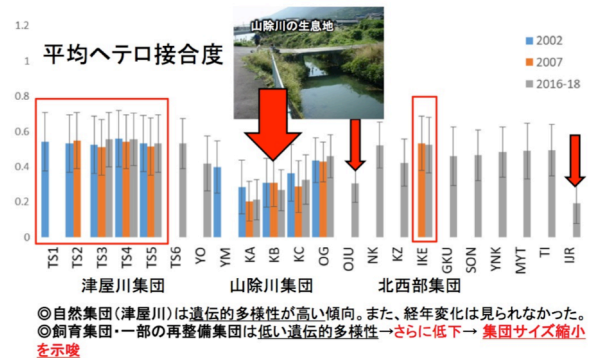


図 28. ハリヨの遺伝的多様性と集団構造。自然集団は遺伝的多様性が高い傾向。飼育集団は低下傾向。

人為的に再整備された生息地における集団の多くは、周辺の生息地に由来することが支持されたが、異なるメタ集団からの放流が強く疑われる生息地も存在した。濃尾平野の水環境と密接に関係し、象徴種ともいえるハリヨの今後の保全・管理においては、メタ集団構造を考慮しながら、遺伝的多様性の維持を図っていく必要がある。

15) 津屋川湧水群と本川の水文学的検討

(1) 津屋川流域の概要と主な調査対象

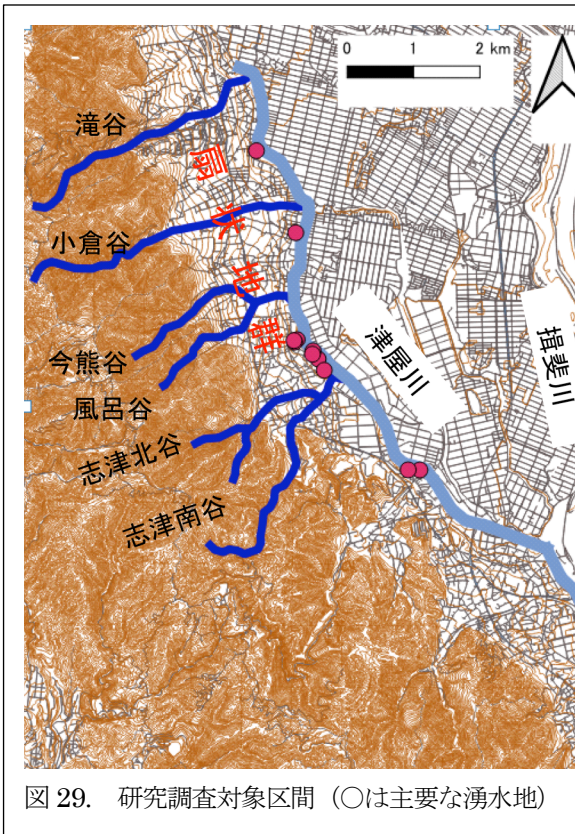
津屋川流域についてまとめた資料は多くはなく、河川整備計画の資料 (岐阜県、2001) でも河道や水量に関する情報の詳細はほとんど書かれていない。

津屋川は流域面積 71.2 km^2 、揖斐川合流部からの管理延長は 12.6 km とされている。その流域は大きく東西に分かれ、東が濃尾平野、西が養老山地東斜面とその扇状地群、である。本川の東側は揖斐川本川との間にある多芸輪中にあり、揖斐川合流点に近く合流する五三川の流域である。昭和以前は池・湿地・堀田・水田が多くを占める低平地低平地である。本研究ではこのエリアを対象とはしていない。

一方、西側は養老山地東斜面を、北から滝谷 (養老の滝)、小倉谷、風呂谷・今熊谷、志津谷、徳田谷、腰越谷、羽根谷、の山沢に雨を集水し、それぞれの東側への谷の出口で扇状地を形成する。扇頂部は扇端から標高差 100 m を超える場所もあり、扇状地のサイズは 1-2 km が多く、1/20 程度の急勾配となっている。また、隣接する扇状地と重なり合っている。沢からの流れの平時はほぼ全量が覆没している。これが地表に復帰するものとして東側扇端付近で湧水地を多数形成し、その水をすぐ東側で津屋川が集め、南流して揖斐川に合流する。後述するが、図 29 の通り、湧水群は扇状地ど

うしの重なり合う点に比較的集中している。

河道については、最下流の揖斐川合流部直前には水門が設けられている。本川の中上流部は左岸（東側）の片側堤防であり、扇状地側には設けられていないため、湧水は自由に川に流れ込むが、本川の増水時は湧水地にむかって背水となる。湧水地と本川は小さく短い水路によってつながって流れ込んでおり、湧水地の水位と、普段の河川水位との差は小さい。大きくて1 m程度であり、ほとんどが50cm程度以下となっているため、洪水時には冠水・流水による生息場の攪乱の恐れがある。



主な調査対象は、津屋川中上流部の主要なハリヨ生息地を含む、志津谷～小倉谷～滝谷の小流域、ハリヨ橋から上流の本川、戸田から上流の各湧水地とした。

(2) 津屋川の経緯（資料調査）

南濃町誌（史料編、通史編）、南濃町下のあゆみ、岐阜県美濃国水害略史、各種輪中絵図、木曾川流域誌等の資料から、片側堤防を持つ津屋川の成り立ちを調査した。また、多芸輪中の治水的な歴史との関係は、西脇(1983、水利科学)が詳しい。

複合輪中である多芸輪中は、揖斐川・津屋川・牧田川に囲まれた低平地の総称であり、津屋川の左岸堤防（片側堤防）はその一部となっている。江戸初期の輪中内部の新田開発で、山側からの水を防除するために津屋川の堤防は作られた。それ以降何度も氾濫と堤防強化を繰り返しているが、養老山地の各谷・扇状地が急峻なため土砂が津屋川に流れ混むことによる閉塞化などの要素が安定した農地確保を困難にしてきた歴史

があり、現在も続く課題となっている。扇端に沿って流れる津屋川の平面線形が蛇行的であるのは、扇状地の地形としてだけではなく、谷正面ほど河道閉塞を避けるために堤防が東に引かれてきたことと関係していることがわかる。扇端での谷の出口は、河口閉塞を緩和するために下流または上流側に曲がるように落とされている。

また、砂防工事の重要性が認識され、特に明治以降は大規模な砂防工事が養老山地で行われてきた。湧水河川である津屋川は、生息地のイメージとは大きく異なり、土砂流入や河道変遷と言った動的な環境と、水田の維持との間に成立していたことがうかがえる。

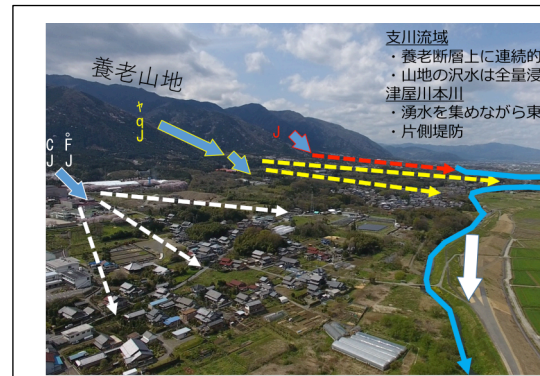


図 30. 上流域を下流から望む（ドローン撮影）

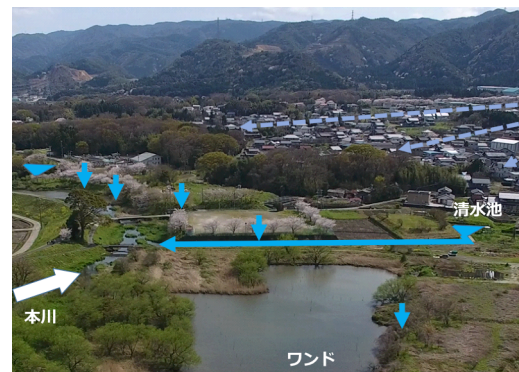


図 31. 清水池付近(志津北谷)（ドローン撮影）

2001 年の河川整備計画では、中上流部の右岸扇状地側の無堤部での浸水、支川（谷）合流部閉塞による溢水の危険、左岸堤防の漏水（平地と水位の差が大きい）、の3つが治水上の危険とされている（図 30、31）。

(3) 津屋川と湧水群の接続性・水収支の情報の不足

津屋川や谷、湧水群について、流量などの基本的な情報は、研究期間の当初は全く把握できていない状況であった。雨量観測点は国土交通省上多度観測点が収集しているため、経年の雨量変動も把握できる状況であったが、流量についてはわかっていない。

また、概念的には、図 3、4 のように山地の沢への流出、扇状地覆没、湧水復帰、津屋川が集水流下、という流れが基本であると想定できた。しかしながら、

・扇状地地下水が濃尾平野地下水へと逸失する量が、どの程度あるのか、無視できるのか。

・沢への流出と、扇状地覆没を経由しての津屋川への流出には、貯留性が想定でき、それがどの程度の遅れ・安定性をもたらすのか（湧水の水資源として有利に作用しているのか）

といった点は、直接的に把握されておらず、河川での基本的な水文調査から行くとともに、沢と湧水の流量応答について調査・計算する必要があった。そこで、以下の調査を行ってきた。

（４）水文調査

①水文観測による湧水量の空間分布の推定

2017 年と 2020 年に本川中上流における多地点（最大 9 地点）での流量分布を計測した。5 月から 10 月の月 1 回程度、流況は平水から渇水の流況とした。川の中で 3 断面以上に分割し、電磁流速計（KENEK VE-20）で 1 点法とした。

結果を見ると、縦断方向に流量が急増する区間とそうでない区間が明瞭に分かれて見られた（図 32）。主要湧水地での増加が目立ったが、湧水地からの流量を実測したところ、それ以外の隠れた湧水がないと本川流量は説明できなかった。

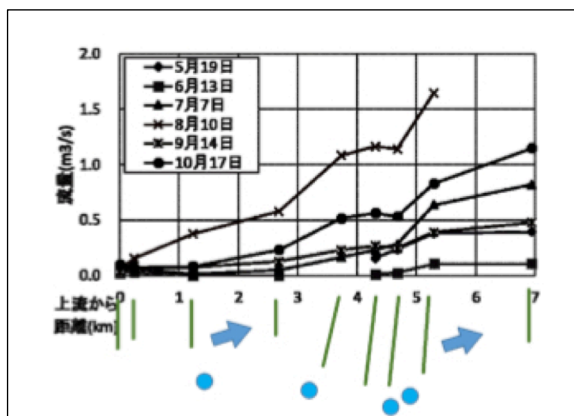


図 32. 上流からの本川流量分布（右が下流、青丸は主要湧水地）

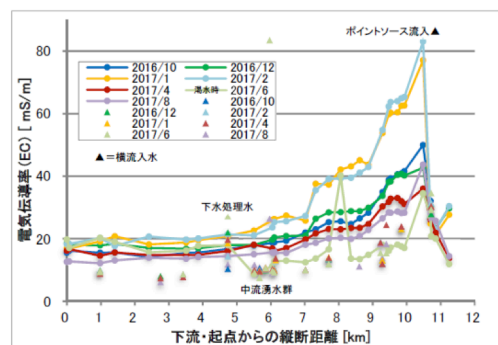


図 33. 電気伝導率の分布

②電気伝導率を利用した湧水ポテンシャル分布のより詳細な把握

流量観測は時間的なコストが大きいため、高密度には計測できない。そこで、電気伝導率計でさらに多地点で計測すること（図 33）で、上流に流入する高い

EC の水が湧水流入で希釈される効果を用いて、水収支と物質収支の式を組み合わせることで計算することにより、より EC 観測点に応じた細かさの湧水ポテンシャル分布を得ることができた（図 34）。（吉川・鷲見、2017）

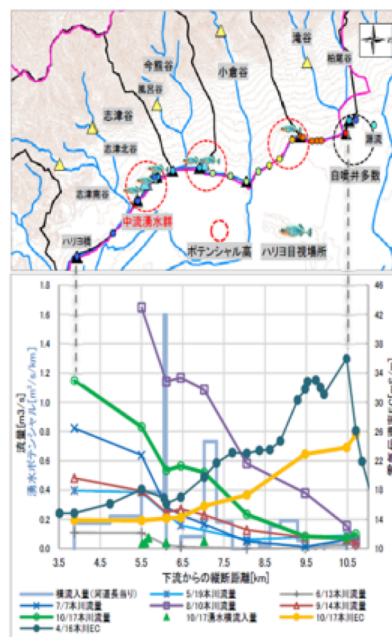


図 34 ハリヨ生息湧水ポテンシャル分布の推定（下図）

これらの湧水量の分布が集中するのは、谷毎の扇状地が隣り合う境界で、平野に張り出す扇状地からやや山側に地形がくぼんだエリアにあたる。これについては、平面 2 次元の浸透流モデル（Dupuit-Forchheimer 仮定、定常流）で模擬計算したところ、このように川への流出が集中するような地下水位ポテンシャル分布を形成することを定性的に確認できた（図 35）。

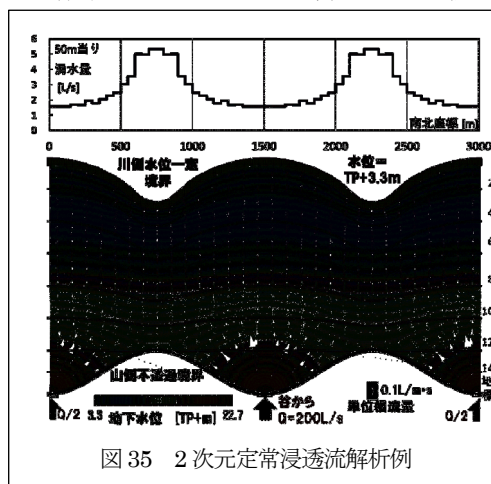


図 35 2次元定常浸透流解析例

③水収支解析と現地調査による、濃尾平野への溢水可能性の検討

先の結果は、単に本川の流量による（みかけの）湧水量を推定したものであるが、支川流域が西側（右岸側）に南北に並んでいるため、支川の扇状地区間ごとに水収支がどうなるのかを把握した（図 36）。

具体的には、支川扇状地のどうしが隣り合う本川に

流量観測点を置いて月 2 回のペースで流量観測を行った。取水がある場合は Q_r として計測し、区間ごとに、 $Q=Q_{out}-Q_{in}+Q_r$ (Q_{out}, Q_{in} は本川区間の下流・上流の流量) によって、区間に流入する流量を計算した。

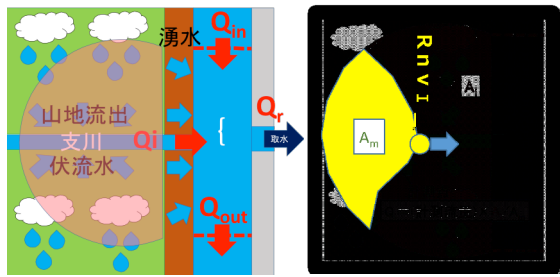


図 36 流入流量の観測（左）と山地支川から期待される流量 Q_i （右）

同日に、各支川（沢）の扇状地境界部（覆没直前地点）でも流量観測を行い、山地部の流出高を推定し、支川流域面積を掛け、山地からの流入が期待される流量 Q_i を計算し、先の Q と比較した。



図 37 支川流域と観測点

その結果、最上流の滝谷の浸透水は本川にほとんど復帰せず、平野側に流失していることが分かった。また、それ以外の谷（小倉・志津谷、図 37）は、両者は同等であったため、平野への逸失はほぼないものとみなせることが分かった（図 38）。このことから、津屋川の本川上流は、平野への流域面積の観点ではもっと多い流量が獲得できるはずである。湧水地どうしにハリヨなどの水生生物の個体の移動が可能になるには、本川がそれに近い環境になることが必要になるが、上流部は流量が少なすぎて水温等が安定しないため、湧水環境は孤立していると考えられる。

また、この推定湧水量 Q のデータは、前 X 日雨量（上多度雨量観測点）と相関が高くなるのかを調べたところ、前 3 日雨量と前 10 日に局所ピークが現れた。少ないデータであったため、実際には連続的なデータで確かめる必要があったが、扇状地にいったん覆没してから流出は、きわめて遅い流出ピークを持っているこ

とを示唆した。

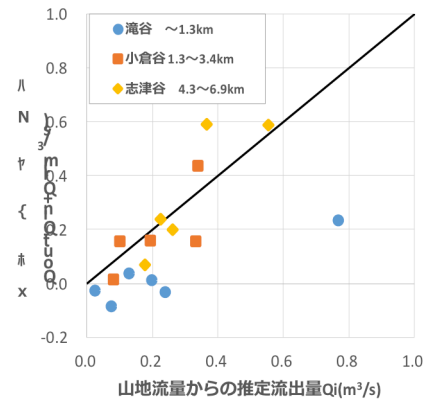


図 38. 区間流入量と山地推定流量

④津屋川・湧水の流量変動（流出解析・地下水位観測）

a) 調査の目的と方法の概要

湧水河川としての津屋川の流出特性がわかっていないため、先の流量観測結果と流出解析、湧水地からの流量変動データを用いて推定することとした。最終的にはタンクモデルを用いた流出特性の推定を行うこととしたのであるが、これをチェックするためのデータとして、①先に示した 2017 年および 2021 年の春季～秋季の月 1 回程度の流量観測結果（観測日のみのデータ）、②清水池からの推定した流量波形、を用いた。①については、先の調査データを使用する。

b) 湧水地からの流量波形の推定

②の清水池からの推定流量波形については、以下の

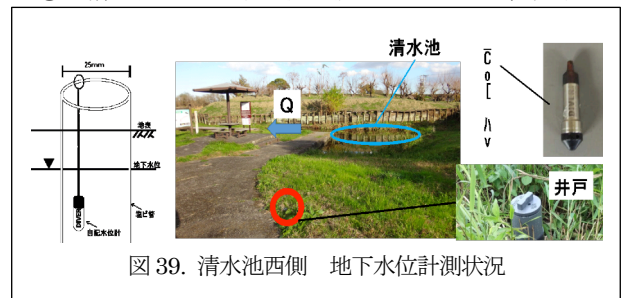
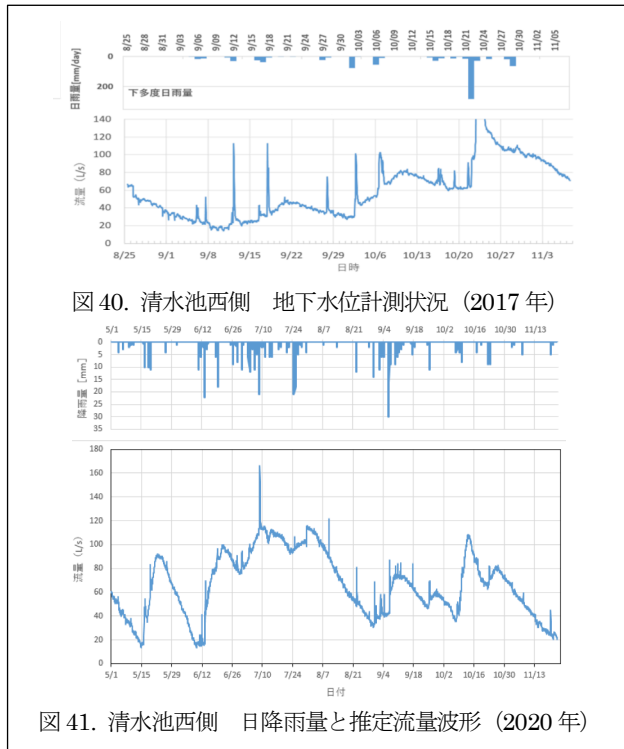


図 39. 清水池西側 地下水位計測状況

方法で作成した。まず、図 39 のように清水池の西側に海津市の許可を得て深さ 70cm ほどの井戸を設置し、その水位を自記水位計で 1 時間データとして連続計測している。水準測量から求めたその水位波形と、現地調査日に計測した清水池からの流量データを突き合わせて、流量と地下水位の $H-Q$ カーブを作成し、これを連続水位データに適用して、清水池からの流出流量の時間波形として推定した。ただし、出水時はこの関係が崩れるため、タンクモデルの同定の対象からは外した。

その結果、2017 年の秋、2021 年の春季～秋季の流量波形を推定した。図 40 と図 41 からは、降雨直後の波形では数日間のピーク・低減ののち、10 日を超えるゆっくりした流量増加・減少の山が現れることが明らかになり、津屋川本川の観測流量が前 3 日および前 10 日雨量と相関が現れることと対応しており、津屋川の流出特性、特に時間特性がこの調査で明らかになった。



c) 独自のタンクモデルによる流出特性の推定

流出は、養老山地への降雨が沢にいったん流出するところまでを、従来の 4 段タンクモデルで表現することとし、これをさらに扇状地の 2 段タンクに入れて貯留・流出させることで、扇状地地下水の効果を表現することとした (図 42)。山地の 4 段タンクについては、既往のパラメータ群 (堆積岩の多い長良川上土地点の数値) を用いて山地での流量観測結果と比較したところ、大きな差が見られなかったため、そのまま使用することとした。津屋川への流出流量については、最上流部支川滝谷からは平野側に逸水していることから対象外とし、その下流の鷺巣観測点の流量と、中上流域を代表する観測点ハリヨ橋での観測流量 (取水流量戻し) の差を、扇状地からの推定対象の流量とした。山地・扇状地の流域面積を GIS 上で計測してモデルに適用し、比較・同定したところ、図 43 のようにおよそ概念化することができた。出水直後のピークは表現できないものの、10 日程度の流出の特徴は表せている。

さらに、時間波形で確認するために、清水池の推定流量波形に同定させると、図 44 のようにピークの構成や低減カーブの特徴を表現できていることがわかる。ただし、扇状地パラメータ群は流域全体での値とは異なるものとなったことから、理論的に整合させるための精査が必要となる。

これらの結果からこのモデルは、養老山地からの流出を覆没させた扇状地の貯留・流出の量的・時間的特徴を表現できたと考える。また、このような山地流出・扇状地貯留流出、という流出プロセスは、湧水地群および津屋川の水文循環を安定させ、湧水地の水温・水

質環境を安定させるとともに、津屋川の流況変動を抑制する効果を保たせているということも示した。

一方で、清水池のデータをみると、流量変動自体は大きく、ベースとなる地下水位が低下してしまうと、湧水が極端に少ない期間が現れやすいのではないかと、という懸念も同時に示している (図 45)。よって、周辺の地下水位の低下をもたらす要素 (例えば、河道掘削による水位低下、事業所の連続揚水など) には、注意を払い予防する措置が必要であると考えられる。

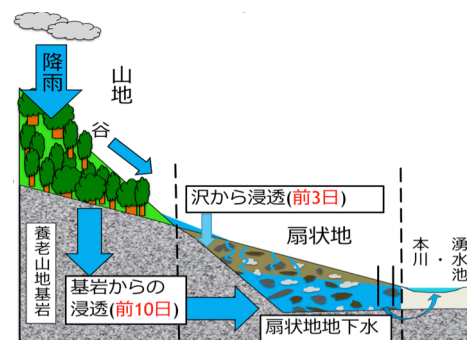
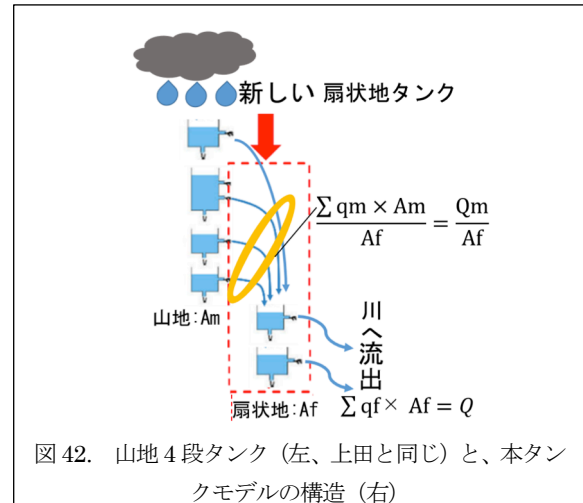


図 43. 流量観測点 (上) と 山地・扇状地の水循環概念図 (下)

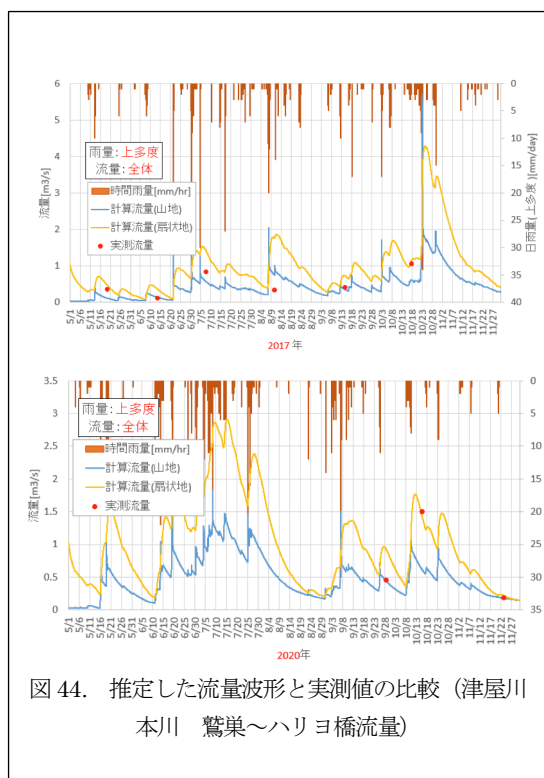


図 44. 推定した流量波形と実測値の比較（津屋川
本川 鷺巣～ハリヨ橋流量）

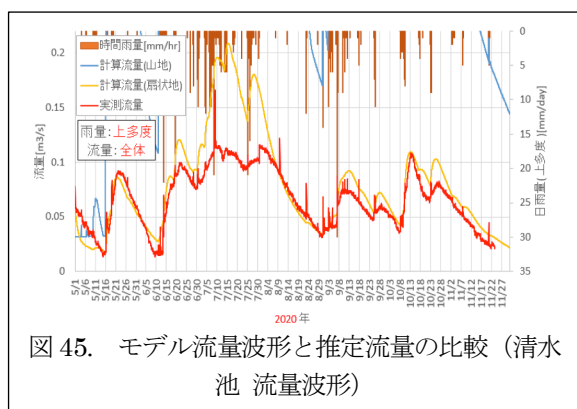


図 45. モデル流量波形と推定流量の比較（清水
池 流量波形）

16] 湧水群の出水かく乱に関する調査（水位観測・資料調査・氾濫解析）

木曽川わんどのように、河道氾濫原の一時水域は常に出水による攪乱の効果・影響があるという前提で生息場としての成立があるものをみなされる。一方、本対象の津屋川湧水群は、同様にみなしてよいか、と言う点で対比的であり、本研究グループが注目する特徴の一つである。

湧水という本来安定的であるとみなされる環境でありながら津屋川が増水すれば、水位差がほとんどないこれらの湧水地は周辺も含めて水没することがわかっている。

通常の河川であれば、出水に伴う氾濫原の冠水は、流速等の物理的かく乱、土砂・シルトの流入・堆積、濁質水質など、生息場・避難場としての機能は大きく低下し、魚類等は流失する危険もある（図 46）。それが、本来安定的であるべき湧水環境であればなおのこ

とであるが、実際には出水があっても生息は保たれている。本項ではこれについて、①冠水頻度の調査、②流れ場の評価を行った。

a) 湧水地の冠水頻度の推定

津屋川沿川にある 10 か所の湧水地について、それが河川水位の上昇によりどの程度の冠水頻度があるのかを、ダイバー自記水位計の設置により調査した（図 20）。水位計は個別の湧水地に置くのではなく、近隣の本川にダイバー水位計を設置（7 か所）し、さらに岐阜県の水位計データ（3 か所）を Web 上から回収したものを利用した。水準測量から標高に直した 10 地点の水位データを、各湧水地に近い河道ポイントでの水位に内挿して波形とし、これと各湧水地の水面標高と比較して冠水頻度を推定した。

水位計は 2019 年に設置したが、一部は 2017 年以前から設置のものがあるため、大きい出水は 2017-19 年のデータも参照した。

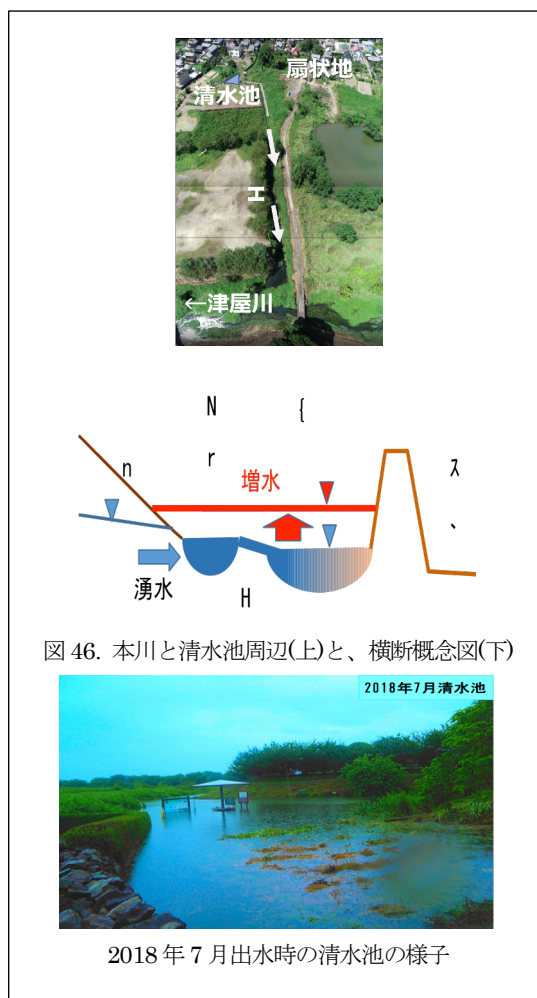


図 46. 本川と清水池周辺(上)と、横断概念図(下)



2018 年 7 月出水時の清水池の様子

年に数度程度以上の出水時における本川の出水特性をみると、津屋川流域への降雨出水に伴う本川流量増加がもたらす水位上昇は大きくはなく、下流の揖斐川からの背水による水位上昇が顕著であった（図 47, 48）。ピーク時の下流からの背水はほぼ水平に遡上しており、湧水地の多い 7k~10k 付近は、その水位次第で冠水の頻

度を決するほどであることがわかった。



図 47 調査観測地点と対象湧水地

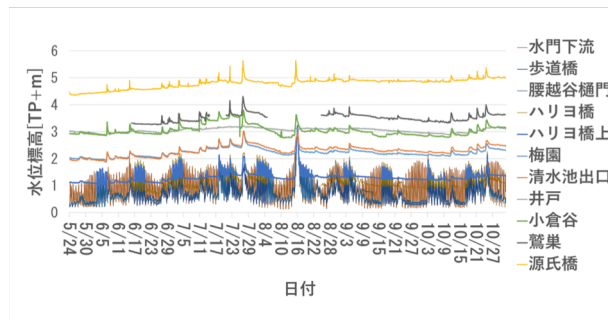


図 48. 2019 年の本川水位変動

湧水地の標高と内挿によって得られた近隣河道水位との比較をみると、2019 年はほとんどの地点で年に 2 回以上冠水しており、過去 3 年の清水池の冠水回数の変化をみると、これよりも多い頻度が平均的であることが推測された (図 49, 50, 51)。2018 年、2017 年は大規模な出水があったため、冠水時の最大水深は 2m 以上となっている。

揖斐川の増水が、主要な湧水地群の冠水頻度とその水深をほぼ決めていることがわかった。これは、流域としての津屋川での水循環が決するのではなく、濃尾傾動運動がなした揖斐川や津屋川の勾配・低さがこの状況を支配しているという点が特徴的である (図 52, 53)。また、このような出水では、下流からのゆっくりした水位上昇による冠水であることから、湧水が途切れない中で冠水していく現場での水質は、高濁度の揖斐川の水がそのまま湧水地に流れ込むのではないため、環境としては緩やかで変化は小さいのではないかと推測できる。

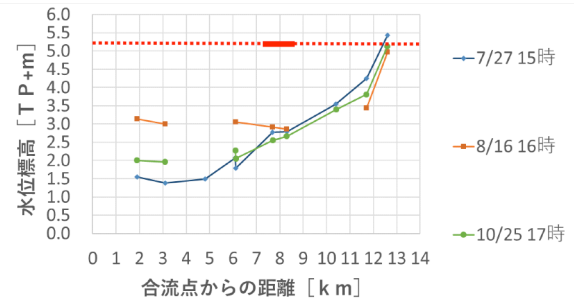


図 49. 2019 年 3 出水のピーク時水位縦断面図 (赤は 2017 年 8.3km 地点最高水位)

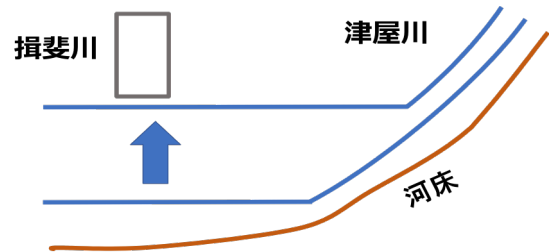


図 50. 出水中の水位変動 概念図

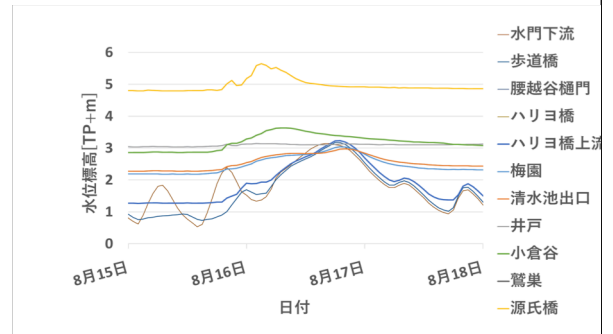


図 51. 2019 年 8 月本川水位変動 拡大図

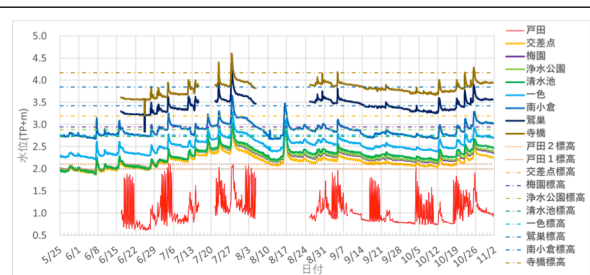


図 52. 2019 年 3 出水のピーク時水位縦断面図 (赤は 2017 年 8.3km 地点最高水位)

地点	冠水頻度 (回)			年最大の水深 (TP+m)			
	2019 年	2018 年	2017 年	2019 年	2018 年	2017 年	計画湛水位
戸田	8						
交差点	0		2			1.482	2.61
梅園	2		3	0.052		1.972	2.85
浄水公園	2		3	0.127		2.227	2.92
清水池	4	8	6	0.304	1.67	2.464	3.07
一色	10			0.522			
南小倉	4			0.229			
鷺巣	3			0.370			
寺橋	5			0.432			

図 53. 各地点の冠水頻度と最大水深

b) 流水のシミュレーションによる湧水地の流速の計算

津屋川の左岸堤防が破堤しない条件で、計算ソフト iRIC (エンジン:Nays2DH) を用いて、流動計算を行い、各湧水地での流速がどの程度となるかを推定した。下流端は揖斐川西小島地点水位の時間波形を与え、流入流量は流出解析計算に基づいて波形を与えた。粗度係数は氾濫シミュレーションマニュアルに沿って与え、地形は地理院 5m メッシュ標高と、現地測量にをベースとした河道地形を与えた。対象洪水は、3 年間で最大の出水であった 2017 年 10 月 23 日に洪水とした (図 54, 55, 56)。

計算の結果、主な湧水地の流速は 10cm/s にも及ばず、それも池中心付近での流れであることがわかった。これは、下流からの背水による増水であること、多くの湧水地は周辺に高い場所があり、低地が広く氾濫域の断面が大きいことなどがあげられる。(また、シミュレーションでは、清水池や浄水公園付近では、振動がみられ、セイシュのような現象が生ずる可能性がある。)

例えばハリヨの遊泳力との比較でみれば十分遅い流れであり、さらには増水で水位が上がるに従い、扇状地斜面側の湧水する斜面の浅い部分に避難できていれば、流速はほとんどなく、水質も問題ない状況で出水をやり過ごすことができると考えられる (表 1)。

表 1 シミュレーションでの各湧水地のかく乱の状況

	最大水深 (m)	最大流速 (cm/s)
一色池	1.70	5.2
清水池	1.04	0.2
浄水公園	2.12	2.6
交差点	0.21	0.4



図 54. 2019 年 10 月 23 日シミュレーション水深分布

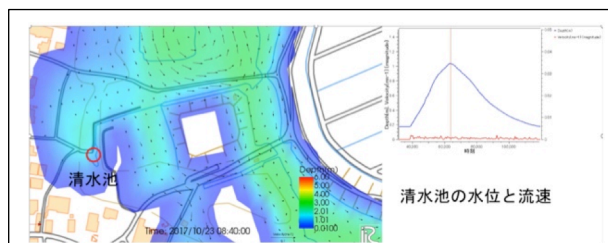


図 55. 清水池付近 (最大流速 0.2cm/s)

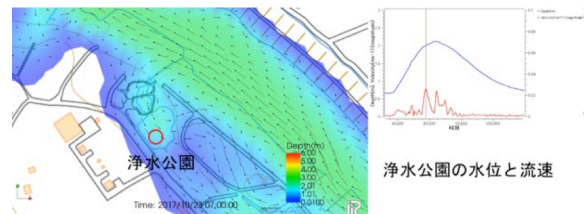


図 56. 浄水公園付近 (最大流速 2.6cm/s)

17] 津屋川本川の水温安定化の検討

湧水地はそこから流れ出る水が水路を經由して津屋川につながっており、同環境であれば湧水地間の諸生物の往来は可能であるが、津屋川中流部は川が幅広となり流れは緩く、日射や気温の影響受けやすく、水温変動が大きい。湧水と同環境とはなっていない。しかし、ソースである水は湧水起源であるから、通常の河川よりは冷涼で安定的である。

また、上流部は先に得た結論のとおり、支川扇状地からの湧水の復帰量は少なく、濃尾平野に逸失しているため、同様に湧水地間を往来させるに十分とは言えない環境をもたらしていると考えられる。そこで、2つの調査を行った。

a) 河床堆積層下の水圧と本川環境改善可能性の検討 (現地河床掘削調査)

中流部 (浄水公園湧水地付近、下流から 8km 付近) の本川で、河床の湧水が回復すれば、河道の一部の水温環境を回復できると考え、それを検討する現地調査を行った (図 57)。

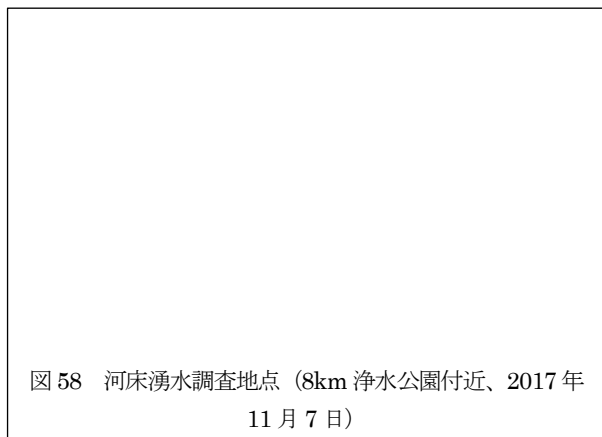


図 57 河床湧水調査地点 (8km 浄水公園付近)

この付近の河床は厚く泥が堆積しており、事前の調査ではその下には透水層の砂または砂利の層があるとい

かっていた。そこで、①その砂層の被圧の度合い、②泥層に孔をあけて開放した場合の湧水量、の2つを測り、どの程度の掘削でどの程度の量を得られるのかを検討した。

具体的には浄水公園（扇状地側）からすぐの地点1'、地点1（岸から約6m）、地点2（岸から約12m）の地点で、内径3cmまたは10cmの塩ビパイプを打ち込み、内部を空にして、①その水位がどこまで上がるのか、②河川水位と同じ高さでいくらの湧水速度となるのかを計測した（図58）。



2017年11月の地点1'、1の設置時は、扇状地に近い地点1'で11cm、遠い地点1で6mmの湧水圧がみられ、1'を水面付近でカットした場合の湧水流量を断面積で割ったところ、0.55cm/sであった。これは1m²の河床面積に換算すると5.5L/sの流量に相当する。その後の観測で水圧は、雨（季節）に応じて上下しており、地点1でも数cmまで上昇がみられる。

2020年10月19日にさらに扇状地から遠い地点2で内径10cmの塩ビパイプを打ち込んだところ、0.078cm/sとなり、1m²の河床面積に換算すると0.78L/sの量となった。

これらから、河道全面では困難だが、扇状地側（右岸側）の河床の一部を掘削すれば、岸寄りに比較的安定した水温のエリアを形成できる可能性があることを示している。

b) 平野側井戸群の本川還元の可能性の検討（現地井戸調査）

本川上流部の流量を回復させることができないかを調べるため、上流部（源氏橋付近）での地下水の行き場を探したところ、左岸堤防すぐ東の飯ノ木の集落では多くの自噴井がありかなりの流量で流出していることがわかった。そこで、①滝谷の水収支（逸失流量の推計）、②逸失した地下水の川への還元可能性の検討を行った（図59）。

滝谷の山地流量から推定される支川流域への供給量と本川上下流の流量増分を比較し逸失したと推定される量は夏場に多く、0.16~0.2m³/sであった（表2）。

一方、飯ノ木集落を出入りする流量差を計測したと

ころ、夏場は上記の流量を上回る月が多かった。別の水質調査（井戸など）を行ったところ、さらに北の牧田川の伏流水による自噴もあることから、より多い流量となったことがわかっている（図32）。

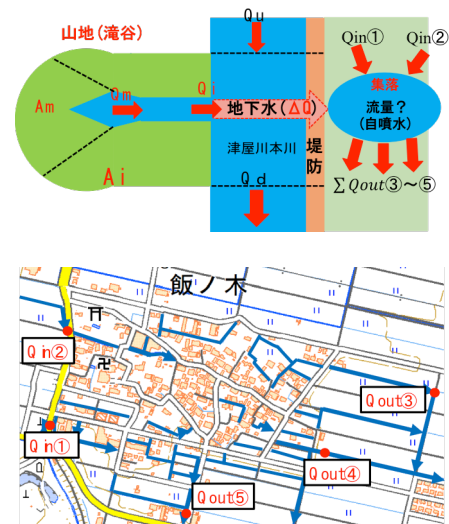


図59. 上流部支川滝谷の水収支の概念図(上)と、飯ノ木付近の観測点(下)

この地下水位が、津屋川本川の水位よりも高ければ、物理的に還元できることになるため、津屋川に最も近い井戸について、閉塞しながらチューブを立てて高さを測ったところ、川の水位より1.3m前後高い地下水位であることがわかり、十分に本川に供給可能であることが判明した（図60）。

表2. 滝谷の水収支（地下水への逸失流量推定値）

地点	日付	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
③ΔQ		0.16386	0.19112	0.16475	0.00141	0.18824	0.06899	-0.05606

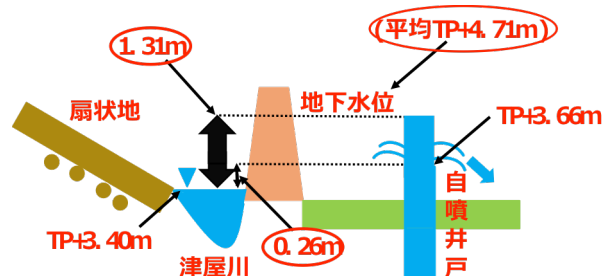


図60. 自噴井戸と津屋川上流部（白山神社）の水位（2017.6.1）

18】小規模扇状地群の扇端部を横断する河川の流況に関する現地観測

扇状地では、扇頂部から放射状の流路痕跡を留めつつ網状流路が直線的に流れ、扇中部で覆没した伏流水が扇端部で湧出する。山地からの激しい土砂流出を伴うことから流向・流路の制御は困難であるが、小河川では集落発達に伴う用排水目的のため、歴史的に改変されてきた事例が見られる。特に複数の扇端部を縫うように流れる場合、豊富な伏流水を集めることから「湧水河川」的特性も備えることになる(図61)。

本研究の対象河川が流れる濃尾平野は、過去 100 万年ほどにわたり、養老山地麓の断層傾動（地塊）運動により沈降して低くなった「濃尾盆地」に、木曾三川をはじめとする河川が流れ込んで氾濫原を形成して広がってきた。そのため、平野の西側に河川が集中して流れ、分厚い堆積層を有する。この分厚い堆積層には豊富な地下水が含まれ、かつて多数の自噴帯が見られていたが、高度経済成長期の大量の地下水利用に伴って地盤沈下が引き起こされた⁹⁾。近年では、地下水利用の規制に伴い、水位は上昇し地盤沈下は収束傾向にあるが、自噴帯や湧水量の回復までには至っていない。かつての干拓、近年の圃場整備やインフラ整備などの土地改変に伴って進められてきた、池沼や「河間」（泉）の埋め立てなども相俟って、現地では、かつて豊富にあった湧水域の存続が危惧されている。

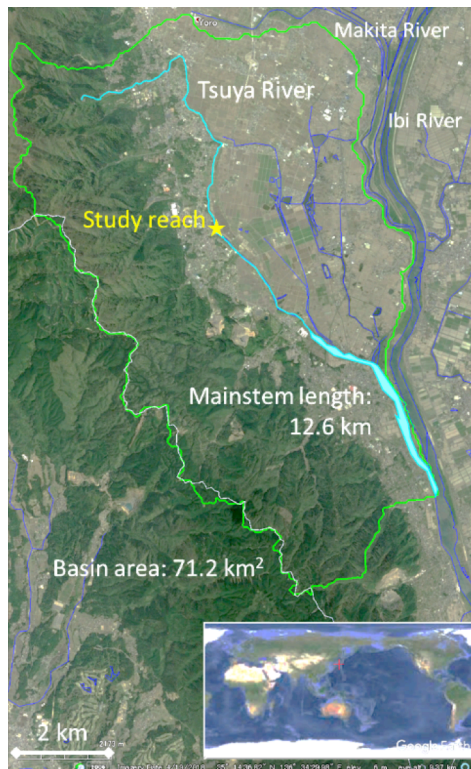


図 61 津屋川の本流流路、流域と調査地 (Google Earth 作図)

本研究は、こうした背景を抱える地域に現在も残された「湧水河川」を対象に、河川流況の詳細な観測を通じた水動態の解明を目指すものである。こうした河川では、四季を通じて一様な流況・水温環境を保たれ独特な生態系が成立するが、通常、直接視認可能な表流水のみでは連続条件を満たさない。そこで本研究では、扇端部を横断的に流れる湧水河川のうち、河間からの明らかな湧水流入が見られる区間を抽出し、その流入前後における河川流量の変化を記述したうえで、当該区間における流れ場の計測から河川流量の局所的な変異を記述することにより、湧水河川の水動態を明らかにすることを目的とする。

対象河川は、濃尾平野西端に位置し岐阜県養老町・海津市を流れる揖斐川水系津屋川（流域面積 71.2km²、幹線流路延長 12.6km）である。津屋川は「養老の滝」に源を発し、急峻で脆い養老山地に沿って流れており、その過程において周辺の河間（泉）との接続が見られるなど、湧水が多く流入する。右岸（西）側には堤防が無く、養老山地の崖錐地形に起因する複数の小規模扇状地の扇端部と近接する一方、左岸（東）側には堤防が築かれ、かつての輪中地帯であった低平地と隔絶されている。この堤防は、かつて左岸地域に成立した複数の集落を囲う輪中堤防を接続することにより、江戸時代初期（1656 年）に整備されたもので、現在の川筋も人為的影響を受けたものとなっている。

調査地は、揖斐川合流点から 8.3km 上流に位置し、側方に人工的な河間（清水池）があつて湧水が集中的に流入する瀬・淵を含む約 60m のリーチ（平均勾配 1/450）を選定した。津屋川の本川流路、流域と調査地の位置関係について Google Earth で作成して、ドローンの空中写真から Agisoft Photoscan Professional にて処理・作成した調査地周辺のオルソ写真を示した(図 62)。

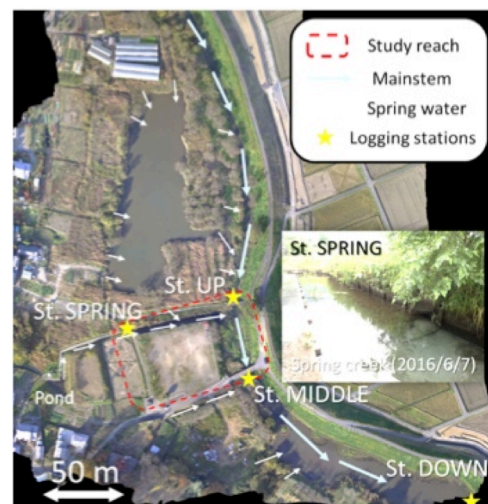


図 62. 調査地周辺のオルソ写真 (2016.12.2)

データ収集として、2016 年 6 月から 2021 年 3 月にかけて、湧水を集めた水路 (spring creek) が流入する上下流の 4 地点 (Sts. UP、MIDDLE、DOWN and SPRING) における水温・電気伝導度と St. UP の水深について、投げ込み式の自記式測器 (HOBO Onset Logger U24 & U20L) により連続観測した。さらに、出水期と非出水期 (2016 年 6 月 7 日、12 月 2 日、2017 年 6 月 13 日の 3 回) において、河川地形と 3 次元流向・流速分布を超音波流向・流速計 (Xylem 社、Sontek RiverSurveyor M9、以下 ADCP と記載) により計測した。本機種は、周波数の異なる 5 方向の超音波ビームを送受信可能なセンサーを備え、従来、困難であった広範な水深領域 (15 cm ~ 80 m) の計測が可能で、高精度な位置情報を取得可能な RTK-GPS (移動・固定局設置型) も備える。計測の際は、ADCP と移動局を専用小型艇 (Xylem 社、ハイドロボード) に搭載して調査範囲の水面を曳航し、別に設置した固定局とも無線接続したタブレット PC 上にて、専用制御ソフト Sontek Hydro Surveyor (Xylem 社) を操作しデータ収集を行った。なお、ここで使用した ADCP の RiverSurveyor M9 に関して、USGS の Office of Surface Water により測定精度の検証が行われており、Teledyne RD Instruments の RiverRay と同等であることが確認されている。

以上の収集データをもとに処理・分析を実施した。本川流量に対する湧水流入の寄与を調べるため、Orlova and Branfireun に倣い、連続観測された電気伝導度をトレーサーとする物質収支モデルを適用した。これは最も単純な混合モデル (mixing model) に相当する。また、当該区間における河川流量の局所的な変異を記述するため、ADCP の計測値は、Sontek Hydro Surveyor (Xylem 社) により当該水域内に内挿補間したうえで水深平均流速を用いて、各河川・各流路の横断面内で積分し縦断方向に沿った流量を算定した。

①水温、電気伝導度の変動特性

St. UP における水深、各地点における水温、電気伝導度の変動状況について、調査地に最も近い観測所 (松山観測所、国土交通省水文水質データベース) における当該期間中の降雨状況とともに記録した。地点ごとに異なる、断続的な欠測期間が少なからずあるが、水温、電気伝導度において地点間の違いが顕著に見られる。すなわち、水温に関して、湧水のそれは若干の日周変動を伴いつつも、ほぼ同じ水準 (17~18℃) で推移したのに対し、他の本川地点の水温は日周変動に加え、降雨や季節などに 3 よって大きく変化した。また、電気伝導度に関しては、いずれの地点においても降雨に対する鋭敏な応答が見受けられたが、表示値の範囲は、湧水、下流、中流、上流の順に高くなっていた。電気伝導度の低い湧水が本川に流入することによる希釈効果の存在が示唆された。

②河川流量に対する湧水寄与率

式(1)・(2)で算定した湧水寄与率を示し、両者の明らかな違いが分かりづらいが、湧水流入地点からより近い、中流地点での流量に対する湧水の寄与が大きくなった。既往の調査実績に対し高い水準であることから、津屋川の河川流量に対する湧水の寄与は非常に大きいことが確認された。また、中下流間の比較からは、下流地点の流量に対する湧水の寄与は中流地点のそれに比べて相対的に小さくなったと考えるのがより自然であるが、下流地点により近い流入水に異なる水質の水塊 (別起源の湧水含む) が影響した可能性も考えられる。

③流れ場の空間的変異

今回実施したうち、2016 年の 2 時期における計測結果によると、調査地の河川流量は、6 月 7 日に平均 0.16 m³/s (最大 0.43 m³/s)、12 月 2 日に平均 0.21 m³/s (最大 0.47 m³/s)、湧水流入量については、それぞれ 0.022 m³/s、0.027 m³/s と推定されたことから、出水期後の 12 月にいずれもやや多くなった。この結果は前記した冬季の湧水寄与率が大きくなることと反しないが、降雨から浸透し涵養された地下水の影響か、6 月に活発と思われる蒸発散の影響かは精査が必要である。

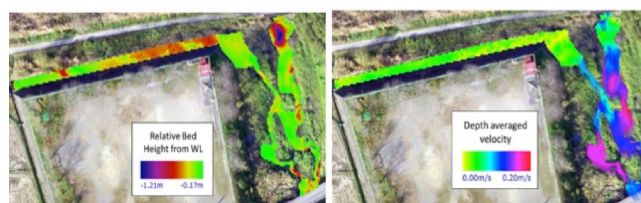


図 63. 流れ場の空間的変異 (左) : 水深、右 : 水深平均流速。
(Sontek Hydro Surveyor によりデータ処理・作図)

12 月 2 日における計測結果により、全体的に低流速ながらも本川上流部の淵と中下流部の瀬の分布が可視化された (図 63)。また、本調査地では、1988 年にも水深、流速分布が計測されており、最深部は水深約 2.1 m、最速部は流速 0.3 m/s に達するなど、全般に大水深で高流速域が広がっていた (図 64)。なお、当時の空中写真 (国土地理院 : 年代別の写真 (1987 年 10 月 18 日)、地理院地図、<https://maps.gsi.go.jp/>) を参照したところ、図との違いは明らかで、河道内の植生繁

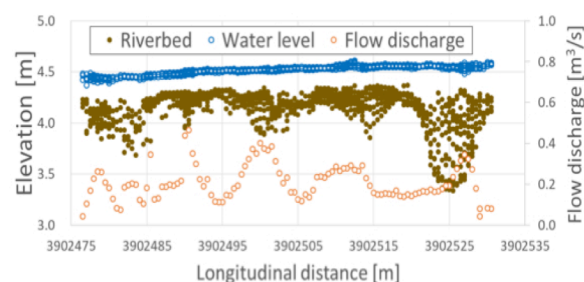


図 64 本川縦断方向に沿った河床高、水位、河川流量の分布
茂域が大規模に拡大してきた様子が窺われる。したがって、河道内への植生域拡大と土砂堆積により、全般

的な低流速化、浅水域化が顕著になったと推察される。

④河川流量のリーチスケールにおける変化

また、さらに河川流量のリーチスケールにおける変化を検討した(図 65)。12 月 2 日における観測結果から、水面と河床の標高分布と各横断面で算定された流量の縦断分布を示し、それにより縦断的に分布する河床の凹凸(瀬・淵構造)の存在が確認できた。この瀬・淵構造の縦断的な遷移に伴って大きく流量が変動している様子が窺えた(平均値の 10~220%)。このことから、津屋川では側方からの湧水の流入(約 3902515 m 地点付近)だけによらず、浸透・湧出などの河床を介した表流水と伏流水の水交換により、流量の空間的変異が生じていること確認された。

また 12 月 2 日における観測結果から、側方から流入する湧水を集める水路(湧水流入水路)に沿った各横断面で算定された流量分布と磁北からの流向(角度)の縦断分布を示す。流向 90° 付近が左から右に向かう流れが生じている様子を表すが、本川への流入が近づくにつれて、一意的な流向になっていなかった。この方向に沿った流量の変化を見ても、図示の左半分で増加した一方で、右半分では減少に転じている様子が窺えることから、本川流入点からの背水の影響が示唆される。

湧水流入水路に沿ったデータを、2017 年 6 月 13 日の観測結果について整理した(図)。この年は入梅がやや遅く、水路内の流れが滞って渇水期の様相を呈しており、右方向に向かう流れが確認できなかった。ただし、中程(約 642605 m 地点付近)から流向が大きく変化している様子が見受けられ、ここから左右に発散する流れの存在が示唆された。流量の分布もこの変化に対応しており、中程で最大流量を呈していた。以上から読み解くに、この分布は中程の位置からの湧水の湧き出しを検出し得たものと考えられる。渇水により水路内の流量が小さかったために確認されたが、同じ箇所を見ても、やや不自然な流量の極大値が確認されることから間接的に裏付けられたものと考えられ、恒常的に湧出している水源が確認されたものといえよう。

本研究では、濃尾平野西縁に位置し、小規模扇状地群の扇端部を横切って流れる、揖斐川水系津屋川を対象に、河川の流況に関する現地観測を行った。江戸時代に連続堤の整備とともに出現した「排水路」が、図らずも多量の湧水を受け入れる「湧水河川」としての性質を獲得したことを踏まえ、湧水帯の縮減、湧出量の減少に直面する周辺地域の水問題に示唆を得るべく企画した。

はじめに湧水の流れに対する湧水の影響を調べるため、湧き水とその合流点の上下の主流地点で継続的に記録された水温と電気伝導率(EC)の時空間変動を分析した。さらに、ADCP を適用して河道内の流れ場を調査し、流量変動を考察した。これらの結果から、物質収支モデル(単純な mixing model)により、河川の流

れに対する湧水の寄与を推定することができ、また、

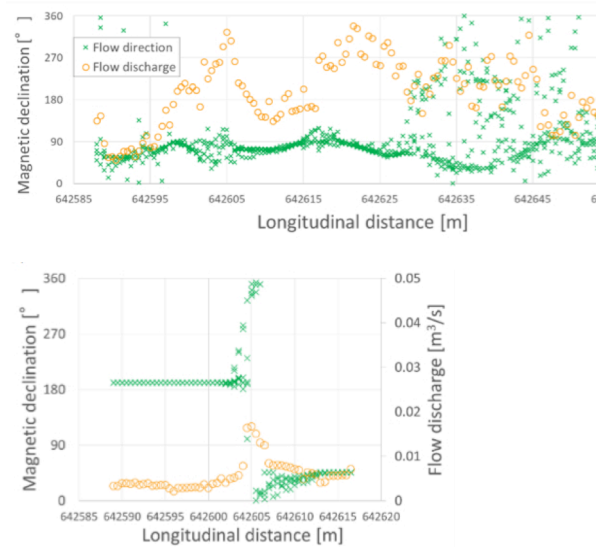


図 65. 湧水流入水路に沿った流量、流向の縦断分布
(上: 2016.12.2、下: 2017.6.13)

瀬・淵構造などの河床形状は、流量の空間的変異を促す可能性があることを明らかにした。

以上から、湧水を多く抱える河川の水動態を理解するためには、近接する周辺の小川や池から流入する湧水だけでなく、河床景観を介した地表水と地下水の交換も重要であるとの見解が得られた。

19] 湧水環境に生息するハリヨの繁殖生態と保全

本研究の対象河川が流れる濃尾平野は、過去 100 年ほどにわたり、養老山地麓の断層傾動(地塊)運動により沈降して低くなった「濃尾盆地」に、木曽三川をはじめとする河川が流れ込んで氾濫原を形成して広がってきた。そのため、平野の西側に河川が集中して流れ、分厚い堆積層を有する。この分厚い堆積層には豊富な地下水が含まれ、かつて多数の自噴帯が見られ、ハリヨを中心とする湧水に依存する生物種が広く分布していたが、高度経済成長期の大量の地下水利用に伴って地盤沈下を引き起こされ、湧水量が激減している。それに伴いハリヨやホトケドジョウなどの魚種も減少の一途をたどっている。

近年では、地下水利用の規制に伴い、水位は上昇し地盤沈下は収束傾向にあるが、自噴帯や湧水量の回復までには至っていない。かつての干拓、近年の圃場整備やインフラ整備などの土地改変に伴って進められてきた、池沼や「河間」(泉)の埋め立てなども相俟って、現地では、かつて豊富にあった湧水域の存続が危惧されている。こうした背景を抱える地域に現在も残された「湧水河川」を対象に、河川流況の詳細な観測を通じた水動態の解明によって、ハリヨ等の湧水生態の構成種が生息する場の改善を具体的に提示・実践することは喫緊の課題である。

津屋川中流域における最大のハリヨ生息地である湧

水域の涵養域を、地形・地質・水質などから同定し、その区域内の各湧水域の湧水量の津屋川流量への寄与を場所と時期的に比較した。これをもって変動する湧水域（水温 13～18℃の水域）ごとの湧水域面積を算出した。その面積はハリヨ営巣数とおおよそ相関を示したが、面積以外の要因（湧水期間・底質・水深）の存在を示唆した。

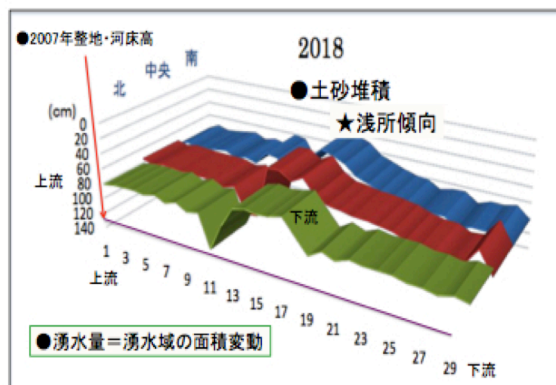


図 66. 2007 年より土砂堆積の経過。

また、25 年前の湧水域と本流域における営巣地の分布状況を当該研究期間のそれと比較したところ、土砂堆積が進行し浅所化・軟泥化し、営巣に不適状況となっていた。特に、本流の土砂堆積・陸化が著しく、2011 年から営巣激減した(図 66)。

1990 年代初期には流程 50m 右岸区域で、1 日最多 60 個の営巣が、2018 年には年間通して数個に過ぎなかった。今回の詳細な水文調査によって、生息域、個体数や営巣地点は湧水動態との強い関係が合理的に認められ、その選択性が精度をもって確認された。特に、2006 年からの個体数変動調査により、湧水量と土砂堆積がもたらす環境変化に伴って営巣数・個体数が変動した。さらに、実際の営巣成功率や孵化仔魚数などの繁殖成功度を営巣地の環境要件とともに計測し、環境改善の事業化（海津市津屋地区等の生息環境の回復事業）に高度に反映させ、その効果検証をした(図 67)。

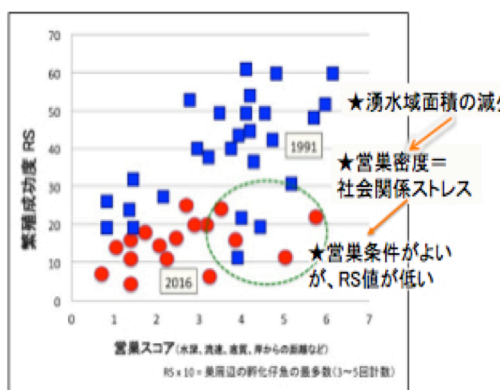


図 67. 営巣条件と繁殖成功の 25 年間の比較

現在、ハリヨの繁殖場や生息場に対する物理的環境

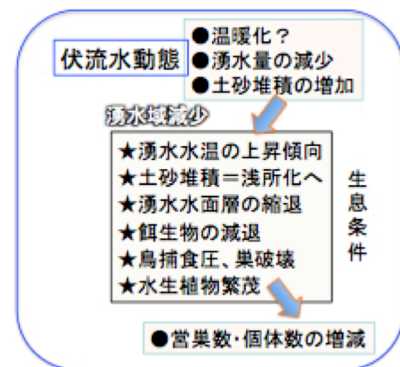


図 68. ハリヨの生息条件の構成要因

動態の重層的な関係性については、これまでの資料をもとに精査解析中である(図 68)。この解析は生物種が生息する環境の改善において高度に再現性を担保し、多自然川づくりに関する生息環境の復元に精緻に寄与するものと判断できる。

20] 結びにかえて

養老山地東側斜面と低平湿地面（濃尾平野）の間を流れる津屋川は、水文学・河川流況史・同位体環境などに基づく本研究により、詳細に水環境動態が把握できた。例えば、山地に降った雨は滝谷、小倉谷、志津谷（中・上流域）をはじめとする沢筋から、それぞれで東側に広がる扇状地（崖錐）に覆没し、濃尾平野に接する付近（扇端）付近で南北に点在する湧水群として地表に復帰し、これを集水して南流するという特徴を持ち、また特に上流域の伏流水は東側堤内地に漏出する量が多く、その構造も把握された(図 69)。

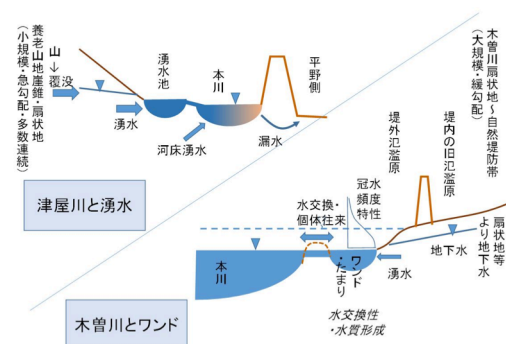


図 69. 津屋川湧水群と木曽川ワンドの対比

しかも興味深いことに、津屋川湧水群は、濃尾傾動運動の沈下する低地の西端にあたり勾配が小さく、その湧水群は標高 10m に満たない低平地であるとともに、揖斐川本川の水位変動（洪水・潮位）を強く受けるという河川水理学的な特徴を併せ持っている。つまり、その湧水群は、ハリヨ等にとって湧水特有の生息場を提供しているが、本川との標高差は小さく攪乱の影響を受けやすく、イタセンパラを対象とした木曽川

ワンド群と比して環境も規模も異なるものの、氾濫原の小水域、攪乱と水交換といった環境要素において概念的に類似する水際構造が認められた。(図 69)。

実際に、ここで注目しておくべきは本研究における主テーマにはならなかったが、イタセンパラは津屋川流域にも近年まで生息していたことである。イタセンパラはことさらに湧水環境に依存する種ではないが、当該流域で冠水攪乱や水の更新環流を生起するまさに氾濫原が広がっていたと、本研究テーマの「近世以降の濃尾平野揖斐川右岸地域における水域の変遷」などによって容易に推察される。このことは、多自然型などの環境改善を実施する際、現行の生物分布や生態の環境状況をレファレンスするだけで十全ではないことを意味する。つまり、その生息している環境状況が、例えば繁殖成功や摂餌成功にどのような適応関係をもっているかを検討、あるいは少なくとも留意しておく必要があるのである。環境状況のいくつかの要件に対して、生物情報が種の有・無だけでは自然再生は困難を帰するといっていだろう。むしろ、現在、実際の河川管理のなかで、この生物の環境適応性を主目的にはできないだろうし、そもそも生物種自体の適応情報が十分に研究されているわけではない。しかしながら、この視点が欠落している環境改善や生物保全の事業は、近将来的に縮退する結果となるか、コストが伴う維持管理の常態化が強えられることだろう。

21】河川等政策への質の向上への寄与

氾濫原環境と湧水環境の実態解明において、魚類の生活史および保全を中心にした本研究結果をもって、具体のテーマごとに河川事業政策に対して応用的な質的向上に資するため整理し下記する。

① 河道掘削を利用した循環的氾濫原再生

本研究により、既存水域の全体的な劣化傾向と新規水域の良好さは、二枚貝とイタセンパラの生息場としてみた場合、ワンドの機能には寿命があることを示した。流路が固定され、砂の供給量も制限された現況河道の条件では、川の営力に依存した新規水域の形成はほぼ見込めない。従って、河道掘削などを通して新規水域の形成や生息場シフトを促進する積極的な働きかけが必要であろう。つまり、主たる治水整備メニューである河道掘削を利用した「循環的氾濫原再生」、すなわちゾーニングと掘削回帰年に基づき定期的に掘削しつつ、常に区間内のどこかにフレッシュなワンドが存在するよう管理を行う必要がある。

② 環境 DNA 解析による魚類の移動特性

環境 DNA (種特異的解析) の活用において、まず事前に目的に応じて、検出に効果的な採水方法を検討しておく必要がある。継続的な複数地点のサンプリング

による解析によって、当該種 (イタセンパラ) の単なる有無だけではなく、産卵期に生じる河川の増水に乗じて移動し、分布拡大や維持を図っている移動生態の理解に一助した。

③ 航空レーザー測量における地形補正の検討

初期 (2007~2009 年) と新規のデジタル標高モデル (地形 DEM) において、航空レーザー測量の精度の違いが原因と思われる誤差の存在を示した。河道内における地形変化を検討する際には、景観区分 (特に樹林地) ごとに誤差の補正作業によって、土砂の堆積や洗堀の実態ならびに河道内氾濫原における冠水頻度の変化などを正確に把握する必要がある。

④ 糞 DNA 分析による外来種の食性解析

特定外来生物の食性は在来種に直接的影響として重要な情報である。原産地では植物食を示すヌートリアの糞 DNA 分析によって、動物・植物の両方を食べる雑食性を示し、通年にわたって二枚貝類を食していることが明らかとなった。同時に、二枚貝類を産卵母貝とするイタセンパラにも生息負荷がかかると推定される。すなわち、河川環境対策として哺乳類の特定外来種対策の重要性を付加した。

⑤ 河道掘削・低水路事業による生物交流の阻害

本研究から、右岸・左岸間でイタセンパラ集団の遺伝的組成が異なり、また近年形成された中洲集団は兩岸の中間的な遺伝的組成を示した。ワンド群間の交流は主に同一河岸内で生じており、河川を横断する交流には、流心部の流れが阻害となり、中洲の存在が河岸間の交流の維持に寄与していることが示唆された。大規模河川における河道掘削・低水路化は、兩岸間の生物移動の阻害をもたらすと想定され、イタセンパラの健全性を長期的に担保するためには、河川横断方向のコリドーを検討する必要がある。

⑥ 全ゲノム決定と歴史集団動態

イタセンパラの全ゲノム決定に基づく歴史的集団動態の遺伝集団構造の推定により、本種の集団サイズの変動は沖積平野の環境変遷をよく反映し、まさに氾濫原の魚として適応してきたことが伺われた。すなわち、生物の保全においては、当該種の歴史的背景を視野に入れた生息環境の改善に努める必要がある。

⑦ ワンドにおける魚類の分布に影響する要因

ワンドごとの魚類群集を物理環境条件と要因分析をした結果、概して他の水域と接続する水域数、冠水頻度、本川との連結性・孤立性によって類型化できた。つまり、河道内氾濫原において、生物種によって好適な生息場は異なり、それは本川との連結性 (冠水頻度や攪乱強度) と主に説明された。例えば、イタセンパ

ラは、冠水による水域の更新頻度、いわば水域の鮮度がより高い水域に出現しやすいことが明らかとなった。すなわち、イタセンパラ保全には、上記の物理環境条件を反映させる土木的試みを検討すればよい。

⑧ 種の分布要因としての出水影響と環境改善効果

ワンドごとのイタセンパラ生息の年変動は、連続水域の造成や浚渫による土木的改善によるだけでなく、大きく冠水をもたらす出水によって、広く分散し生息域を拡大する。しかし、新しい移入先の環境が適さない水域では再生産することができないだろう。生息数の変動は、物理的条件が例えば繁殖成功にどのように寄与するかを検証する必要がある、精度のより高い改善事業のためには継続的な効果評価が求められる。

⑨ ワンド水域がカエル類に果たす役割

魚貝類にのみ着目すると、連結性の高いワンドだけが重要となりがちであるが、連結性が中～低の領域にもカエル類の生息にとっては重要な生態的機能があり、その領域を確保することが望まれる。河道内氾濫原において、連結性に関わる環境傾度を多様に確保することは、生物多様性の最大化に寄与する。つまり、本知見は、水域間のすべてを高い連結性を有するように誘導（掘削等により低い地盤高を創出）する必要はないことを意味する。河道内氾濫原管理において、陸域化している現況や管理コストに照らし、調和的な保全対策が求められる。

⑩ 近世以降の水域の変遷

この揖斐川西側流域一帯は津屋川を西端とし、湧水・泉（河間）との接続する大湖沼・湿地帯が広がっていた。近世以降、連続堤の整備に伴って浸水リスクが低減した氾濫原の農地転用が進む中で、一帯の干拓が進み水域が細分化され、水域の減少が確認された。水域史は、魚介類の生物量の減少ももたらしたに違いない。さらに今後、それは本川の生物量への影響を検証する課題となろう。「流域治水」において、「流域水域史」という視点を加味した検討も必要と思われる。

⑪ 築堤による湧水河川の成立

津屋川の現在の幹線流路は、東側にのみ連続堤防を有し、西側から養老山地に由来する多くの湧水と土砂を受け、山麓に連なる扇状地群の端を横切って伏流水を集水している。左岸（東）側には堤防が、江戸時代初期に整備され、現在の川筋も人為的影響を受けたものとなっている。この江戸時代に連続堤の築堤整備とともに出現した「水路」（＝津屋川）という歴史が、図らずも多量の湧水を受け入れる「湧水河川」としての性質を獲得したといえ、湧水依存種の生息にとって大きく寄与し、ハリヨの最大の生息域となったと思える。つまり、人工構造

物が生物多様性にもたらす正の影響として、歴史的事例の一つといえるかもしれない。

⑫ 安定同位体を用いた魚類移動の履歴分析

本川における $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値の流程変化は、津屋川に流入する湧水との混合によって生じると考えられるため、本川と湧水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値の流程変化を明らかにし、魚類耳石の分析による移動履歴の研究に活用できると考えられる。

⑬ 遺伝的多様性と集団構造の維持

ハリヨを用いた集団帰属性解析の結果、濃尾平野のハリヨは北西部と南西部の2集団に大きく分けられるとわかった。この約15年間で各局所集団の一部の閉鎖的な局所集団では遺伝的多様性が低く、創始者効果や過去の集団サイズの縮小が示唆された。小集団化を回避する整備が必要であるが、人為的に再整備地のなかには、異なるメタ集団からの放流が強く疑われる生息地も存在した。保全・管理として、放流行為は基本的に回避すべきであり、実施の際はメタ集団構造を考慮しながら、遺伝的多様性の維持を図っていく必要がある。

⑭ 津屋川湧水群と本川の水文学的検討

山地流出・扇状地貯留流出という流出プロセスは、湧水地群および津屋川の水文循環を安定させ、湧水地の水温・水質環境を安定させるとともに、津屋川の流況変動を抑制する効果を維持していることを示した。一方で、流量変動自体は大きく、ベースとなる地下水位が低下してしまうと、湧水が極端に少ない期間が現れやすくなる懸念も同時に示している。従って、周辺の地下水位の低下をもたらす要素（例えば、河道掘削による水位低下、事業所の連続揚水など）には、注意を払う予防措置が必要である。

⑮ 本川と支川の水文関係と湧水群の動態

一般的に、出水に伴う氾濫原の冠水は、流速等の物理的かく乱、土砂・シルトの流入・堆積、濁質水質など生息場・避難場としての機能は大きく低下し、魚類等は流失する危険もある。

津屋川において、年に数度程度以上の出水特性を見ると、流域への降雨出水に伴う本川流量増加がもたらす水位上昇は大きくはなく、下流の揖斐川からの背水による水平的な水位上昇が顕著であった。また、主な湧水地の流速は、10cm/sにも及ばなかった。例えばハリヨの遊泳力との比較でみれば十分遅い流れであり、さらには増水で水位が上がるに従い、扇状地斜面側の湧水する斜面の浅い部分に避難できていれば、流速はほとんどなく、水質も問題ない状況で出水をやり過ごすことができると考えられる。「流域治水」という観点

を促進する河川管理者の方向性において、本川と支川の水文動態的な関係を解析し、その生物応答への意義を検討する必要がある。

⑩ 湧水の水温安定化の検討と伏流水動態

湧水地はそこから流れ出る水が水路を經由して津屋川につながっており、同環境であれば湧水地間の諸生物の往来は可能であるが、津屋川中流部は川が幅広となり流れは緩く浅く、日射や気温の影響受けやすく、水温変動が大きいため、湧水と同環境とはなっていない。北方系魚種であるハリヨにとっては15℃前後の水温域が必須であり、本研究の成果は湧水に依存する種にとって極めて重要である。

また、上流部は支川扇状地からの湧水の復帰量は少なく、濃尾平野に逸失しており、水系における湧水環境を縮退させている。特に、このような伏流水挙動の把握は、湧水性依存の生物環境の維持のみならず、治水的に重要な視点と思われ、「流域治水」の課題にもなりえる。

⑪ 湧水細流の流況観測

30年以上ハリヨの繁殖生態の調査地点となっている湧水細流において、降雨や季節を加味しつつ水温（周年的一定性）、電気伝導度（低い電気伝導度）の変動特性を明らかにした。当該地点の百数十m区間の細流の水源は、最上流の湧水池のみならず、流程途中でも湧水が湧出していた。微細な河床形態やに応じて河床、流速、流向、流量および表流水と伏流水の水交換などに依拠した流れ場の空間的変異が明確になった。

⑫ 今後の環境改善への河川生態学術的視点

津屋川中流域における最大のハリヨ生息地である湧水域の涵養域、津屋川流量への湧水寄与の変動を流程に沿って同定し、湧水動態はハリヨの生息域、個体数や営巣地と強い関係が認められ、その選択性を確認した。さらに、実際の営巣成功率や孵化仔魚数などの繁殖成功度を営巣地の環境要件とともに計測し、環境改善の事業化（海津市津屋地区等の生息環境の回復事業）に高度に反映させ、その効果検証をした。なお、「湧水河川」を対象に、河川流況の詳細な観測を通じた水動態の解明（前テーマ⑪）によって、現状では、ハリヨを中心とする生物と湧水微環境との応答関係は解析中である。

今後、多自然川づくりを含む環境改善の高度化においては、現行の生物分布や生態の環境状況を参照するだけで十全ではないことを意味する。つまり、その生息している環境状況が、例えば繁殖成功や摂餌成功にどのような適応関係をもっているかを検討あるいは留意しておく必要がある。環境状況のいくつかの要件に対して、生物情報が種の有・無だけでは自然再生は困

難を帰するといっていいただろう。同時に、環境状況の精緻化・重層化の追究が求められる。むろん、現在、実際の河川管理のなかで、この生物の環境適応性を主目的にはできないだろうし、そもそも生物種自体の適応情報が十分に研究されているわけではない。しかしながら、この視点が欠落している環境改善や生物保全の事業は、近将来的に縮退する結果となるか、回復に向けてコストが伴う維持管理の常態化が強いられるだろう。さらに、「流域治水」事業の進行において、生物多様性の保全を展開する際の基礎的視点をもつことだろう。

謝辞

本研究の開始を認めてくださり、また叱咤激励を含め貴重なご意見・ご教示を賜った委員会委員の皆さま、国交省のご担当の方々、公益財団法人リバーフロント研究所の方々に、この場をおかりして心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Oya, M.: Comparative study on the fluvial plain based on the geomorphological land classification, *Geological Review of Japan* 50(1): 1-31, 1977.
- 2) 桑原徹：濃尾盆地と傾動地塊運動，第四紀研究 7(4)：235-247，1968.
- 3) 海津正倫：更新世末期以降における濃尾平野の地形発達過程，地理学評論52(4)：199-208，1979.
- 4) 堀和明・羽佐田紘大・石井祐次・高橋瑛人：濃尾平野の沖積層と地形，地質学雑誌125(1)：73-85，2019.
- 5) 安田守：濃尾平野における自噴帯の変遷，日本水文科学会誌29(2)：93-99，1999.
- 6) 大東憲二：濃尾平野の地盤沈下対策と地下水管理の現状，地下水学会誌57(1)：9-17，2015.
- 7) Mori, S.: Geographical variations in freshwater populations of the three-spined stickleback, *Gasterosteus aculeatus*, in Japan, *Japanese Journal of Ichthyology* 34(1): 33-46, 1987.
- 8) Kitano, J. and Mori, S.: Toward conservation of genetic and phenotypic diversity in Japanese sticklebacks, *Gene and Genetic Systems* 91(2): 77-84, 2016.
- 9) 岐阜県：木曽川水系津屋川圏域河川整備計画，2001.
- 10) 南濃町：南濃町史・通史編，岐阜県海津郡南濃町，1219p，1983.
- 11) 養老町教育委員会：郷土の治水―養老町における水との闘い―，養老町教育委員会，166p，1991.
- 12) Boldt, J.A. and Oberg, K.A.: Validation of streamflow measurements made with M) and RiverRay Acoustic Doppler Current Profilers, *Journal of Hydraulic Engineering* 142(2): 04015054, 2016.
- 13) Orlova, J. and Branfireun, B.A.: Surface water and groundwater contributions to streamflow in the James Bay Lowland, Canada, Arctic, Antarctic and Alpine Research 46(1): 236-250, 2014.
- 14) 北村淳一（2008）タナゴ亜科魚類：現状と保全．魚類学雑誌．
- 15) Kitamura, J., JN. Negishi, M. Nishio, S. Sagawa, J. Akino, S. Aoki. (2008) Host mussel utilization of the Itasenpara bitterling (*Acheilognathus longipinnis*) in the Moo River in Himi. Japan. Ichthyol. Res.
- 16) 小川力也・長田芳和・紀平肇（2000）淀川におけるイタセンパラの生息環境（総説）．大阪教育大学紀要、49: 33-55.
- 17) 森誠一（1987）わき水の魚：ハリヨの生活史、南濃町教育委員会
- 18) 森誠一（監修編集）（2003）環境保全の理論と実践．信山社サイテック
- 19) 森誠一（2006）魚から見た魚道．RIVERFRONT, 59：6-9.
- 20) Mori, S. (1993) The breeding system of the three-spined stickleback, *Gasterosteus aculeatus* (forma *leuira*), with reference to spatial and temporal patterns of nesting activity. Behaviour 126: 97-124.
- 21) Mori, S. (1994) Nest site choice by the three-spined stickleback, *Gasterosteus aculeatus*, in Spring-fed Waters. J. Fish Biology 45: 279-289.
- 22) Mori, S. (1995) Spatial and temporal variations in nesting success and the causes of nest losses of the freshwater three-spined stickleback. Environmental Biology of Fishes, 43: 323-328.
- 23) 中村守純．1969．日本のコイ科魚類．東京．
- 24) Okazaki T, Watanabe M, Inamura O, Kitagawa T, Tabe M, Nagata Y. (2006) Genetic relationships among regional populations of the deep-bodied bitterling, *Acheilognathus longipinnis*, inferred from mitochondrial DNA analysis. DNA polytypic 14: 276-280.
- 25) Tominaga, T., K. Watanabe, R. Kakioka, S. Mori & S. Jeon (2008) Two highly divergent mitochondrial DNA lineages within *Pseudogobio esocinus* populations in central Honshu, Japan. Ichthyological Research, 56:
- 26) Uehara K, Kawabata K, Ohta H. 2006. Low temperature requirement for embryonic development of Itasenpara bitterling *Acheilognathus longipinnis*. J Exp Zool 305: 823-829
- 27) 上原一彦．2007．イタセンパラの増殖方法に関する研究．博士学位論文．近畿大学、奈良．
- 28) Watanabe, K., Mori, S. & M. Nishida (2003) Genetic relationships and origin of the two geographic populations of the freshwater threespine stickleback, 'Hariyo' (leuira form). Zoological Science, 20: 265-274.
- 29) Watanabe, K. & Mori, S. (2008) Comparison of genetic population structure between two cyprinids, *Hemigrammocypripis rasborella* and *Pseudorasbora pumila* subsp., in the Ise Bay basin, central Honshu, Japan. Ichthyological Research, 56: