

航空写真等を用いた過去の環境情報復元技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平18～平20

担当チーム：河川生態チーム

研究担当者：天野邦彦（上席）、傳田正利

【要旨】

本課題では、過去の河川生態系の状況を推定した上で、現在と比較し、河川環境保全目標を明確に設定するための手法開発を目指した。このために、河川生態系に影響を与える地形・流況、流域における窒素投入量の歴史的变化の推定や水位変動の典型性を文献資料から推定する方法を開発した。

千曲川・豊川における地形・流況の再現の結果、明治・大正期のみお筋は網状に流下し、陸域に氾濫しやすい特性があり、その氾濫域は魚類避難場提供等の機能を有していたことが明らかになった。豊川における大正期と平成の窒素投入量の比較では、水田への窒素投入量は現在の約 1/10、畑地への窒素投入量は現在の約 1.4 倍の窒素投入量が明らかになった。水位変動の典型性を抽出した結果、対象河川の水位変動特性の典型性を抽出することに成功し、その典型性は明治期の水位変動と概ね合致し、一定の普遍性を持っていることが明らかになった。

本研究で取り組んだ研究結果は、定性的な比較で終わることが多かった過去と現在の河川生態系比較をより定量的に比較することを可能とし、自然再生事業などで目標設定などに貢献すると考えられる。

キーワード：過去環境情報、河川生態系、地理情報システム、水理計算、物理生息場モデル

1. はじめに

自然再生事業に代表される河川生態系（河川環境）の保全・復元を行う場合、目標を明確にし、その目標を技術的に実現できるか検討する必要がある。現在の河川改修では、河川生態系の保全・復元の目標を明確にする場合、過去の地図情報（古地図・旧版図等）や空中写真を現在と比較し、その景観の変化から河川生態系変化を推定する手法が一般的である。

しかし、従来手法では問題点がある。それは、河川生態系の特徴である空間的不均質性・時間的変動性を十分に把握できない点である。

河川の特徴である出水というイベントを例にとれば、出水初期、ピーク流量時及び減水期では流況は著しく異なる。また、河川流況を俯瞰的に見れば主流部、水際部など流況は空間的に著しく異なる。このように従来手法では、河川生態系保全・復元の目標となる過去の河川生態系の一部しか現在と比較することが出来ず、事業内容の目的の明確化、事業内容の重点化などが求められる現在の河川事業では、問題があると考えられる。

本課題では、(1)過去の環境情報のデータベース化手法の提案、(2)過去からの環境変遷の再現手法の提案、(3) 将来予測への利用方法の提案、以上の三つ

の達成目標を掲げ、過去から現在にかけての河川環境の変遷を定量的に把握し、河川生態系の変化を短期的・長期的に予測する基礎的手法を提案することを最終的な目的とした。平成18～20年の3カ年の研究期間では、以下の流れで研究を行い、達成目標の実現に取り組んだ。

平成18～19年は、河川環境情報の体系的なデータ収集・データベース化手法の開発、既存資料からの新たな空間情報の生産手法の開発を中心に行った。

この開発手法の一つとして、近年発達・普及が目覚ましい地理情報システム・画像解析技術を用いて、過去（明治・大正期）の河川地形測量データから、河道内微地形及び氾濫原地形を定量的に再現し、現在の河道内地形及び河道周辺地形との定量的比較を可能とした手法を開発した。

河川と氾濫原内の水田で形成される生息空間ネットワークが有していた生息空間機能を検証するため、明治期と昭和期の生息空間ネットワーク構造の定量的な比較を行った。

次に、河川生態系の要素として重要な物質動態の変化を評価するために、過去と現在の窒素投入量の変化を定量的に比較する手法の開発を行った。具体的には、過去の文献資料（民俗学資料）から過去の営農形態（農家経営）を分析し、その有機肥料投入

量から窒素投入量を推定した。

最後に、河川生態系に重要な意味を持つ水位・流量変動特性を分析するため、明治期と現在の水位時系列データをもとに、水位変動の典型性を抽出する手法を開発した。

平成19年～20年は、過去の空間情報、数値シミュレーションを利用した過去と現在の物理環境（主に流況）の変化が生物群集に与えた影響を評価する手法の開発を行った。数値シミュレーションを用いて定量的に再現した物理環境情報に物理生息場モデルを適用し、明治・大正期の物理環境が有していた生息空間機能を推定したものである。

本報告書では、地形復元・生息空間提供機能の復元・比較の対象である河道内微地形、氾濫原地形及び氾濫時の流況を2～4章で報告する。次に、5章で窒素投入量変化、6章で水位変動特性の成果を報告する。

2. GIS・画像解析システムを用いた過去の河川氾濫状況再現手法の開発

2.1 はじめに

現在の河川事業において、河川生態系の保全・復元は重要な配慮事項となっている。特に、自然再生事業のように河川生態系の再生を目的とする事業の場合、その修復目標をどこに置くかは、重要かつ難度の高い課題である。修復目標を検討する過程で、過去と現在の河川生態系の定量的な比較は、修復目標の設定に有用な情報を与える。そのため、過去における河川生態系の状況を定量的に再現し、過去と現在の河川生態系の違い、例えばどのような要因により絶滅が危惧される生物種が出てきたかなどを把握する手法が必要となる。

河川生態系は、大きく分け「生物群集」と「物理環境」というサブシステムで構成される¹⁾。「生物群集」「物理環境」のサブシステムの中には、莫大な構成要素（生物種、物理環境）が存在し、各構成要素は互いに因果関係を持ち、そのシステムは極めて複雑である。そのため、河川生態系のシステムを定量的にモデル化するのは難しい。特に、生物群集のサブシステムは非常に複雑である。生物群集のサブシステムを構成する生物種の存在・生態を全て把握し、生物間相互作用などを分析・システム記述することは現在でも難しく、資料が少ない過去の生物群集のサブシステムを再現するのは極めて難しいのが現状である。現実的に行えるのは、過去の河川生態系を

構成する物理環境に着目し、その状態を再現するのが第一歩である。物理環境の再現を行った後、物理環境と特定の生物群集の関係性を分析するのが現実的な研究進展の方法である。そのため、本研究では、過去の物理環境の再現手法の開発に焦点をあて研究を進めた。

河川改修のための必要性から、河道内地形情報は、詳細に取得され系統的に保存されている。それらの情報を時系列的に分析すれば、過去からの河道内地形の変遷を把握することが出来る。これらを活用すれば、今後の河川環境目標の設定に大きな進展をもたらすと考えられる。

近年の地理情報システム²⁾³⁾・数値計算技術⁴⁾の発達は、過去の物理環境再現に大きな可能性を示している。例えば、GISを用いて過去の河道内及び河道周辺地形を再現し、数値計算により過去の物理環境を再現することができれば、今まで、定性的に指摘された過去と現在の物理環境の違いを定量的に示すことが出来る。また、過去と現在の物理環境の差異が、生物群集に与えた影響を推定することが可能になると考えられる。

過去と現在を比較して大きく変化した物理環境の一つに、河川氾濫が挙げられる。河川改修の目的の一つは、河川氾濫を低減するために行われたため、その変化の大きさは容易に想像できる。また、河川氾濫は、生物群集にとって多くの意味を持つ。河川氾濫は、多様な環境を創出し生物群集の多様性を維持する。一部の魚種は、河川氾濫原を産卵場・成育場として利用するものがある。高度経済成長期に伴い、消失した河川氾濫原は重要な存在であったと考えられる。そのため、本章では、河川氾濫原の物理環境再現手法について述べる。

既往研究では、本研究の目的と類似する過去の河川流況再現の研究事例が少ないながらも存在する。千曲川では明治26年の河川地形測量データから河道内地形を再現し、過去の流況・氾濫状況を1次元計算で再現した研究事例がある⁵⁾。同様に海外では、ライン川上流部の河道地形変化とそれに伴う土砂輸送変化を1次元計算で再現した研究事例がある⁶⁾。これらの研究は、河川工学的な見地から研究が実施され、有用な研究成果・知見を提供している。しかし、これらの研究を河川生態系研究に貢献する物理環境再現手法へ発展させるには、より詳細な流況復元(例えば2次元での流況再現など)が求められる。それは、河川生態系へ影響を与える物理環境特性は

1 次元計算では表現しきれない微細な物理環境構造に影響を受けるためである。そのため、本研究では、2次元での流況再現を目的とする。

このような背景から、本研究では、GIS、画像解析システム、数値計算を併用し、過去の環境情報を定量的に再現するための手法の開発と検証を行い、過去の環境情報活用の方角性を議論することを目的とする。

2. 2 研究の方法

2. 2. 1 調査地の概要

本研究は、豊川水系豊川で行った。本河川は流域面積 724km²、幹川流路延長 77km の一級河川である。豊川は、段戸山（標高 1,152m）から流下し、三河湾に流入する 1 級河川である（図-2.1）。

豊川は、本研究を実施するのに適した特性を持っている。それは、①豊川流域には貴重な過去の地形測量成果が現存していること、②豊川流域では河川改修が大規模に行われ、戦前・戦後で大きな変貌を遂げた流域であるため、過去と現在の物理環境変化が把握しやすい特性を持つ。

まず、①については、最古の資料では大正 12 年

の河道内地形の測量結果が現存し、今も良好な状態で保存されている。河道内地形は、現在行われる横断測量とほぼ同一の精度を有し、地形再現を詳細に

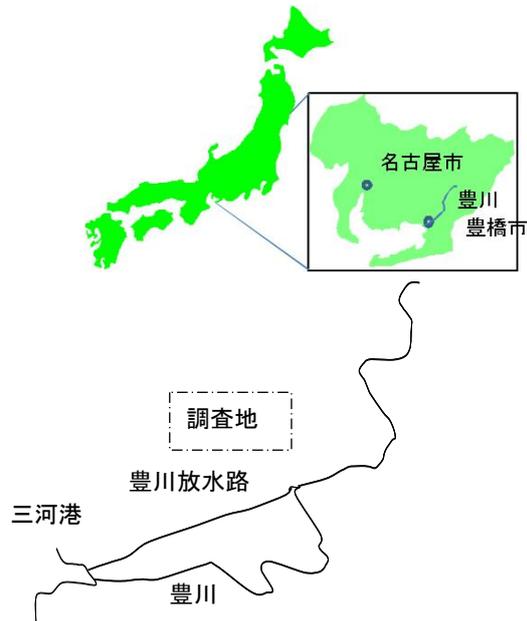


図-2.1 調査地の概要

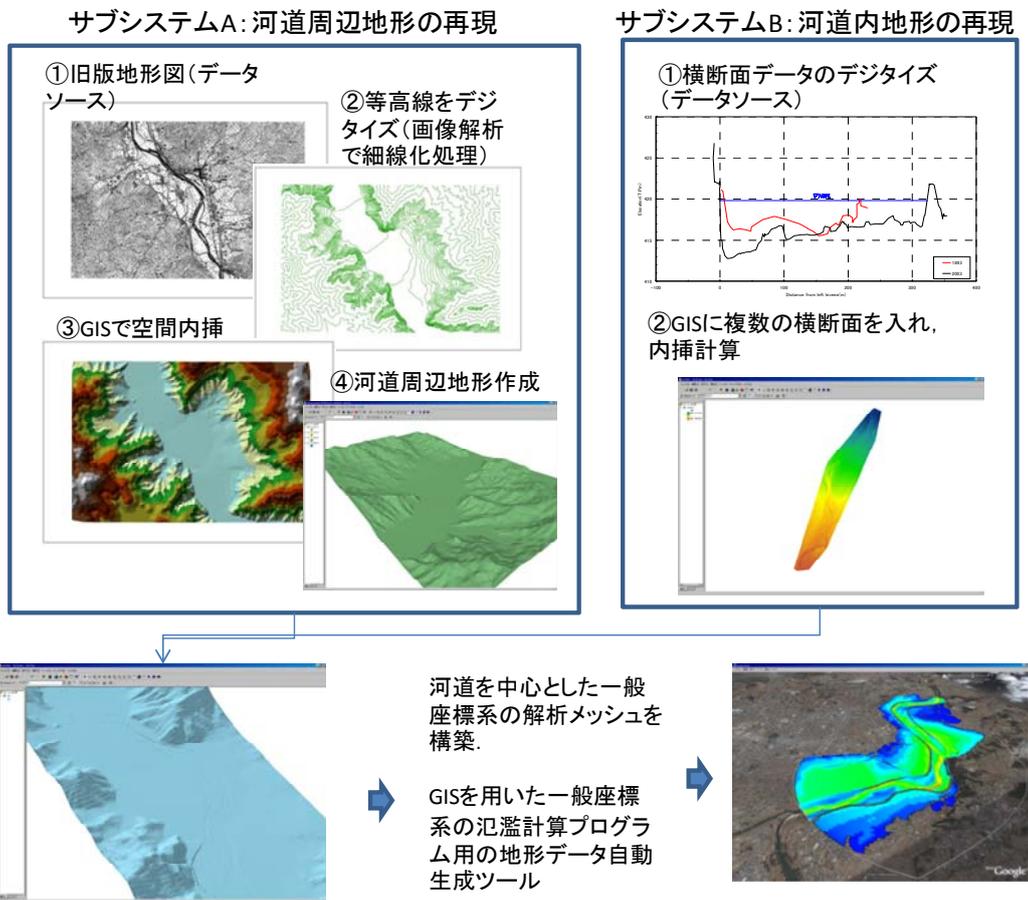


図-2.2 システムのブロック図

出来る精度を有している。

②は、豊川の河川特性に由来している。豊川は、流域が急峻な地形かつ細長い流域形状であり、流出率が高い特徴がある。その結果、河況係数が大きく、ピーク流量時の流量を河道内で納めることが出来ない特徴があった。その結果、氾濫が多発したため、霞堤と呼ばれる治水形式が発達してきた。霞堤は、現在の連続堤のように河道内に洪水を封じ込めるのではなく、堤防の一部を開け、社会的損害が少ない箇所へ意図的に氾濫させる治水方式である。

この豊川は、1960年代に大きな変化を遂げた。それは、霞堤の連続堤化・豊川放水路の完成による氾濫の減少である。霞堤の連続堤化・豊川放水路の完成は、劇的に河川周辺の洪水氾濫を減少させ、社会基盤の受ける損害を減少させた半面、氾濫原に住む貴重な生物群集の減少などが確認されている。

2. 2. 2 GIS, 画像解析及び数値計算を用いた過去の河川氾濫再現手法の開発と河川地形再現への特化した空間内挿手法の開発

1) システムの開発方針

本研究の最終目標は、河川事業、特に自然再生事業の現場で活用できるツールを目指している。そのためには、特殊な開発を要し普及化までに大きなコ

ストを要するシステム・アプリケーションよりは、一般の研究・開発分野に浸透している既存のアプリケーションを適宜組み合わせ、一連のシステムとした方が、より開発の目標と合致する。それは、実際河川事業に携わる事業者が通常使用するツール・ソフトウェアを用いて実施できる必要があるためである。

そのため、既存システムの組み合わせを基本方針に河川氾濫再現手法のシステムを構築した。また、既存アプリケーションの利用だけでは解決が難しい河川の物理環境再現に関する課題には、アプリケーションの機能を適宜組み合わせ、アドオンとして利用できるマクロを作成し、システム内に組み込んだ⁷⁾。

なお本研究では、アプリケーションは ESRI 社 ArcGIS Ver. 9.1 (以下、ArcGIS と記述する)、マクロを作成するプログラム言語は同社の ArcObject を使用した。ArcGIS の空間内挿、ポイントデータマージ、空間検索・データ抽出機能をマクロコマンド化した。

2) GIS, 画像解析及び数値計算を用いた過去の河川氾濫再現手法・再現対象の概要

本研究では、図-2.2 に示すアプリケーションを組

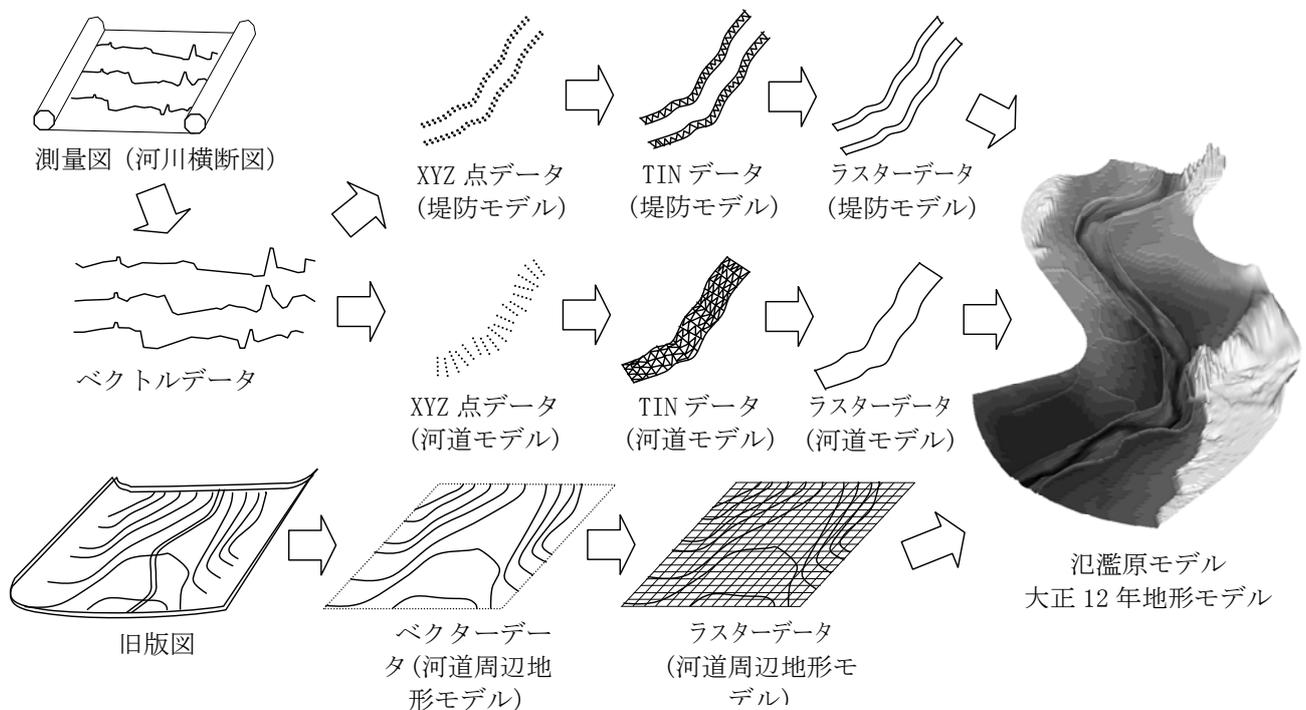


図-2.3 地形作成手順の詳細

み合わせ一連の手法を構築し、一連の作業を通じてその実用性を検証した。以下に、一連の手法の概要を記述する。

まず、サブシステム A で河道周辺の地形作成を行う。対象とする年次に近い国土地理院作成の旧版図から等高線情報をベクター化する。その際には、画像解析ソフト（本研究では、ESRI 社：EARDAS IMAGINE を使用）を用いて、細線化処理を行い、大部分の行程を自動化する。この部分は、IMAGINE の VBA を使用した。

その後、ベクター化したデータを GIS へインポートし、TIN 内挿を行い河道周辺地形を推定した。次に、サブシステム B で河道内地形の作成を行う。過去の河川横断面図をデジタイザを用いてデジタイズし、ベクター化する。その後、現存する河川横断面図を GIS 上にプロットし、内挿計算を行った。河道内地形の再現では、横断面データを単純に TIN 内挿するのではなく河道・高水敷と堤防部に分けて内挿計算を行った。これは、面的ではあるが、複雑な形状を有する河川地形（河道モデル）、線的な取り扱いが適している堤防（堤防モデル）を分けて行う方が、正確な河道内地形モデルの作成が可能であるためである。河道内地形モデルの正確な再現により、大正期の複雑な砂州形状、霞堤による複雑な氾濫状況を再現することが可能になると考えられる。

最後に、河道周辺地形と河道内地形を合成し、氾濫計算用地形データを作成した。その後、氾濫計算用の計算メッシュの格子点を氾濫計算用地形データにオーバーレイし、氾濫計算用の計算メッシュの標高値に氾濫計算用地形標高を置き換えた。格子点における標高値の取得は、ArcGIS9.2 VB マクロにより、格子点を示す pointSHP に、標高値ラスタデータを取得する処理を行なった。河川地形及び河川周辺地形モデルの再現は、大正 12 年と平成 13 年を対象に行った（図-2.3）。

河川地形及び河川周辺地形の復元精度の検証は、河川地形測量結果と河川地形・河川周辺地形モデルを比較することにより行った。比較は、現在の河川横断面の位置で、河川地形測量結果と河川地形・河川周辺地形モデルの比較を行った。なお、大正 12 年における自主防衛堤は、高さなどの定性的な記述しか残らないため検証は行わなかった。

3) 過去の河川氾濫再現計算の概要

調査地の出水時の流況再現の目的で調査地内の水理計算を行った。平水時から出水時までの幅広い流

量を条件として計算を行うことから、一般座標系の使用が可能で、水際部の境界条件の自由度が高く一般座標系を用いた平面 2 次元流解析プログラム⁸⁾を用いて定常計算を行った。上記の条件で算出した水理計算結果を GIS (ESRI 社, ArcGIS Ver. 9) 上にインポートした。

計算ケースは、平均年最大流量（3 年の期間での最大流量）、150 年確率出水、既往最大である昭和 44 年出水の流量時系列を作成し、大正 12 年、平成 13 年の地形モデルの各々の地形モデルを用いて非定常計算を行った。

氾濫状況の再現結果を定性的に検証するため、氾濫解析結果を氾濫初期、氾濫ピーク時、氾濫終了時にわけ、氾濫域を GIS・Google Earth 上に再現した。氾濫状況が実際の氾濫状況と定性的に合致しているかを検証するため、大正 12 年は、解析対象地内に位置する当古地区の民俗資料に記録されている氾濫状況と比較し検証した⁹⁾。平成 13 年は、中部地方整備局豊橋河川事務所が記録する氾濫記録と比較し検証した。

4) 過去の床上痕跡水位による計算結果検証と氾濫規模の考察

本研究で提案する過去の河川氾濫再現手法の氾濫計算の信頼性を検証するため、過去の浸水記録との整合性を検証した。大正 12 年 6 月 22 日に発生し甚大な被害をもたらした大正 12 年 6 月出水を検証用データとして用いた。大正 12 年 6 月出水は、豊川下流域全域に大きな被害をもたらした水害であるが、当時の河川管理技術では、出水に関する詳細なデータを得る方法がなかったため、床上痕跡水位の記録だけに留まっている。

豊川市史にまとめられた「豊川浸水調書」には、字（あざ）ごとに痕跡水位（以下、痕跡水位と記述する）が記録されている¹⁰⁾。このデータを利用し、以下の手順で検証用データを作成した。

まず、大正の旧版図から各字の位置を調べ GIS 上に字（あざ）の位置を示すポイントデータ（以下、痕跡水位ポイントと記述する）を作成した。作成した痕跡水位ポイントに、痕跡水位を属性値として与えた。なお、痕跡水位の計算は 1 尺=30.3 cm、床高 0.5m として計算した。

次に、平均年最大流量、150 年確率出水、昭和 44 年の各計算ケースの氾濫計算結果の内、ピーク流量付近の氾濫計算結果をポイントデータ（以下、氾濫水位ポイント）として GIS にインポートした。ピー

ク流量付近の計算結果を抽出したのは、痕跡水位の記録の場合、出水中最も水位が高かった場所を記録する特性に配慮したためである。その後、痕跡水位ポイントに直近の位置にある氾濫水位ポイントを抽出し、両者の差を比較した。

2. 3 結果

2. 3. 1 河道地形再現結果

横断面 13. 0k 及び 17. 6k における大正 12 年の測量結果と河川地形及び河道周辺地形モデルの比較を図-2. 4 に、図-2. 5 に大正 12 年と平成 13 年の河道周辺地形及び河道内地形モデルの概要を示す。

図-2. 4、図-2. 5 に示すように大正 12 年の河道内地形モデルでは、河道内の複雑な砂州形態を表現できた。また、霞堤の開口部の形状、当古地区周辺に存在した自主防衛堤の緩やかな形状を良好に再現できた可能性が高い。

平成 13 年でも河道周辺及び河道内地形モデルは、良好に地形を再現できた。固定化された低水路部、明瞭に形成された高水敷など河道内地形モデルが良

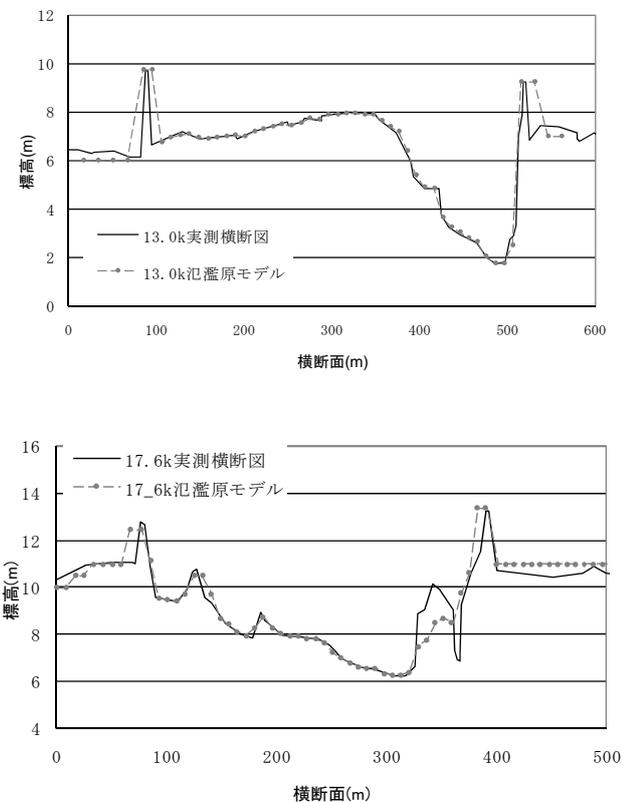


図-2. 4 正 12 年の測量結果と河川地形及び河道周辺地形モデルの比較

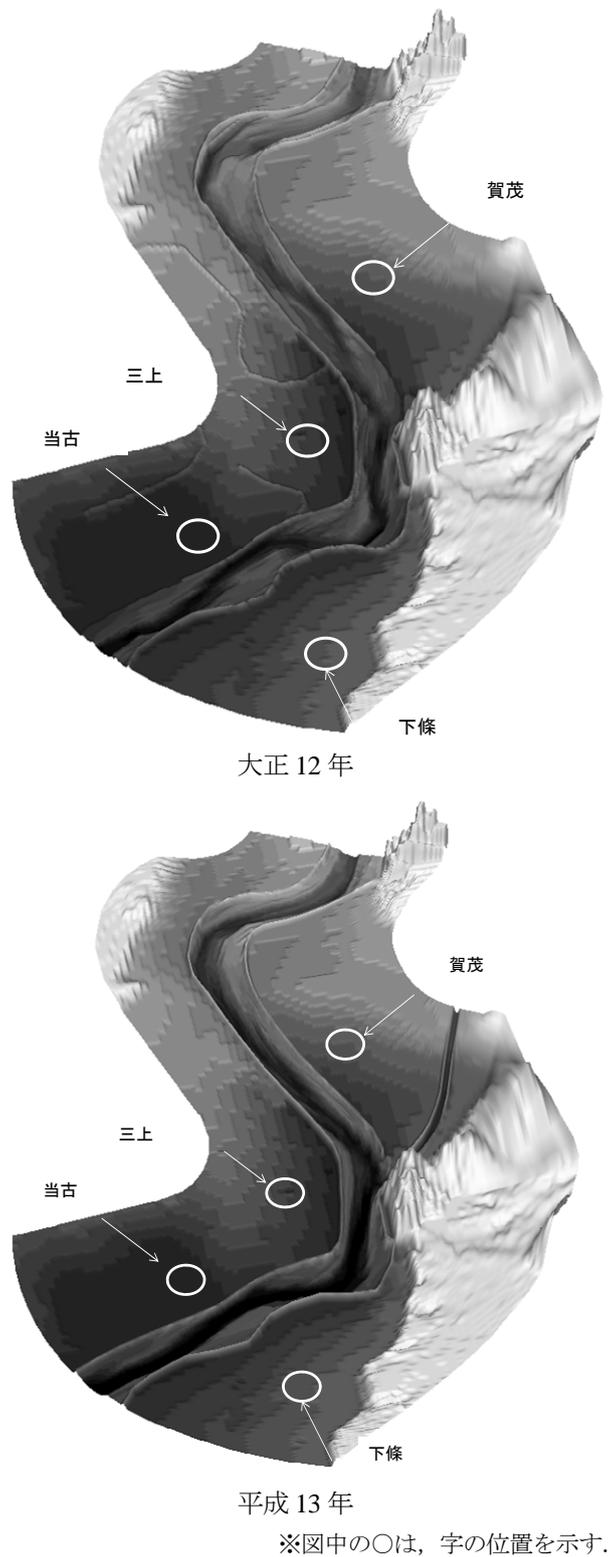


図-2. 5 大正 12 年と平成 13 年の河道周辺地形及び河道内地形モデルの概要
※図中の○は、字の位置を示す。

好に再現できた。また、豊川及び支川（間川）の連続堤部分も良好に再現できた結果となった。

2. 3. 2 氾濫時の流況再現の結果



出水初期

出水中期
大正 12 年

ピーク 流量時



出水初期

出水中期
平成 13 年

ピーク 流量時

図-2.6 氾濫状況再現結果

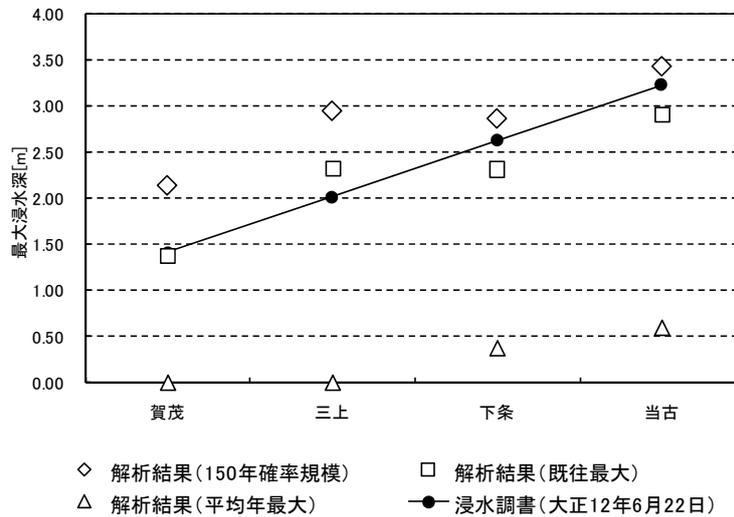


図-2.7 過去の床上痕跡水位による計算結果検証

図-2.6 に大正 12 年と平成 13 年の氾濫状況再現結果を示す。大正 12 年、平成 13 年ともに氾濫状況を詳細に再現していると考えられた。

大正 12 年は、出水初期に解析対象区間の中流部で

ある間川に逆流しながら氾濫していく様子や、出水中期に解析対象区間下流の霞堤から氾濫していく様子、出水後期には解析対象区間の下流部全域で越流氾濫していく様子が再現できた。過去の氾濫状況は

定性的に記録されたものしか現存しないため定量的な比較は難しいが、霞堤を中心に堤内地へ氾濫し、流量の増加とともに北へ氾濫域が拡大する状況は、概ね良好に再現できたと考えられる。

同様に、平成13年は、平成18年に記録された間川への逆流氾濫の状況と類似した結果となった。

2.3.3 過去の床上痕跡水位による計算結果検証と氾濫規模の考察

図-2.7に過去の床上痕跡水位による計算結果検証を示す。150年確率規模出水、既往最大出水、氾濫計算により推定した痕跡水位の比較を示す。痕跡水位は、上流から下流へ向け、線形に上昇する傾向があった。氾濫計算による150年確率規模出水、既往最大出水も同様に上流から下流へ向け、水位が線形に上昇する傾向があった。豊川での既往最大出水の計算結果は、痕跡水位に類似する傾向が強く、約0.3mの誤差でピーク流量時の水位と合致し、良好な再現性を示していた。

2.4 考察

2.4.1 地形再現・流況再現の精度

本研究で提案する手法を用いて、150年確率規模出水、既往最大出水などの河道周辺まで氾濫するような歴史的な大規模出水の水位傾向が概ね再現できていると考えられる(図-2.6, 図-2.7)。計算結果の水位が主要な痕跡水位に解析地域全体で良好に一致していることは、本手法による水位の再現精度は、良好であることを示している。水位の再現精度が良好な場合、流速・流向などの水理量も良好に再現できた可能性が極めて高い。このことは、本研究で提案する手法が過去の河川氾濫状況を再現する手法として高い精度有していることを示している。

本研究では計算は実施していないが、大規模な出水の精度が良好に再現可能であることは、本手法によって小規模な出水も良好に再現出来る可能性を示唆している。今後、これらの小規模な水理計算を実施し、その精度評価も行っていく必要があると考えられる。

2.4.2 河川流量復元手法の必要性

本研究では、GIS・画像解析システムを用いた過去の河道内地形及び河道周辺地形の復元、水理計算による氾濫状況の再現に着目し手法開発を行い、その目的を概ね達成することが出来た(図-2.6)。しかし、過去の氾濫状況をより忠実に再現しようとする場合、過去の流出特性の復元が重要となる。本研究では、豊川は過去から現在に著しい都市化は進んでいない

流域と判断し、過去と現在で河川流出特性が変化していないという前提で、氾濫計算の入力条件として流量時系列データを与えた。しかし、他の河川への本手法を適用する場合や厳密な非定常流を計算対象とする場合には、何らかの形で、過去の流域における流出特性を再現する必要がある。

水文学の分野では、分布型モデルに代表される分布流域情報を考慮したモデルの研究・開発が行われている。これらの研究・技術を活用すると同時に、過去の分布流域情報を再現する技術開発が必要になると考えられる。

2.4.3 本手法の過去の河川生態系の評価への有効性と今後の方向性

過去の物理環境の定量的な再現は、過去の河川生態系評価に大きな可能性をもたらす。河川生態系研究では、物理生息場モデル(Physical Habitat Simulation: PHABSIM, Habitat Evaluation Procedure: HEP等)を用いて、物理環境と生物生息の関係性、その関係性から生息適地がどの程度存在するかを評価する研究・技術開発が進んでいる。

この物理生息場モデルを用いて、生物群集の生息適地を評価することにより、過去の物理環境下で、様々な生物群集の生息適地を推定することが可能になる。同時に、過去と現在の物理環境を比較することで、生物群集の多様性減少、絶滅が危惧される生物種が生じた経緯を検証することが可能になる。このことにより、河川生態系保全・復元のために、土木事業として行うべき必要事項が明確になる。この明確化は、自然再生事業等の河川改修事業にとり重要な情報になると考えられる。

しかし、この実現のためには、物理生息場モデルに代表される物理環境と生物群集の関係性に関する研究や河川生態系をシステムの観点から分析する研究事例の蓄積が必要となる。今後、2.4.2で議論した流出特性に代表される過去の物理環境再現手法の高度化とともに、河川生態系のシステム研究の進展することが必要である。このためには、生態学や関係研究分野との研究連携がより一層必要になると考えられる。

3. 過去の河川氾濫状況の定量的復元と氾濫原が有していた魚類避難場の機能検証

3.1 はじめに

多くの既往研究は氾濫原や一時的水域は多様な生態的機能を有すると指摘している^{11)~16)}。千曲川中

流域における著者らの研究でも同様の結果が確認され、一時的水域の多様な生態的機能（出水時の魚類避難場、魚類産卵場、多様な種が生息出来る空間特性）を確認している^{17)~19)}。これらの結果は、氾濫原や一時的水域の生態的機能の保全・復元は、河川生態系保全にとって重要な事項の一つであることを示し、氾濫原や一時的水域を保全・復元することの重要性を示している。

河川生態系保全・復元を行う場合、事業者は、過去の環境が有していた生態的機能の保全・復元を目標として実施することが多い²⁰⁾。この検討時には、過去の空中写真から河道内の景観（地形、植物群落、水域など）の変遷を把握し、河川環境の変化を推定する方法が用いられることが多い。この方法では、スナップショットの側面が強く、流量変動（出水、渇水）の影響・攪乱を常に受ける河川生態系の特徴である「時間的変動性」、「空間的不均質性」の定量的評価までは不可能であり、これらを行うためには、何らかの方法の開発が必要であった。

過去の資料の分析による歴史的洪水規模の検証や、河川の洪水疎通能力検証、洪水頻度分析などを行う既往研究は^{21)~23)}、この問題の解決に水工学の技術が適当であることを示している。著者らは、既往研究の取り組みから、上記問題に水工学を適用する可能性を見出した。さらに、過去の河川生態系の情報復元を最終目的とし、その初期段階として河川生態系を構成する物理環境の再現（復元）に焦点をあて、その方法論の開発に概ね成功した²⁴⁾。その手法は、近年取り組まれることが多くなった GIS（Geographical Information System）を用いて、過去の環境情報を復元する手法の発展形である²⁵⁾。これは、過去の河川測量・地図資料を情報源として、地

理情報システムを用いて地形復元を行い、復元した地形を元に水理計算を行い過去の河川流況（平水から出水まで）を定量的に再現するものである。

過去の河川測量資料が良好に保存されている河川では、古くは 1890 年代の河川測量図が現存する²⁶⁾。明治（1860 年代）以降の地図は、近代測量技術が適用され、現代の測量技術と同一の精度管理がされた図面である場合が多い。これらの地図を電子化し、適切な補正を行えば、水理計算を適用することが可能であり、過去の流況再現が可能になる。

この方法は更なる発展が考えられる。復元した過去流況に物理生息場モデルを適用することにより、過去での河川の物理環境が有していた生態的機能の変遷を推定するという発展である²⁷⁾。

このような背景から、本研究では、過去の氾濫原が有していた魚類避難場の提供機能を現代と比較し、過去と現在との差異を抽出することを通じ、現在の河川の中で実現可能な魚類避難場提供の方法を考察することを目的とする。

3. 2 研究の方法

3. 2. 1 調査地の概要

本研究は、豊川水系豊川で行った。豊川流域に関しては、古くは 1923 年（大正 12 年）からの河道内地形測量成果（以下、過去河道内地形と記述する）が現存している。過去河道内地形は、相対標高で測量が行われているが、現在とほぼ同一の測量断面で測量が行われ、基準点などは現在と同様の箇所に設置されているため、現在との横断面比較が容易である。同様に旧版図が 1913 年（大正 2 年）から測量されている。そのため、過去から現在にかけての河道内地形・河道周辺地形の時系列変化の把握が比較的容易で、本研究の調査地に適した河川である。な

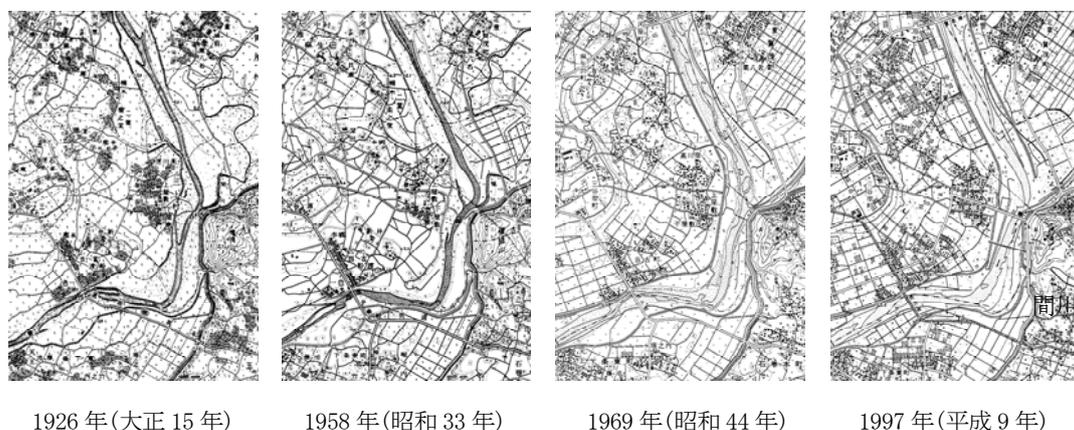


図-3.1 調査地の変遷（旧版図、地形図の比較）

お、図-3.1には、河道内地形測量時期とは異なるが、時期が近い地形図を示す。

3. 2. 2 過去の地形復元の方法と地形変化の概括

本研究では、過去の河道内地形及び旧版図を基に、GIS を応用した過去の地形情報復元方法を用いて、1923年（大正12年）、1953年（昭和28年）、1966年（昭和41年）、2001年（平成13年）を対象として、地形復元を行った。以下にその概要を示す。

まず、堤内地の地形復元を行った。対象とする年次に近い旧版図から等高線情報をデジタル化した。デジタル化した等高線データをGISへインポートし、TIN内挿(Triangulated Irregular Network: 不整三角形網)を行った。堤内地に散在した土塁、石垣などの小規模な堤防は、地形図から判読すると同時に、調査地に関する歴史・民俗資料から、その位置・高さの情報を整理し、GIS上に再現した²⁸⁾²⁹⁾。

次に、過去の河道内地形の作成を行った。デジタル化した横断面図をGISへインポートし、前述の方法と同様に内挿計算を行った。但し、河道内地形の再現では、横断面データを単純にTIN内挿するのではなく、横断面データを河道、高水敷、堤防のデータに分けて、その特徴に合わせ内挿計算を行った。最後に、堤内地と河道内地形を合成し、氾濫計算用地形データを作成した。

その後、GIS上で、氾濫計算用の計算メッシュを氾濫計算用地形データにオーバーレイし、計算メッシュに氾濫計算用地形データの標高値を格納した。過去からの堤内地及び過去の河道内地形の変遷を把握することを目的として、復元した氾濫計算用地形データを可視化し、河道内地形の変化を把握した。可視化は、KCT社、MicroAVS Ver8.3を用いて行った。

3. 2. 3 氾濫計算の方法

調査地の出水時の流況再現を目的として、調査地内の水理計算を行った³⁰⁾。

平面流計算の粗度設定は、水理公式集に基づき堤内地（主に畑地） $n=0.025$ 、集落 $n=0.04$ 、河川高水敷 $n=0.04$ 、河道内 $n=0.032$ とした。河道内には、植物群落の繁茂などにより局部的に粗度が大きくなる地点があるが、検討の結果、上記の粗度で再現性が担保されたため上記の値を採用した。計算メッシュは、概ね $20 \times 20m$ メッシュとした。計算ケースは、河川改修による地形変化が流況に与えた影響が把握しやすい平均年最大流量（平均流量 $945m^3/s$ 、最大流量 $1800m^3/s$ 、継続時間14時間）を対象とした。平均年最大流量は、1995年から2005年の流量時系列から作成した。

なお、著者らの先行研究において、3. 2. 2、3. 2. 3に記述する手順で行った氾濫計算結果の信頼性は、過去の浸水記録水位と整合していたことが確認されている²⁴⁾²⁸⁾²⁹⁾。

3. 2. 4 魚類避難場の推定方法

過去から現在までの氾濫状況の変化が、魚類の生存・避難行動に与える影響を以下の方法で評価した。出水中、魚類が流失を避けるのに最も適した場所は、流速が魚類の遊泳能力より十分遅い状態が継続する場所である。しかし、調査地の出水特性（流量規模、流速変化、出水継続時間等）から考えると、前述のような場所は面積として小さい上に、障害物の裏側など水際を中心に局所的に分布していると考えられるため、広範囲を対象に、このような場所を水理計算で求めるのは困難である。ところで調査地での出水中、魚類は流速変化に機敏に対応し、このような場所を探して、その遊泳能力の最大値（以下、最大遊泳能力と記述する。）よりも流速が遅い空間へ適宜

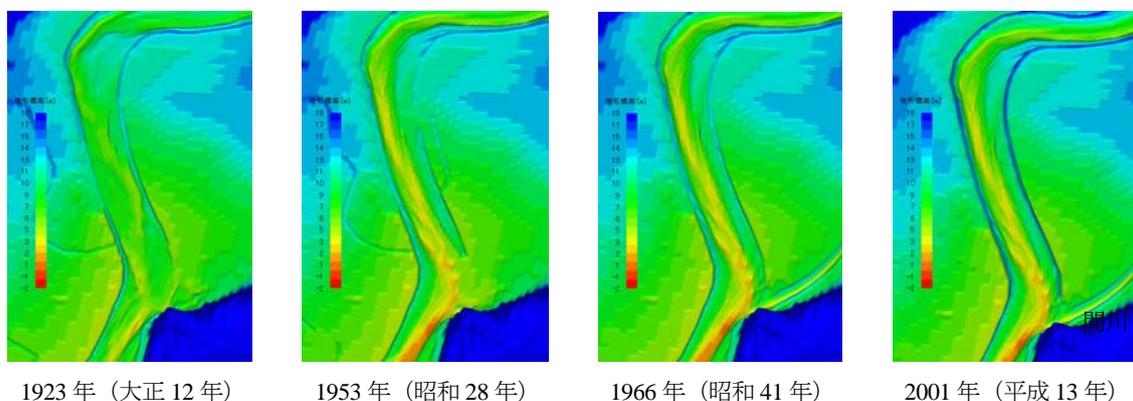


図-3.2 1923年から2001年までの河川地形変遷

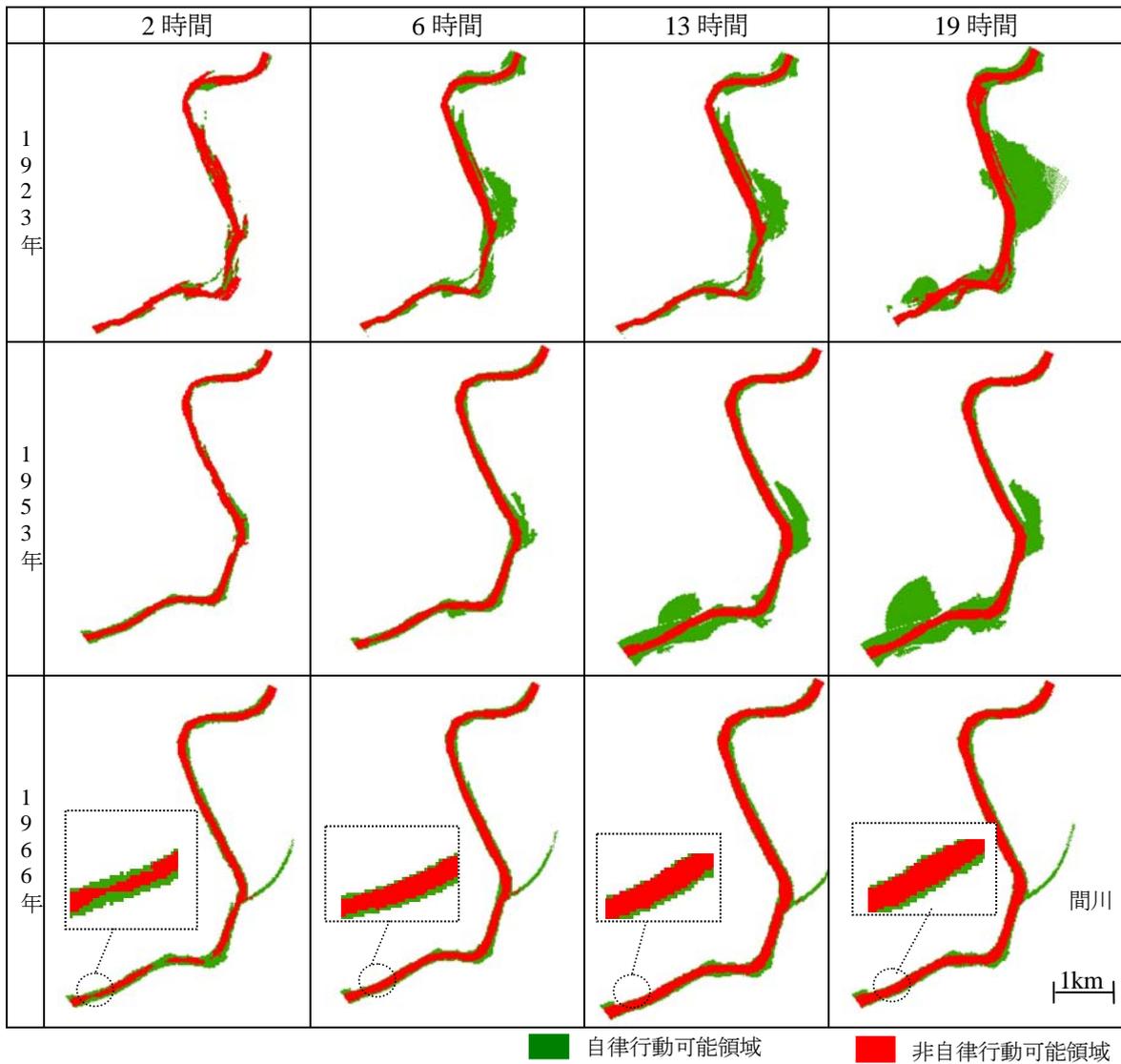
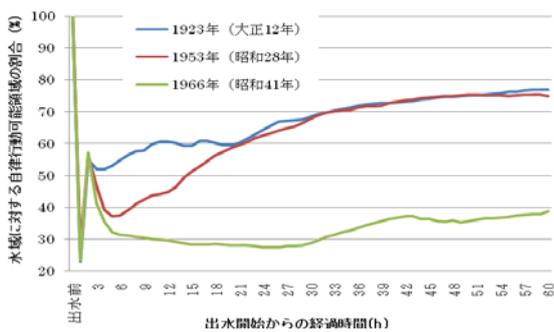


図-3.3 1923, 1953, 1966年の調査地で氾濫状況比較



※1923～1966年の出水前は同一値

図-3.4 水域に占める自律行動可能領域の時系列変化

移動・選択しながら避難行動をとると考えられる。そして、最終的に遊泳速度以下の流速の場所に避難すると考えられる。そのため、本研究では、魚類避難場として、「魚類の最大遊泳能力以下の空間」を対応させることとする。一般的に、魚類の遊泳能力は、

長時間遊泳できる遊泳速度と短時間だけ遊泳できる突進速度に分類される。遊泳速度は体長の約 2～3 倍、突進速度は体長の約 10 倍とされている³³⁾。前述した様な調査地での魚類避難行動に関する推定から考えれば、魚類の最大遊泳能力は突進速度がより適当と考えられる。また、著者らが実施した研究でも上述の推定が裏付けられた¹⁷⁾。そのため、本研究では、流速が突進速度以下の空間を自律行動可能領域として定義し魚類避難場の指標とする。魚類の突進速度は、式(1)で定義される³¹⁾。

$$BS=10*BL \quad \text{式(1)}$$

ここに、BS：突進速度 (m/s)、BL：体長 (m)

突進速度を求めため、調査地の周辺に生息する魚類群集の平均体長を算出した。魚類の行動特性を考慮すれば、魚種、成長段階ごとに平均体長を求め

る必要があるが、本研究は、過去の氾濫原が有していた魚類避難場の提供機能を現在と比較し、過去と現在との差異を抽出するのを目的としているため、便宜上、魚類群集全体の平均体長を用いた。

以下、平均体長を求めるにあたっては、過去の魚類調査記録が少ないため、過去から現在にかけて調査地周辺の魚類群集構成・平均体長などが著しい変化がないと仮定し分析を行った。

まず、平均体長のデータは、平成6年度、10年度、河川水辺の国勢調査魚介類（以下、水国と記述する）から調査地周辺における魚類調査結果を抽出した。水国の調査結果は、予め設定された体長区分毎の魚種個体数のみの記録であるため、以下の手順で魚類群集の平均体長を推定した。まず、予め定義された体長区分の中央値を算出した。各個体の体長は、該当する体長区分の中央値であると仮定し、各魚種の各体長区分の平均体長を算出した。なお、ブラックバス、ブルーギルの存在が確認されているが、過去には、その存在が確認されていないため、平均体長の算出には用いなかった。

3. 2. 5 出水時の自律行動可能領域面積の時系列変化と自律行動可能領域へのアクセス性評価

3. 2. 3 において計算した4時期の氾濫計算結果全ケースをGIS上へ取り込んだ。GISの機能を用いて氾濫計算結果を20m×20mグリッドに平均化した。グリッドサイズは、計算メッシュの最小値を考慮し決定した。平均化したグリッドデータを3. 2. 4で算出した平均体長を閾値として自律行動可能領域と非自律行動可能領域に分類した。その後、自律行動可能領域と非自律行動可能領域のグリッド数を数え、400 m²を乗じ面積を算出した。

これらのデータを時系列として整理し、自律行動可能領域が氾濫水域全体に占める割合の時系列変化を算出した。

3. 3 結果

3. 3. 1 過去の地形復元の方法と地形変化の概括

図-3.2に1923年から2001年までの河川地形変遷を示す。河道内地形は、顕著な変化をしていた。1923年の河道内地形は、多様な河道内地形をとるのに対し、1953年以降は、単調な河道内地形へ変化していた。また、1953年以降、高水敷が発達し始め、1966年には低水路と高水敷の間に明瞭な境界、比高が生じた。低水路には、明瞭な交互砂州が形成された。

3. 3. 2 調査地周辺に生息する魚類群集の平均体長

と突進速度の算出

調査地で生息が確認された魚種は、主にゴクラクハゼ (*Rhinnogobius giurinus*)、ウキゴリ (*Chaenogobius urotaenia*)、ゲンゴロウブナ (*Carassius Cuvieri*)、ヌマチチブ (*Tridentiger (kuroiwae) brevispinis*)、ギンブナ (*Carassius gibelio langsdorfi*) の採捕が記録されていた。採捕された魚類群集の平均体長は、約10.5cmであった。これにより、調査地周辺の魚類群集の突進速度は、(1)式より約1.05m/sであると推定された。

3. 3. 3 自律行動可能領域の空間分布の比較

図-3.3に顕著な差異があった1923、1953、1966年の自律行動可能領域の空間分布を示す。

1923年の河川地形では、水位上昇開始2時間後、低水路の周辺の微高地及び2次流路に自律行動可能領域が出現した。6時間、13時間後ともに、霞堤周辺の堤内地に氾濫域が出現し、その大部分が自律行動可能領域であった。19時間後には、霞堤や間川周辺の氾濫域の面積が拡大し、その大半は自律行動可能領域であった。

1953年の河川地形では、霞堤の連続堤化・高水敷の発達が進み、水位上昇開始2時間後以降に氾濫域が減少した。しかし13時間後は、高水敷や連続堤化がされていない間川周辺に氾濫域が形成され、その大部分が自律行動可能領域であった。

1966年の河川地形では、水位上昇2時間後、堤内地の高水敷上に氾濫域が出現した。しかし、6時間後には堤内地の低水路周辺・高水敷上の氾濫水域の流速が増加し、自律行動可能領域は著しく減少した。13時間後は、高水敷上の堤防周辺、間川周辺に氾濫水域が形成され、その大部分は自律行動可能領域であった。

3. 3. 4 自律行動可能領域の面積の時系列変化の比較

図-3.4に水域に対する自律行動可能領域の割合の時系列変化を示す。各年代ともに出水前は、自律行動可能領域が95~100%であった。出水初期（出水開始後1~2時間後）に自律行動可能領域が低水路の流速増加に伴い一時的に20%まで急激に低下し、その後、高水敷上に自律行動可能領域が形成され60%まで割合が増加した。更に、出水初期以降、氾濫水域に占める自律行動可能領域の割合は1923年、1953年、1966年で異なる時系列変化を示した。

1923年の自律行動可能領域割合は、出水開始後2時間以降も約50%以上を保ち、安定して50%以上の自

律行動可能領域割合であった。1953年の自律行動可能領域は、水位上昇開始7時間後まで減少し、その割合は約35%であった。その後、急激に増加し19時間後、約60%になり1923年と同程度の存在可能割合になった。1966年の自律行動可能領域割合は、出水開始後、約6時間経過すると著しく減少し、30%前後で推移した。38時間後、自律行動可能領域割合は約35%に増加した。

3. 4 考察

3. 4. 1 過去から現在への氾濫原が有する魚類避難場提供機能の変化

魚類避難場の機能は、1923年から1966年にかけて大きく減少していた(図-3.3, 図-3.4)。特に興味深いのは、出水開始後2時間は、各年代ともに同様の傾向を示すが、出水開始後2時間以降は、各年で大きく傾向が異なる点である。この要因は、河川周辺及び堤内地に出現する氾濫域面積の違いによるところが大きい。1923年では、河道周辺及び堤内地に広大な面積の氾濫域が出現し、その大部分は自律行動可能領域として機能していた。しかし、1953年以降、主に連続堤化による堤内地への氾濫の減少が、この機能低下を招いたと考えられる。図-3に示すように、1923年では広大な面積の氾濫原が出現しているのに対し、1966年では間川周辺にしか氾濫域が出現していない。この氾濫域面積の差が魚類避難場の面積比率の変化につながったと考えられる。

3. 4. 2 過去と現在の魚類避難場機能の差異

過去と現在の魚類避難場の機能を比較すると、避難場として選択できる空間の多様性(以下、避難場の多様性と記述する)、避難場が出水終了まで存続する可能性(以下、避難場の存続性と記述する)の2点が大きく異なると考えられる。

避難場の多様性は、過去と現在で大きく異なる。1923年では、出水初期、高水敷及び堤内地にパッチ状の自律行動可能領域が多数点在する(図-3.3)。出水が継続した場合には、パッチ状の自律行動可能領域を中心に広大な自律行動可能領域が更に拡大し、その内部には、多様な流速場が形成されたと地形状況から推定される(図-3.2)。また、自律行動可能領域内部には、様々な流速場が形成され、調査地周辺に生息した魚類の巡航速度程度の空間も多かったと考えられる。自律行動可能領域に到達した魚類は、その遊泳能力に合致した空間を適宜選択し、退避行動をとり流失を回避したと考えられる。一方、1966年では、出水初期に到達した自律行動可能領域の面

積は小さく、流速場の多様性は少ない。更に、出水継続時、その周辺には広大な氾濫域が形成されることはない。これは、出水初期に自律行動可能領域内に到達出来たととしても、その後、1923年のような選択の多様性が低いことを示す。避難場の存続に関しては、1966年の結果が典型的な例を示している。すなわち、出水初期には、自律行動可能領域として機能しているが出水継続とともに自律行動可能領域が少なくなることを示している。この箇所を選択した魚類は、出水継続とともに流失を余儀なくされる可能性が高くなると考えられる(図-3.3 拡大部)。

3. 4. 3 過去から現在にかけての魚類避難場機能の低下の復元措置の検討

河川生態系への配慮は河川事業に必要な観点ではあるが、魚類避難場復元のために人間活動の基盤となる河川周辺部の氾濫を許容する河川管理は不可能に近い。本項では、現在の河川管理の中で出来る魚類避難場の機能保全の方法を考察する。

一つの方法は、治水上許容できる範囲であれば、霞堤、支川とのネットワークの保全を行うことである。霞堤周辺及び支川に形成される自律行動可能領域、その内部の多様な流速場は、過去から現在への避難場機能の低下を復元する可能性が高く、エコロジカルネットワークが一つの復元方法になると考えられる。

二つ目の方法は、避難場の存続性の向上、すなわち出水継続時間中、自律行動可能領域として継続的に機能する空間を保全・創出することである。例えば、治水上許容できる範囲で樹林帯などを保全し、低流速域の空間を保全するなどが方法として考えられる。

3. 5 まとめ

1923年から1966年の4時期の過去の河川地形の再現、氾濫計算を行った。再現した流況を魚類の突進速度を指標として自律行動可能領域と非自律行動可能領域の魚類避難場に分類し、過去と現在の魚類避難場の機能変化を整理した。その結果、自律行動可能領域は、1923年から1967年にかけて大きく減少し、その原因は、主に連続堤化による堤内地への氾濫減少であると考えられた。機能低下の復元方法としては、本川と支川のネットワークの復元などの方法が示唆された。

4. 環境整備目標設定のための過去・現在の水域生息空間ネットワークの比較

4. 1はじめに

河川や周辺水域（河川、用水路、水田等）が形成する水域ネットワーク（以下、NW とする）は、生息域の多様化に寄与すると共に、魚類の避難場や産卵場の提供を行い河川生態系にとって重要な役割を果たす³³⁾。既往研究では、NW の劣化が水生生物の生息に与える影響が指摘されている。例えば、我が国における特徴的な事例として、圃場整備事業による用水路の構造変化（コンクリート化）、河川と水田との接続部の分断化、水田の乾田化・大型化、営農形態の変化に伴う用水利用の変化等による生息域の劣化が指摘されている³⁴⁾。これらの研究成果は、現在においてNW 構造が異なる場所の生物群集を比較するケーススタディではあるが、NW 保全の方向性を明瞭に示し、NW 保全事業などの取り組みに具体的方策を示している。

自然再生事業に代表される河川生態系の保全・復元を目的とした事業の場合、過去の河川生態系を目標とする事例が多い³⁵⁾。これらの取り組みで河川生態系像を推定する場合、文献、絵図、旧版地図及び過去の空中写真などから過去の景観を推定、現在と比較し、過去の河川生態系像を定性的に推定することが多い。この方法でも河川生態系の目標像を設定することは出来るが、定量性という観点からその差異を詳細に比較することは難しく、新たな技術開発が必要であった。筆者らは、これらの問題に対処するため、水工学（主に水理計算）、地理情報システム（GIS : Geographical Information System）を用いて、明治・大正期の河川地形、氾濫時の流況等を詳細に再現し、過去からの物理環境変化が生物群集の生息に与える影響を評価する手法の開発に成功し³⁶⁾、魚類避難場の機能変化の評価を行った³⁷⁾。

筆者らが開発・実施した手法を用いれば、NW 保全においても、過去と現在のNW 比較、その機能変化を定量的に評価することが可能になり、NW 保全・復元事業に新たな方向性や実施項目の重点化を行うことが可能になると考えられる。

このような背景から、本研究では以下の研究内容を実施する。過去（主に明治期）の地籍図、旧版地図、民俗学資料を対象に、水工学、GIS 等を用いて明治期のNW の物理環境を定量的に再現し現在のNW と比較、その差異を抽出する。その後、生活史の中でNW に依存して生活する魚類行動を指標とし、過去と現在のNW 差異が、魚類生息に与えた影響を

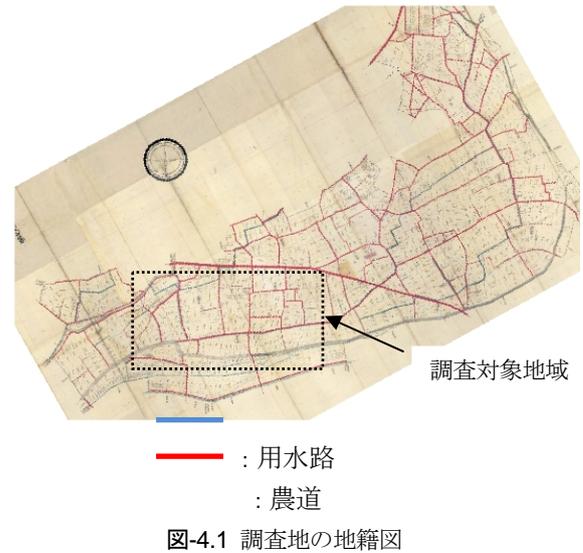


図-4.1 調査地の地籍図

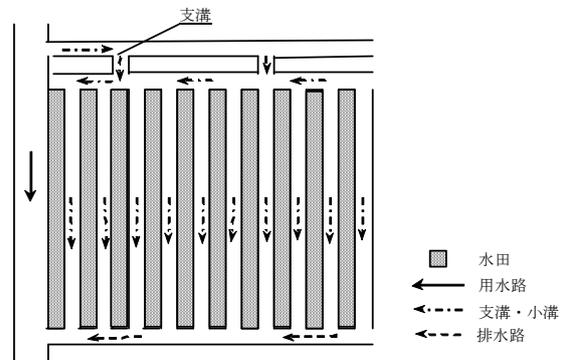


図-4.2 緩傾斜地での水田・小溝・排水路設置方法⁸⁾

考察する。この考察を通し、現在の河川管理の中で実現可能な項目を抽出し、今後のNW 保全事業の方向性を議論することを目的とする。

4. 2 研究の方法

4. 2. 1 調査地の概要

本研究は、豊川水系豊川で行った。豊川流域が属する東三河地方は、その地域特性から、農業用水が不足していた地域である。このため、豊川用水、松原・賀茂・牟呂用水に代表される用水開発、農業基盤整備事業が実施されてきており、これらの改変に伴った過去と現在のNW の変化を比較するのに適切な流域であるといえる³⁸⁾。

本研究では、豊川の中でも豊川下流域の支川である古川周辺（以下、調査地と記述する）に着目した。調査地周辺には、1567年（永禄10年）に開削された豊川最古の利水施設である松原用水の受益地（水田地域）が広がり、典型的な過去のNW が存在した

と考えられる。調査地では、1951年（昭和26年）に県営牟呂・松原用水事業をかわきりに1967年（昭和42年）まで、頭首工整備、水路改修などが行われ、近代的な用排水路網・圃場形態に変化した地域である³⁴⁾。

4. 2. 2 本研究で使用する水路名称の整理

本研究では、農業土木用語・本研究で便宜上定義した用語を多用する。河川・水工学では馴染みのない用語が多いため、本研究で用いる農業土木用語を整理する。

水路：水田灌漑のために水田まで引水する用水路と水田を通過した後の水を下流へ流す排水路で構成される。

用水路：水田灌漑のために水を引く水路。

支溝・小溝：用水路から引水した用水を各水田へ配水する水路。

排水路：水田灌漑後の水を下流へ流す水路。

4. 2. 3 過去・現在の水路網の再現

現在と過去のNWの再現は、河川・水路網・水田で構成されるNWの地形情報を再現することから着手した。

現在のNW状況は、豊川市土地改良区より入手した平成3年豊川市道路現況図（以下、現況図と記述する）を用いて水路網を抽出した。現況図には、調査地内の標高点、水田・畑・住宅などの土地利用、道路、用水・排水路の情報が詳細に記録されている。特筆すべきは、排水路の断面積、深さ、排水の系統・流下方向等が詳細記録されている点である。この現況図をGIS（ESRI社ArcGIS9.2）へ取り込み、水田境界、排水路網、河川のGISデータを作成した。作成したGISデータを元に、現地調査を行い、その信頼性を検証すると同時に図面では把握できない構造物、用水供給形態、排水路と水田の接続構造などを補足調査した。

過去のNW状況は、1884年（明治17年）の地籍図を用いて地形情報を再現した（図-4.1）。

地籍図は、対象地区の一筆（区画）を正確に測量し図化したもので、1884年の水田・畑地区画・所有者、用水路及び農道などが詳細に記録されている。この地籍図をGISへ取り込み、地籍図に記録される現在の地形図でも確認される地物（寺社・農道網を参考に、現在の測量座標系に対応させた。その後、個々の水田境界、用水路、河川をトレースした。次に、1912年（大正元年）の旧版地図をGISへインポート

し、旧版地図内の標高情報を内挿計算することにより、調査地周辺の地形データを再現した。その後、地籍図、旧版地図及び地形データをオーバーレイし、用水路網の系統を整理し、用水路間の上下流関係を把握した。

次に、明治期の農業土木書（以下、農業土木書と記述する）を参考に、用水から水田への水供給・水田からの排水形態を推定した⁴⁰⁾。調査地の地形データから、調査地は、図-4.3に示される農業土木書に記される緩傾斜地の水田・小溝・排水路の設置方法（以下、緩傾斜地形式と記述する）が適用されていると考えられた。緩傾斜地形式では、小溝5本ごとに用水路から支溝を掘り水田の畦沿いに掘られた小溝に接続させ、低標高地へ向かい排水路を掘ることが推奨され、調査地でも同様の方式の適用が推定された。これらの情報をもとにGISデータから水田の配置及び調査地の地形を考慮し、用水路から支溝、小溝及び排水路の位置を推定し図化した。

4. 2. 4 過去・現在におけるNWの水理特性の再現

現在と過去のNWの水理特性は、等流計算を用いて把握した。計算ケースは、表-4.1に示す3ケースとした。

1) 現在の水路網の流況計算

断面形状は現況図に示される規格を参考に決定した。粗度はコンクリート水路の平均粗度 $n=0.014$ を主に用いた。排水路勾配は現況図の標高値を判読した。計算は、排水路の再下流から等流計算をスタートし、上流側の複数排水路の断面積に応じ流量分配率を決定し等流計算を繰り返す方法で計算した。最終的に排水路網で流量の不整合が生じないように流量を調整し、3ケースでの流速、水深を推定した。

2) 現在の水路網の流況計算

過去の水路網の流況計算も農業土木書を参考に実施した。過去のGISデータから用水路幅を計測し、断面形状を推定した。農業土木書に記される、用水路幅に応じた標準的な用水路深さ、地質特性に応じた法勾配を参考に、用水路の底幅3mに対し深さは1, 2割の法勾配と断面形状を仮定した。同様に、農業土木書には、用水路の断面流速、勾配の推奨値が示されている。一般に、用水路は沈殿物や植物繁茂による用水供給能力の低下を防ぐため、流速は2尺（0.61m/s）が推奨され、水路勾配 $I=0.005\sim 0.006$ が推奨されている。

これらの情報を利用し、調査地の地形を考慮しながら等流計算を行い、各用水路の流速が約2尺になるように断面形状、勾配を調整した。調整はケース1で条件を満たすように調整した。

過去の用水路網は、地形を大規模に改変せず自然地形を利用し用水路が建設されるのが一般的だが、急勾配部を用水路が通過する場合もある。この場合、落差工が設置されたと考えられる。調査地内の急勾配部では、以下の手順で落差工高の位置・高さの推定を行った。急勾配部を通過する用水路数（以下、急勾配部用水路数と記述する）及び急勾配部を通過した後の標高変化を地形データから計測した（以下、自然標高変化と記述する）。前述の方法で断面形状、用水路勾配を仮定し、ケース1での流速が著しく高くなならないように断面形状・用水路勾配を調整し断面形状・用水路勾配を求めた。求めた用水路勾配と用水路延長から用水路通過後に下がる標高変化の総和を求めた（以下、用水路標高変化と記述する）。その後、自然標高変化と用水路標高変化の差を求め、求めた差を用水路数で除し、各用水路下流の落差工の高さとした。

4. 2. 5 NW 構造のモデル化方法

NW 構造のモデル化には、様々なモデルが考えられるが、本研究では生息空間と経路の関係を単純に表現できるグラフを用いる^{41) 42)}。グラフとは、情報工学で用いられるネットワーク分析手法の一つで、いくつかの点 (node) とそれらの間につながるいくつかの枝 (branch) に NW 構造をモデル化する。本研究では、用水路・水田を生息空間として捉え点 (node) で表現し、落差工や水路間の接続構造を枝 (branch) としてモデル化する。

4. 2. 6 NW を利用する魚類行動からの NW 評価

NW を利用し水田へ移動・産卵するナマズ (*Silurus asotus*) の行動を指標に、過去と現在の NW の構造を評価した。ナマズは、水田への灌漑時期に河川や水路から水田に近い水路へ移動・生息し、増水のタイミングを待ち水田へ移動・産卵するとされている⁴³⁾。このため、評価項目としては、①河川や用水路

表-4.1 水理計算ケースの概要

Case	水位条件	選定根拠	想定される状況
1	設計流量 (最大通水流量の70%)	水路で生じる最大流速	出水時
2	設計流量時水位の40%	平水時の流況	初期灌漑終了時の水位
3	設計流量時水位の10%	渇水時の流況	営農のための減水期

下流部から最寄りの水田へのアクセス際の障害物の有無、②河川や用水路下流部から水田へのアクセス経路の数(冗長性)、③ナマズの生息空間として水路流況を評価の対象とした。水路の生息空間としての評価は、流速・水深をもとに評価し、ナマズが生息するのに困難な流速かどうか、捕食者に発見されにくい水深かどうかで評価した。

4. 3 結果

4. 3. 1 現在と過去のNW復元結果の比較

図-4.4 に現在と過去の NW の GIS データを示す。現在は、開渠は排水路だけであるのに対し、過去は用水路・排水路・支溝・小溝の開渠があったと推定された。用水路・排水路・支溝・小溝は、用水路から分岐し排水路を経由して用水路に戻る形状と推定された。現在は、排水路が合流を繰り返し集約されるのに対し、過去の水路は複数の水路が並行して流下する形態であった。現在の水田は大型で個数が少ないのに対し、過去の水田は、小型で個数が多かった。

表-4.2 に現在と過去の水田の面積、個数の比較を示す。現在の水田の平均面積は過去の約7倍、個数は、約5分の1であった。

4. 3. 2 現在と過去のNWの水理特性比較

表-4.3 に各計算ケースの現在と過去の水路内の流速・水深を示す。現在は、NWの一部で水深が著しく低くなる排水路が点在したのに対し、過去では現在と比較して各水路で同程度の水深であった。

表-4.2 現在と過去の水田の面積・個数比較

	1926	2008
面積	234.80	1451.10
標準偏差	157.64	757.92
個数	172	30

表-4.3 現在と過去の水路内の流速・水深比較

	Case 1		Case 2		Case 3		Case 1		Case 2		Case 3		
	流速	水深											
Y-1	0.96	0.71	0.58	0.28	0.27	0.07	S1-1	1.26	0.49	0.94	0.2	0.47	0.05
Y-2	0.96	0.71	0.58	0.28	0.27	0.07	S1-1-1	1.34	0.16	1.00	0.07	0.77	0.04
Y-3	0.96	0.71	0.58	0.28	0.27	0.07	S1-2	1.21	0.43	0.90	0.18	0.47	0.05
Y-4	0.91	0.65	0.55	0.26	0.26	0.06	S1-3	0.42	0.17	0.27	0.08	0.11	0.02
Y-5	0.91	0.65	0.55	0.26	0.26	0.06	S1-3-1	0.39	0.07	0.21	0.02	0.21	0.02
Y-6	1.28	0.65	0.77	0.26	0.36	0.06	S1-4	0.40	0.16	0.27	0.08	0.11	0.02
Y-7	1.15	0.53	0.70	0.21	0.33	0.05	S1-4-1	0.36	0.19	0.24	0.08	0.14	0.03
Y-8	1.15	0.53	0.70	0.21	0.33	0.05	S1-5	0.39	0.17	0.26	0.08	0.11	0.02
Y-9	0.81	0.53	0.49	0.21	0.23	0.05	S1-5-1	0.30	0.14	0.22	0.07	0.11	0.02
Y-10	0.72	0.44	0.44	0.18	0.20	0.04	S1-6	0.36	0.14	0.24	0.07	0.11	0.02
Y-11	0.72	0.44	0.44	0.18	0.20	0.04	S1-6-1	1.41	0.49	1.05	0.2	0.53	0.05
Y-12	0.72	0.44	0.44	0.18	0.20	0.04	S1-7	0.43	0.44	0.28	0.2	0.14	0.06
Y-13	0.72	0.44	0.44	0.18	0.20	0.04	S1-8	0.42	0.41	0.28	0.19	0.12	0.05
Y-14	0.72	0.44	0.44	0.18	0.20	0.04	S1-7-1	0.24	0.38	0.18	0.15	0.09	0.04
Y-15	0.72	0.44	0.44	0.18	0.20	0.04	S1-7-2	0.20	0.22	0.14	0.09	0.08	0.03
平均	0.89	0.55	0.54	0.22	0.25	0.05	S1-7-3	0.20	0.22	0.14	0.09	0.08	0.03
標準偏差	0.19	0.11	0.11	0.04	0.05	0.01	S1-8-1	0.41	0.39	0.27	0.18	0.12	0.05
							S1-9	0.23	0.35	0.17	0.14	0.09	0.04
							S3-1	0.77	0.14	0.51	0.07	0.23	0.02
							平均	0.57	0.27	0.40	0.12	0.22	0.03
							標準偏差	0.30	0.13	0.23	0.06	0.11	0.01

流速: m/s
水深: m

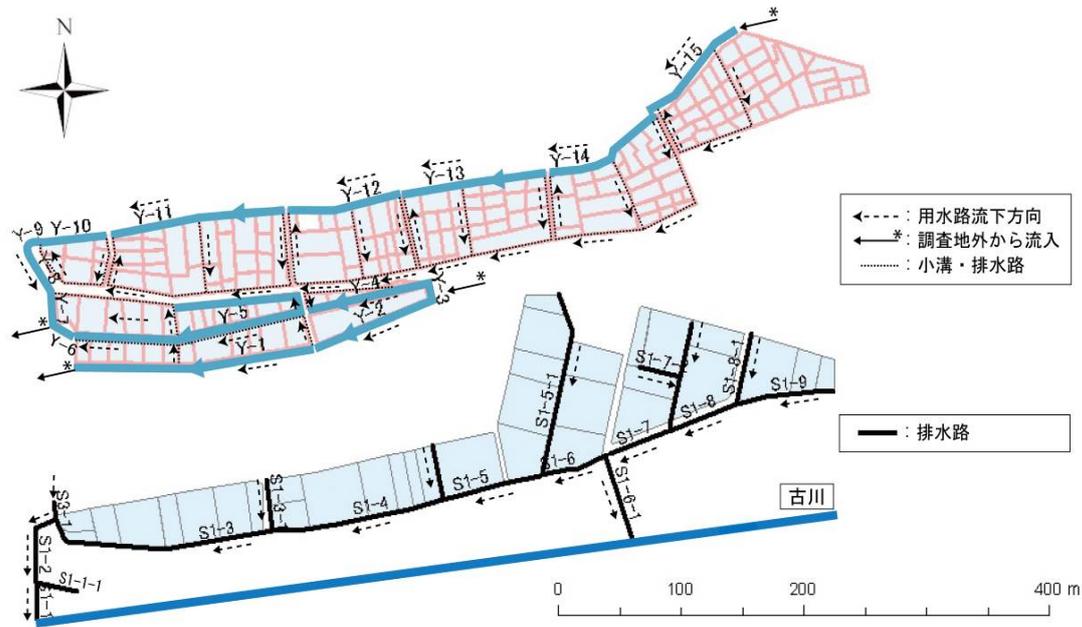


図-4.3 現在と過去のNWのGISデータ

4. 3. 3 過去と現在における水路網のNW構造の比較

図-4.5 に現在と過去のグラフで単純化したNW構造図を示す。現在のNWは排水路の合流を繰り返す分岐が多数であるのに対し、過去のNWは用水路が直列に接続する分岐の少ないNW形状であった。

落差工に関しては、現在はNW全体に散在しているのに対し、過去は、NWが急勾配部を通過する箇所集中していると推定された。

水路と水田の接続に関しては、現在は排水路と個々の水田が直接接続するのに対し、過去は、用水路と支溝・小溝・排水路を介して水田群が接続し、水田への用水供給等に関して、複雑な運用がなされていることが推定された。

4. 3. 4 NWを利用する魚類行動からのNW評価

現在は、河川や用水路下流部から水田へ移動する場合には、河川から用水路移動直後に移動当初、構造物に遭遇する経路しかなかった。また、構造物の上流側へ移動できたとしても水路間を移動する場合に構造物に遭遇する経路が存在した(図-4.5)。過去は、急勾配部でY7～Y8を通過する以外は、水田へのアクセスが容易であると考えられた。

現在・過去ともにナマズの生息空間として著しく高くはないが、水深に関しては、現在は浅い箇所が複数存在した。

4. 4 考察

4. 4. 1 現在と過去のNW構造の比較

現在と過去のNW構造の差異として重要なのは、イ)水路と水田の距離、ロ)落差工の設置位置、ハ)NW内の分岐数である(図-4.5)。

イ)については、過去のNWでは、用水路に生息・移動する魚類は、その近傍に水田を容易に見つけることが出来たと考えられる。一方、現在のNWでは、河川や下流側の水路から魚類が水田に移動を試みる場合、必ず一定以上の移動をしなければ排水路内へ移動できない。これは、魚類にとって大きな負荷になると考えられる。

ロ)は、現在のNWでは、魚類が河川や排水路の下流部から、移動を試みた場合、その初期に落差高を通過する必要がある。しかし、過去のNWでは、落差高は、急傾斜地に集中して存在する。落差高を通過できない魚類は、その下流部に広いNWと水田への接続経路を利用することが出来たと考えられ、低標高部の水田へのアクセス可能性が高かったと考えられる。

ハ)については、NWの分岐数に差が見られた。現在のNWでは、NW内に排水路が分岐する箇所が多い。魚類が水田へ移動を試みる場合、水田へ続く経路を俯瞰的に判断できないため、水田へ接続しない排水路や落差高がある経路を選択する可能性もある。それに対し、過去のNWでは、分岐する経路はあるが、分岐数が少なく偏在している。言い換えれば、ネットワークセグメント(NWに属するサブネットワーク)は、一定以上のスケールを持ったネットワークを形成している。魚類

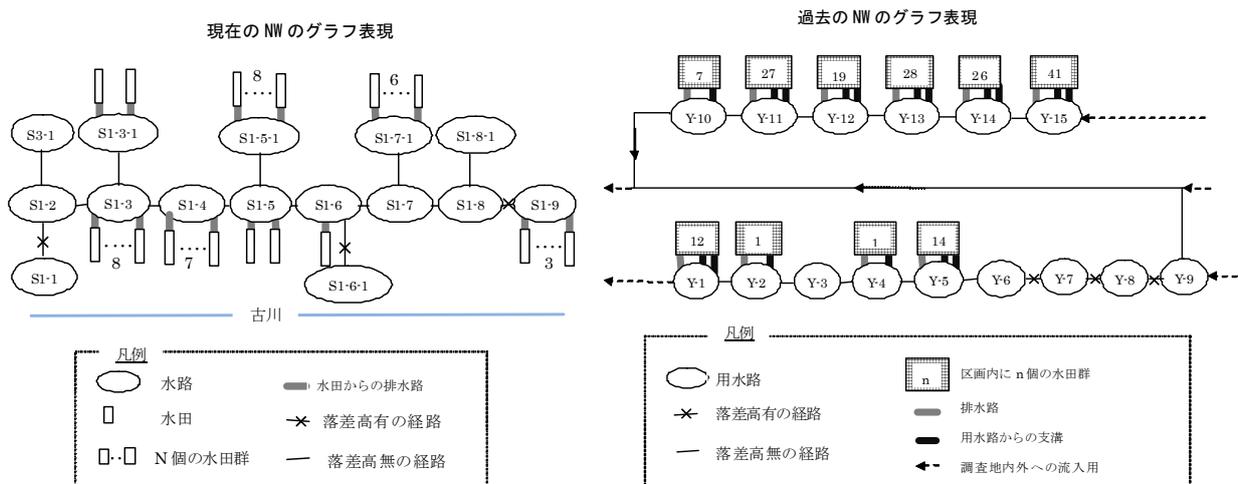


図-4.4 現在と過去のNWの構造図

がネットワークセグメントをまたぐ移動を試み落差高にその移動を阻まれた場合、魚類は現在いるネットワークセグメントに戻り、そのネットワークセグメントの中に、いくつかの経路（支溝）を発見できる可能性が高いと考えられる。イ）、ロ）、ハ）から判断すれば、過去のNWはナマズのような魚類にとって良好なNWを提供していたと考えられる。

4. 4. 2 生息空間としての水路の流況変化

現在と過去を比較した場合、過去の用水路は生息空間としての適正が現在よりも高かったと考えられる（表-4.3）。流速は3ケースともに過去の用水路の方が流速は大きい、底面に生息するナマズにとって大きな負荷がかかる流速ではなく、推定した断面形状から考えれば側面に低流速域が存在したと考えられる。

水深の比較は、更に興味深い。現在は、排水路の一部で水深が浅く、その排水路はNW内に分散していた。NW内を移動するナマズなどの魚類は、NWを探索する途中での分岐路の選択に誤ると生息環境の厳しい水路に移入してしまう可能性がある。一方、過去の用水路はどこでも水深が深いのが特徴で、現在よりも、捕食リスクが少なく、安定した環境で産卵場への移動のタイミングを待つ良好な生息空間があったと考えられる。

4. 4. 3 NWの保全のために向けての現在の河川事業で実施できる方策の検討

河川事業で可能なNWの保全の方法は、中小河川でも積極的に生息空間の保全・復元を行うことである。NWを利用し生息する魚類が、大規模な移動を

せず水田と類似した機能を持つ水域、例えばワンド・タマリ等を利用することができれば、生息空間利用方法の多様性が向上し、魚類群集の多様性保全に何らかの貢献をすると考えられる。しかし、中小河川では土地利用・用地的な制約から生息空間保全などの事業を行えない場合が多いと考えられる。これらの場合には、本報告で指摘したように、河川や用水路下流部に生じる落差工を中心にNWの分断化を解消するための水田用小型魚道の設置を行う等の方策や、生息空間としての機能が高い排水路に改善を行う必要があると考えられる⁴⁴⁾。

中小河川の改修、水田用魚道の設置、生息空間機能の高い排水路などは、NW全体を俯瞰しその問題抽出・機能を向上させる取り組みが極めて重要であると考えられる。今後は、農林水産省や圃場所有者と更に連携することが必要である。

4. 5 まとめ

明治期の地籍図等から、地理情報システム・水理計算等を用いて、河川・水路網・水田で形成される水域の生息空間ネットワーク（NW）の構造、水路網の流況等を定量的に推定した。NWを利用し生息する魚類の一例として、ナマズの産卵行動を指標として、現在と過去のNW構造の差異が魚類行動に与えた影響を考察した。その結果、過去のNWは現在のNWと比較して、以下の特徴があった。①過去のNWは水路近傍に水田が存在し、容易に水田へ移動できた。②魚類が水田へ移動する場合に落差工など構造物による分断の影響を受けにくかった。③過去のNWは、用水路が分岐する回数が少なく、水田

へ接続していない水路へ迷入することが少ないと考えられた。

5. 過去の文献資料を用いた昭和初期の農業生産活動に伴う窒素負荷量の推定

5. 1 はじめに

流域からの汚濁負荷の軽減、特に、農地などの非特定発生源からの汚濁負荷管理・抑制は、河川環境（水質）の保全に重要な事項である。近年、非特定発生源からの汚濁負荷対策は、流域にわたる継続的な取り組みが行われている。水質汚濁が顕在化した高度成長期以後、汚濁負荷管理は一定の成果をあげ、水質改善の兆しがみられる。

汚濁負荷対策による改善傾向を持続し、より良い河川環境の実現を目指す場合、その目標があると実施しやすい。具体的な目標の一つとして、高度成長期以前の良好な水環境があげられる。昭和初期の河川環境は、一つの理想的な河川環境として誰もがイメージできる河川環境である。昭和初期の河川環境は、どのような環境であったのだろうか？水質面から見て、その推定を行うには、まず、流域からの負荷量の推定が必要になる。この際には、現在も実施されている手法である原単位・フレーム法を適用することが考えられる。

しかし、昭和初期の水質を原単位法で推定するのは、容易には行えない。それは、生活様式、農業生産様式などが大きく異なっていることに加え、高度経済成長期以前、特に昭和初期などの水質に関する定量的な記録が残っていないためである。昭和初期の水質推定には、まず、原単位推定から始める必要がある。

この調査には、過去の文献資料を用いたアプローチが有効であると考えられる。例えば、一部の郷土史には、農業統計など直接的な農業活動（当時の行政単位での作付面積、栽培作物、その収穫量等）を記録した資料が存在する。また、農家の農業経営収支、肥料購入実態等を記録した資料が存在する。このような資料に記録された断片的な情報を連携させることにより、過去における農業生産活動に伴う窒素負荷量を推定することができると考えられる。

一方、このアプローチは、副次的情報をもたらす。それは、原単位を推定する過程で、農業生産活動の詳細を検証するためである。この検証は昭和初期における農業生産活動に関する社会システムを評価することにつながり、昭和初期と現在の負荷量の

違いがどのような社会システム・人間活動に起因しているかの理解を助ける。

このような背景から、本研究では、(1)過去の文献資料を用いた昭和初期の農業活動に伴う窒素負荷量の推定、(2)昭和初期の窒素負荷量が少なかった社会的背景、現在の農業活動との違いの考察、以上の2点を行い、水環境保全の更なる改善へ向けての考察を行うことを目的とする。

5. 2 研究の方法

5. 2. 1 調査地の概要

本研究は、豊川水系豊川で行った。豊川は出水時の流量規模が大きく、中下流域では氾濫が多発し霞堤による治水が行われてきたが、霞堤周辺では氾濫が多発し、米作地に適していなかった。しかし、反対にその洪水によってもたらされた肥沃な土壌は、畑作地農業に適した環境を提供した。豊川流域は、台地が多いなどの地形的特性から、水資源（農業用水）に恵まれた地域ではなく、農業用水は不足し用水供給を主とする農業生産基盤は恵まれた状態とは言いがたかった。

豊川は、1960年代に大きな変化を遂げた。それは、霞堤の連続堤化・豊川放水路の完成による氾濫の減少と豊川用水の完成による農業生産基盤の変化である。霞堤の連続堤化・豊川放水路は、劇的に洪水氾濫を減少させ、河川周辺の農業基盤を安定させた。更に、豊川用水の完成による農業用水供給の安定は、豊川流域の農業活動を安定・発展させ、多角的農業経営を可能とした。

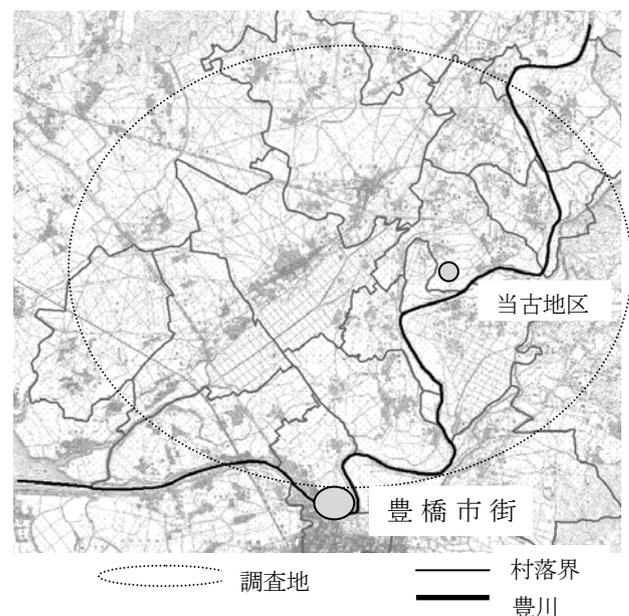


図-5.1 昭和初期の調査地

表-5.1 過去の使用肥料窒素成分率⁷⁾⁸⁾

肥料種類	全窒素量(現物に対するの比率)
堆肥	0.66
人糞尿	0.50
緑肥	0.50
鶏糞	2.28
豚糞	1.14
牛糞	0.74
牛尿	0.47
牛ふん尿(混合)	0.36
藁灰	0.00
魚肥	9.50
菜種粕	5.09
硫安	20.50
米糠	2.08

つまり、豊川は高度成長期前後で大きく農業活動環境が変化し、過去と現在の農業活動、それに伴う農業負荷を比較しやすい場所である⁴⁷⁾。

本研究の調査地である旧宝飯郡、現在の豊川市(以下、調査地と記述する)は、こうした豊川の特徴をより強く反映する地域である。調査地は、豊川放水路完成以前には、霞堤による治水が行われていた地域である。霞堤から氾濫した出水は、宝飯郡内の水田・畑作地へダメージを与えると同時に、畑地へ土壌・肥料成分を運搬した。また、都市近郊に隣接する地域で商品流通が発達し、水田だけでなく畑作、養蚕、商品作物など、昭和初期に栽培された作物がバランスよく生産された地域である⁴⁷⁾(図-5.1)。

5. 2. 2 文献調査の概要と昭和初期の施肥量の算出

豊川流域農家の1年間の施肥量を算出するため、資料として、愛知県農会編・発行(1930)『農家経済調査：昭和3年度』及び『農家経済調査：昭和8年度』を使用した⁴⁹⁾⁵⁰⁾。農家の経営や経済状況に関する調査は、農村の実態を把握するために、明治時代末期から頻繁に全国各地で行われている。その形式はおおよそマニュアル化させている。この調査では、各県、あるいは各郡において典型的な事例となる農家を1、2軒抽出し、調査地内における平均的な農家の家族構成、経営反別、作付面積、1年間の収支を算出することを目的としている。特に、昭和初期のものは、農村恐慌の時代と重なるため、農業経営とその収支の把握に重点を置く調査が多い。その項目は多岐に渡り、例えば、農家が所有、備蓄している資材や農産物、翌年分の種籾や肥料とその材料に至るまで、量と金額の両面で記載されている。また、調査は、農家への調査票の配布と、それに基づき調査員が戸別訪問して聞き取りを行った結

果からなっており、各項目に記載された数値は相当正確な経営実態を示しているものと考えられる。

愛知県豊川流域農村に関しては、大正期からいくつかの事例農家調査が行われているが、この昭和3年度の調査が最も詳細である。農家の所在地は、「宝飯郡事例農家」とされ、実際には伏せられているが、松原用水の灌漑範囲内であること、停車場まで1里の距離にあること、海苔の養殖を行っていることなどから、豊川右岸河口部に位置する、前芝地区の農家事例であると推察できる。

推定施肥量の算出は、以下の手順で行った。まず、農業総収益の項目から、籾殻、稲わら、麦わら、いもづるなど、いわゆる作物残渣に相当するものを抜き出し、これらを自給肥料の原料と仮定した。同様に厩肥、鶏糞、人糞尿、草木灰など、自給肥料以外の用途が考えにくいものは、そのまま肥料として算出した。また、購入肥料の量と、調査時に備蓄されていた昨年度購入分の購入肥料の量の差を1年間で使用した量とし、推定施肥量とした。

稲わらや麦わらなど、自給肥料の材料以外にもさまざまな用途のある資材については、調査時に現物として農家内に保管されていた俵、縄、飼料分などの量を考慮した。

最後に、愛知県農会編・発行(1929)『愛知の農業』により⁵¹⁾、三河地方の当時の代表的な農産物1反当りの平均的な施肥量、収穫量、農事暦を参考とし、事例農家の所有耕地、栽培反別に即して、肥料の投入量を算出した。またこの資料により事例農家は、当時の平均施肥量に見合う分量を自給肥料として生産、投入が可能であったことも明らかとなった。

推定施肥量は、米麦などの穀類、芋類と、数種類の野菜類について算出した。これにより、堆肥、人糞尿、鶏糞等の自給肥料と、魚肥、菜種粕、石灰、硫安などの購入肥料の割合と推定施肥量が明らかとなった。なお、本研究では、原典に準拠し、畑地で栽培される「野菜」を「蔬菜」と表現する。現代に関する表記でも「蔬菜」で表記を統一する。

5. 2. 3 昭和初期における肥料成分の産出

有機肥料・無機肥料ともに、その推定施肥量の全てが肥料成分として機能するわけではない。特に、有機肥料は、その肥料成分が少なく推定施肥量から肥料成分として有効な量を新たに算出する必要がある。農学(肥料学)では、投入した有機肥料の現物重量のうち何パーセントが肥料成分(窒素、リン酸、カリウム)として機能するかを検討している。その検討は、有機

表-5.2 過去（昭和3年，8年）のモデル農家の肥料使用量推定結果

作付品目	項目ごとの作付面積（反）	堆肥（貫）	人糞尿（貫）	藁灰（貫）	魚肥（貫）	有機肥料				化学肥料	
						菜種粕（貫）	人尿（貫） （荷）	鶏糞（貫）	米糠（貫）	石灰（貫）	硫安(kg)
昭和3年 (1928年)	米	11.90									47.60
	麦	1.50									
	芋	0.85	大量	(1, 2回)	25.35					12.68	
	豆類	0.10	30.00								
	蔬菜	2.29	755.70	682.42	48.09	50.84	36.64	9.16	16.03	274.80	27.48
昭和8年 (1933年)	米	11.31									45.25
	麦	1.32									
	芋	0.61	大量	(1, 2回)	18.39					9.20	
	豆類	0.62	184.60								
	蔬菜	1.72	568.92	513.75	36.20	38.27	27.58	6.90	12.07	206.88	20.69

米の化学肥料は、大正期に1反あたり4kg使用の記述による。

表-5.3 過去（昭和3年，8年）のモデル農家の肥料備蓄量

	堆肥 (貫)	厩肥 (貫)	人糞尿 (貫)	練粕 (貫)	大豆粕 (貫)	糞 (石)	籾殻 (石)	藁 (貫)	灰 (俵)
昭和3年 (1928年)		500	100	3.8	7.2				
昭和8年 (1933年)	1400		73	144.1		0.21	26	1605	7

肥料の種別に詳細にまとめられている（表-5.1）。これらの成果に基づき、推定施肥量から肥料成分として投入された量を算出した⁵²⁾⁵³⁾。化学肥料の硫安の全窒素量は、他の有機肥料と比較し、著しく多かった。次に、購入肥料である魚肥、菜種粕が続き、有機肥料は豚糞、鶏糞などを除き1%未満と全窒素量は少なかった。算出時には、全窒素量に着目し、以下の手順で算出した（以下、この量を窒素負荷量と記述する）。

農業による全窒素負荷量の推定については、米、麦、芋、豆類、蔬菜などの作付品目ごとに推定した有機・無機の推定施肥量に表-5.1の窒素成分率をかけ、次に、全窒素量をモデル農家の作付面積で除し、10a当たりの窒素負荷量 (kg/10a) として算出した。なお、過去の推定施肥量は、貫などの伝統的な度量衡で記録されていたため、1貫を3.75kg、1荷を約12kg、1反を9.91aとして計算した。また、表-5.2に後述するように、「大量」、「1, 2回」のような定性的表現が原典内にある場合には、表-5.3の同種の肥料備蓄量か、他の作付品目へ投入された肥料量を引き、その残渣を全て投入したと仮定して計算した。

5. 2. 4 現在（平成18年）の施肥量調査

現在の窒素負荷量は、①調査地の主要農作物の選定、

②主要農作物の単位面積当たりの施肥量の調査の順で行った。

調査地の主要農作物の選定は、豊川市生活活性部農務課がとりまとめた「平成18年度 豊川市の農業概要」から選定した⁵⁵⁾。次に、愛知県が発行する「農作物の施肥基準」⁵⁶⁾から、選定した作物生産に伴う窒素負荷量を調査した。本文献には、愛知県で生産する農作物への適正施肥量（窒素負荷量）が収録され、農家はこの適正施肥量を基準に施肥を行っている。同作物で、地方により異なる適正施肥量の記述がある場合には、調査地の最も近傍にある場所の施肥量を採用した。資料の中には、同一作物品目でも品種により施肥量が異なる場合があった。その場合には、同一作物品目の平均値を算出し、その結果を窒素負荷量とした。

5. 2. 5 過去（昭和3年，8年）と現在（平成18年）の間の施肥量比較

5. 2. 3, 5. 2. 4で算出した過去と現在の10a当たりの全窒素量 (kg/10a) を、土地利用別、作物品目別に比較した。過去と現在の間で、施肥量が著しく異なる作物品目がある場合には、その作物品目の中での施肥量の違いを5. 2. 4の資料を用いて検証した。

5. 3 結果

5. 3. 1 過去のモデル農家の肥料使用量と単位面積当たりの全窒素負荷量の算出

表-5.2に過去のモデル農家の肥料使用量の推定結果を示す。過去では一般的に言われるように、有機肥料（主に堆肥、人糞尿）の使用が多かった。化学肥料は、窒素の供給を目的とした硫安（硫酸アンモニウム）が主に使われ、主要な収入源となる米に使用されていた。魚肥、菜種粕、鶏糞などの購入肥料は、調査地の農家の現金収入源であった野菜に主に使用されていた。

表-5.3に過去（昭和3年，8年）のモデル農家の肥料備蓄量を示す。堆肥・厩肥などが多く使用されていた。

表-5.4にモデル農家の投入全窒素量を示す。定量的な記述が残った中で、最も多かったのは野菜へ投入された堆肥由来の8.1（kg/10a）であった。作付品目で

は、野菜が多く、水田には、野菜の約10分の1の全窒素量しか投入されていなかった。

5. 3. 2 過去と現在の全窒素投入量の比較と全窒素投入量の多い品種の特定

図-5.2に作物別にみた過去と現在の間の全窒素投入量を比較した結果を示す。全体として、過去と比較して現在の施肥量が多いことがわかる。特に、明瞭な違いを示したのは、水田であった。水田は、過去の約10倍の全窒素投入量があった。一方、過去と現在で投入全窒素量に差があった野菜に関しては、過去は現在よりも約15kgの全窒素投入量が多かった。果樹、花卉などの商品作物は、野菜と同程度の全窒素投入量があり、過去には栽培が行われず、新たな窒素投入量源であることを示す結果となった。

表-5.4 過去（昭和3年，8年）のモデル農家の全窒素投入量の推定結果(kg/10a)

作付品目	有機肥料			化学肥料			全窒素投入量合計	
	堆肥	人糞尿	藁灰	魚肥	菜種粕	鶏糞		米糠
米							0.81	0.81
麦								
芋	21.90	2.20					1.16	25.26
豆類	7.37							7.37
野菜	8.10	2.98		7.84	3.03	10.17	3.89	36.01

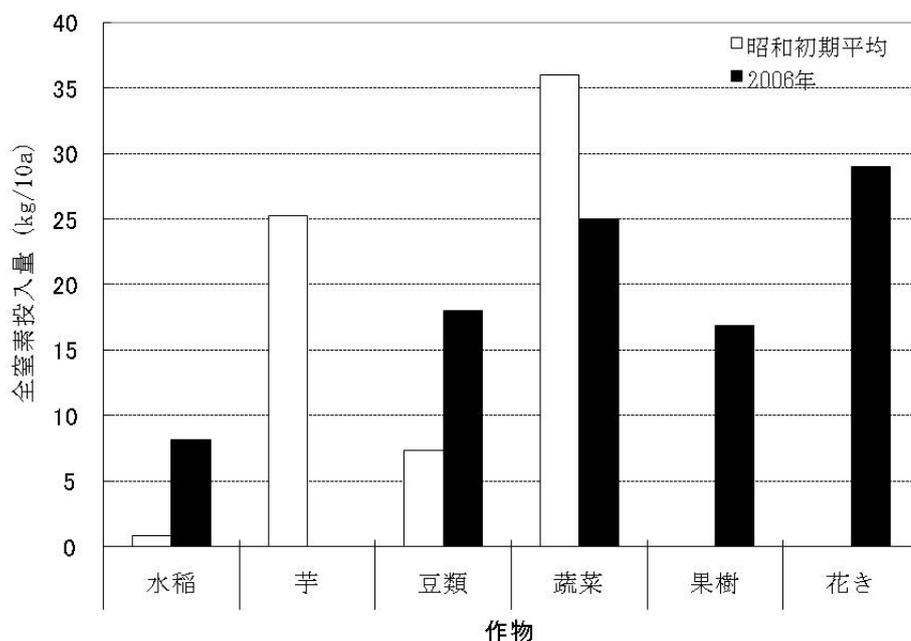


図-5.2 作物別にみた過去と現在の間の全窒素投入量の比較

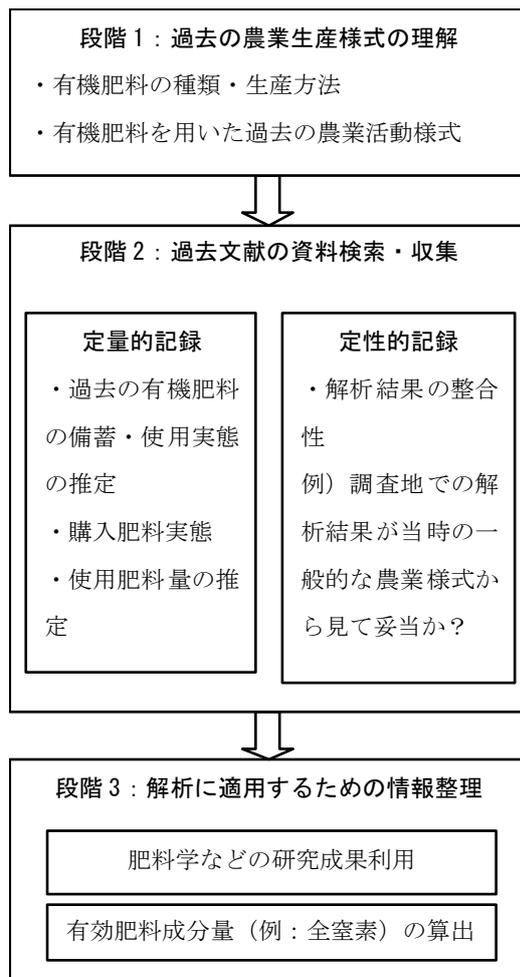


図-5.3 過去の文献資料を用いた解析の手順の一例

5. 4 考察

5. 4. 1 過去の文献資料を用いることによる農業活動状態や窒素負荷量の定量的推定方法の提案

過去の全窒素投入量を推定するのは、定量的な統計資料がない時代では難しいと一般に考えられている。特に、高度成長期以前（1950年代）より過去の定量的情報が系統的に比較が出来るように記録されている資料は少ない。また、資料が保存されている場合でも、その資料を単に整理・分析するだけでは、情報が断片的で定量化には難しい側面がある。

しかし、本研究で行ったように、文献資料の断片的な情報を横断的につなぎあわせ、農業生産活動を詳細に分析、言い換えれば、社会科学的分析を併用して行うことで、農業活動、それに伴う環境負荷を定量的に推定することが可能になると考えられる（図-5.2）。

本研究で実施した方法を他の調査地で展開する場合を考え、簡単な手順として以下の3つの段階の解析として提案する（図-5.3）。

1) 第1段階：地域の過去の農業様式の理解

第1段階は、対象とする地域の過去の農業様式への理解を深める段階である。本研究の場合、過去の農業に関する一般的な文献（農業様式や有機肥料に関する文献）や対象地域の農業様式に関する文献資料から、調査地で用いられた肥料の種類（有機肥料、無機肥料など）や、調査地の農業様式の特徴を整理した。その中で、過去の農業では、農産物を加工した後に出る残渣が有機肥料の材料として重要な資源であるなどの特徴を把握することが出来た。

2) 第2段階：資料特性の見極め

第2段階は、調査地に関する資料の特性を見極める段階である。調査地に関する過去の文献資料を、調査地の農業様式の定量的な記録と定性的な記録に分類した。過去の文献資料は、その編纂目的に応じて、記録されている情報・精度が著しく異なる。一部の過去の文献資料の中には、農業活動に関する情報を定量的に記録したものも存在するが、大多数は、定性的な記録しか残されていない。本研究では、まず、定量的情報を用いて、購入肥料の分量や有機肥料の備蓄量を推定し、定性的情報を用いてその妥当性を検証した。

3) 第3段階：情報の整理

第3段階は、過去の情報を現代的な解析に利用するために、現代の情報に整理する段階である。本研究では、第2段階で行った過去の文献資料から推定した肥料使用量から、肥料学などの情報を利用して、有効肥料成分量を算出し、全窒素量など現在の解析・分析に用いる情報に変換し、原単位法などに用いることの出来る情報へと変換した。

この中で、特に重要なのは、第3段階を行うのに必要となるデータの諸元を予め明確に設定することである。筆者らの経験から考えると、第1段階や第2段階での情報整理・分析の段階では、研究者は、莫大かつ非系統的な情報の中から、適切な情報を抽出するのに時間と労力を費やす可能性が高い。そのため、解析の着手段階から、最終的に解析に必要な情報を絞り込み、情報の取捨選択・整理・分析を第1段階や第2段階で行いやすくすることが重要となると考えられる。

5. 4. 2 昭和初期の農業生産活動から推定される現在との農業活動環境の違い

昭和初期の農業生産活動に伴う窒素負荷量は、現在と比較して低い状況であった。昭和初期に主流で

あった有機肥料は、化学肥料と比較して著しく肥料成分が少ないことがわかる(表-5.1)。昭和初期、化学肥料として主に使用された硫酸は、一般農家への供給が始まり浸透してきた程度であり、調査地の付近では、十分な供給が得られていない状態であったと推定される。また、一般的に普及していた有機肥料(魚肥、植物油粕類など)なども市場経済の未成熟、農業経営の零細さから、最低限の肥料購入しか出来なかったため、調査地周辺部以外から移入される量は少なかったと推定される。

調査地の民俗研究資料である「当古の歴史」には、個々の農家、地域社会の努力が記録されている⁵²⁾。例えば、氾濫原の特性を利用した畑作である。調査地では、「新切」と呼ばれる堤外の河原畑も活用し、農業をおこなっていた。新切には洪水時に運搬される泥が肥料になり肥を施さなくても良かったという記録がなされている。また、氾濫原周辺の堤防上の草などを堆肥として利用していた。毎年5月に堤防上に区画を設置し入札で、区画内の草を利用する権利を農家間で購入し利用していたという記録がなされている⁵²⁾。

このように、昭和初期の農業活動は、自らの耕作地近傍の有機物資源を活用しながら、農業活動を行ってきた特徴がある。その結果、図-5.2に示すような負荷量の少ない農業が行われていたと考えられる。現在では、農業技術が発達し、農業活動の環境は著しく向上した。特に、化学肥料の性能向上とその供給体制の整備は農業活動に著しい変化をもたらしたと考えられる。

5.4.3 より環境への負荷が少ない農業活動への考察

昭和初期の窒素負荷量分析で明らかにした昭和初期の農業活動の特徴は、遠隔地からの肥料(有機物)移入、化学肥料の投入が少なく、周囲の有機物を活用しながら農業を営み、結果として窒素負荷量が少なかったという構図である。畑地を例にとれば、使用する肥料は堆肥を主とした自給肥料が多く、その由来は、農地周辺からのものであった。本研究で対象としたのは、あくまでも農地への窒素負荷量であり、流達率などを考えると流域へ汚濁負荷源の流出は更に少なかったと考えられる。

昭和初期の農業活動の特徴に習うとすれば、有機物の流域内利用を挙げることが出来る。有機肥料の肥料成分率は化学肥料に比べて著しく低く(表-5.1)、

現代の作付け品目が必要とする窒素負荷量を有機肥料のようなもので補おうとする場合には、多量の肥料が必要となると考えられる。言い換えれば、周辺で排出される有機物を肥料原料とすれば、多くの排出有機物を消費することが考えられる。衛生的な問題など多くの問題を解決する必要があるが、このような考え方も環境と共生した過去の農業活動から読み取れる知見である。

5.5 まとめ

- (1) 過去の文献資料を横断的に連携させ、自然・社会科学的に分析することで、定量的記述がない昭和初期のような過去の窒素負荷量を定量的に推定することが可能となった。
- (2) 文献資料に断片的に記録された農業情報を詳細に分析し、昭和初期の窒素負荷量を定量的に推定した。その結果、現在の窒素負荷量は、過去と比較して多く、水田では約10倍の負荷量を投入していることが明らかになった。
- (3) 過去の農業活動は、農業技術(肥料技術)の未発達、農家の零細経営のため、氾濫原の有効利用、周囲で得られる有機肥料などを活用し、農業活動を営んでおり、現在の営農活動と著しく異なることが示唆された。

6. 時系列分析を用いた河川流量変動の典型性抽出手法に関する研究

6.1 はじめに

流量変動は、河川生態系にとって大きな影響因子である。流量変動は、物理環境を変動させ、生物生息空間を変動させると同時に、流量変動に適応できる生物群集の定着を促し、河川生態系の典型性を形成していくことが指摘されている。同時に、流量変動は、その攪乱強度により外来生物の定着を抑制し、河川生態系の健全さを維持する重要な特性である⁵⁸⁾⁵⁹⁾。

流量変動の詳細を予測するのは不可能であるが、流量変動は全くランダムに変動するわけではない。流量変動は、対象河川が属する気候帯、気候により特徴づけられた流域への降雨特性、流域特性(地質、地形、流域土地利用など)の影響を受けて決定される。流量変動をよく観察すれば、その統計的特性を理解できる。例えば、出水年、渇水年などと呼ばれる周期的な各年の流量の増減、1年の中では、平均

流量の季節変動、梅雨・台風期など出水が集中的に生起する時期などを直感的に感じとることが出来る。この統計的性質を見極め、時系列データの中から流量変動の代表例、すなわち「典型性」を見出すことが出来れば、河川生態系の研究に有用であると考えられる。特に、1年の中の流量変動、特に月や旬といった時間単位での「典型性」を把握することは、調査対象年の流量変動の一般性や調査データに影響を与えた出水などの流量変動に伴うインパクトの一般性・特異性を評価する上で重要な意味を持つ。

水文統計学では、気温、降水量、流量変動などの時系列データを分析し、その統計的性質を把握するような解析が多く行われ、その理論的研究、水資源管理や降水量予測といった実務的な研究が積極的に行われている⁶⁰⁾。

これらの研究成果は、この流量変動の典型性抽出に大きな可能性を示す。例えば、周期性解析による出水年、渇水年の変動サイクルや河川の流量変動に特有の季節変動性など、多くの可能性を持った研究・技術である。

しかし、水文統計学では主に水資源管理などへの利用を主目的とするため、出水年、渇水年の生起確率などに関する研究が一般的で、1年の中の流量変動の「典型性」を抽出するような観点で行った研究は少ない。一部の流量観測所データに適用された研究事例があるが、河川生態系研究に必要な精度までは実現出来ていないのが現状である⁶¹⁾。

また、過去のデータなどがあった場合、そのデータの解析の必要性が生じることがある。過去の水位データはその信頼性の担保がとれておらず、解析に用いる前に検証を行う必要がある。そのような場合、「典型性」を一つの検証用データとして利用し、過去のデータを検証することが可能になると考えられる。

このような背景から、本研究では、①流量時系列データから、時系列分析などの統計的手法を活用しながら「典型性」を抽出する手法を提案すること、②提案した手法により抽出した流量変動の「典型性」を用いて過去の流量時系列データの信頼性を検証することを目的とする。

6. 2 研究の方法

6. 2. 1 調査地の概要及び現在・過去の水位データの概要

調査は信濃川水系千曲川で行った。本河川は流域

面積7163km²、流路延長214kmの1級河川であり甲武信ヶ岳（標高2475m）から長野盆地を流下し新潟県境に入り信濃川と名前を変える。

千曲川流域は、上信越高原・秩父多摩山地・八ヶ岳・北アルプスなどの標高2000~3000mの山岳に囲まれ、平地は長野・上田・佐久などの盆地地形を形成する。盆地特有の気候のため、千曲川上・中流は日照時間が多く多照地帯である。また、盆地での年間降水量は1000mm以下で少雨地帯である。一方、山岳部では1500~2000mmの多雨・多雪地帯である。降水は、雷雨や台風による出水が多いのが特徴である⁶²⁾。

調査対象地区は、千曲川の中流部に位置する生田観測所（長野県上田市、東経138°16′45″、北緯36°22′4″）で、ここの水位データを対象とした。水位データを対象としたのは、後に詳述するが、過去の流量時系列データを整備することが困難であったためである。過去の流量時系列データを整備するためには、過去の現地流量観測データと水位データが存在しなければならず、明治での流量時系列を計算する資料・データは、保存されていなかった。そのため、流量時系列データの代わりに水位時系列を用いて研究を進める。

水位データを用いる妥当性であるが、一般に水位と流量は極めて良好な相関関係があり、流量時系列データ分析を水位時系列データの分析で置き換えても、著しい問題がないと判断したためである⁶³⁾。以下、解析対象とした水位データを対象データと記述する。

千曲川は、本研究を行う上で適した特徴が2点ある。1点目は、千曲川本流には、大規模なダムが多数存在せず、千曲川の流量変動は極めて自然の流量変動に近い特徴がある。2点目は、千曲川では、河川に関する過去資料が良好な状態で保存されている。特に有用な資料は、1893~1897年（明治26~30年）に内務部第二課土木係が長野県内の主要河川（千曲川を含む）を中心に観測・記録した河川水位一覧表である。この記録には、現在も水位観測が行われている塩名田（長野県佐久市）、立ヶ花（長野県中野市）、そして、生田流量観測所近傍の観測所の日平均水位データも記録されている（以下、上田と記述する）。

本研究では上田の水位データを検証用データとして利用する。上田の水位観測地点はゼロ点高の資料は散逸しているため不明ではあるが、水位データの変動パターンを把握することが可能なため検証用デ

ータとして採用した。信頼性の判断に際しては、現在の水位時系列のパターンと著しく異なる場合、季節的、前後の関係性から水位変動特性の信頼性が低い場合には、その年の水位時系列は、検証用データとして採用しなかった。最終的に、上田の水位データでは信頼性が高いと考えられる1896年の水位データを検証用データとして採用した（以下、検証用データと記述する）。検証用データは、尺などの度量衡を用いていたため、1尺を30.3cm、1寸を3.03cmとして、現在の単位で修正し日平均水位時系列を作成した。

6. 2. 2 本研究で提案する典型性抽出手法の特徴

1) 時系列解析の問題点と本研究で提案する典型性抽出手法の特徴

時系列データを構成する各年は、特有の水位変動特性（年平均水位、出水による水位増加数など）を持ち、その特性により、「出水年」、「平水年」、「渇水年」と呼ばれるグループに分類される（以下、年特性と記述する）。同時に、年特性には一定の周期性があることが知られている。本研究の目的である水位時系列の典型性を抽出するには、水位時系列を構成する各年の年特性に分類し、各年特性で特徴的な水位時系列を抽出するのが有効である。

これを、時系列分析で行う場合、以下の2点の問題点があった。1点目は、年特性の周期の始点・終点の判別が困難な点である。時系列解析は、主に自己相関係数などを用いて、時系列データ内の周期に着目し解析が行われる。この解析では、時系列データの中にある周期は特定できるが、周期がどの年から始まりどの年で終わるかの判断は曖昧になる。すなわち年特性に属する年の特定が明瞭に行えない問題点が生じていた。2点目は、自己相関係数で特定した周期には、長周期が短周期を含む場合が考えられる。これにより、各年の年特性の特定が難しくなる問題点が生じていた。

このため、本研究では、時系列分析を用いて周期、有効な周期数を特定した後、各年の月平均水位時系列の類似度から各年を分類し、年特性周期に属する年を特定し、典型性を抽出する手法を提案する。以下に、その詳細な手順を述べる。

2) 水位時系列の分析

水位データのトレンドの有無を検定した（スピアマンの順位相関係数検定、 $p=0.05$ ）。トレンドの有無は、年平均水位時系列データ、月平均水位時系列データのそれぞれについて検定した（数理システム社、S-PLUS 6.0、以後、同一のソフトウェアを使用する）⁶⁴⁾。

3) 周期性の抽出

この年特性の周期を算出するため、年平均水位を用いて自己相関係数を算出し、周期を算出した。周期の特定では、自己相関係数の中で信頼性が高いものだけを年特性として採用した。また、周期の数だけの年特性があると仮定した。

4) 年特性ごとの水位変動特性の把握

3)の周期性の抽出では時系列データを構成する年特性の数しか特定できない。そのため、年特性に属する年を特定するため、水位データを各年に分割し、各年の各月平均水位、各月水位の標準偏差をパラメータとしてクラスタ分析(K-平均法)を行った。

その後、各年特性に属する各年の水位変動特性を月単位で集計し比較した。比較には、箱ひげ図を用いて平均、各月変動特性を比較した。

5) 季節変動性の抽出

時系列データには、季節変動に伴う周期変動データが含まれることが知られている。そのため、季節変動成分を抽出するために水位データの季節変動分析を行い、各年に共通する季節変動成分を抽出した。その後、年特性との関係性を分析した。

6. 2. 3 各年特性での流量時系列と1896年（明治29年）との比較・検証

抽出した年特性の典型性を用いて、1896年の時系列の信頼性を検証するため、1896年の水位データと比較・検証を行った。1896年(4)で求めたどの年特性に該当するのかを検討した。1896年の年特性の特定は、1975年を基準として3)で求めた周期を参考に特定した。また、4)で求めた年特性に属する年の内、その特性を明瞭に持つ年と1896年を比較した。

6. 3 結果

6. 3. 1 水位データと検証用データの時系列特性

図-6.1に日平均水位時系列を示す。水位時系列は、増加・減少といった著しいトレンドがないと考えられた。水位時系列は、1975～1981年前後、1981年前後～1988年前後など、約7～11年間ごとに各年の水位時系列特性が異なっているとみられた。また、水位が高い期間は、出水の水位が約2m、水位の低い期間は、出水の水位が高い傾向があった。

図-6.2に検証用データの日平均流量時系列を示す。現在と同様の水位変化がある。4月、7月、9月、

10月頃に出水が頻発し、冬季に水位の著しい低下を示す傾向があった。

6. 3. 2 時系列分析の結果

1)トレンドに関する検定

トレンドの検定を行った結果、月平均水位、日平均水位共に正のトレンド、負のトレンドはなかった（月平均水位：Z値=-2.2, Z値=1.96；日平均水位；Z値=-29.14, Z値=1.96,）。

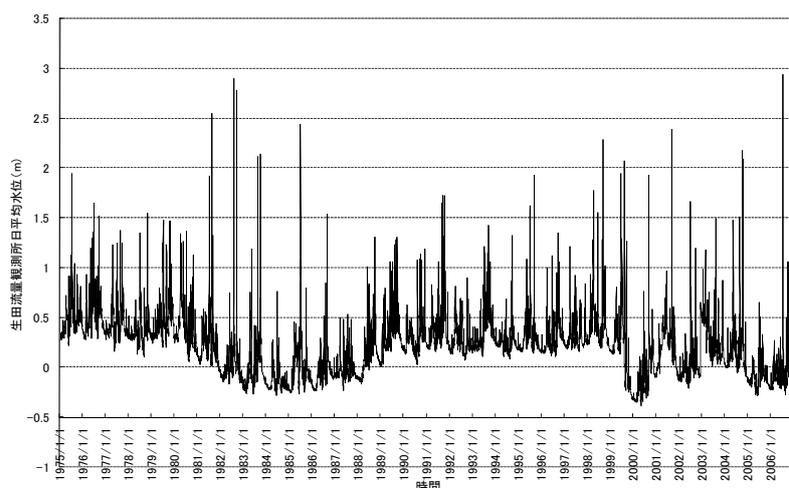


図-6.1 日平均水位時系列

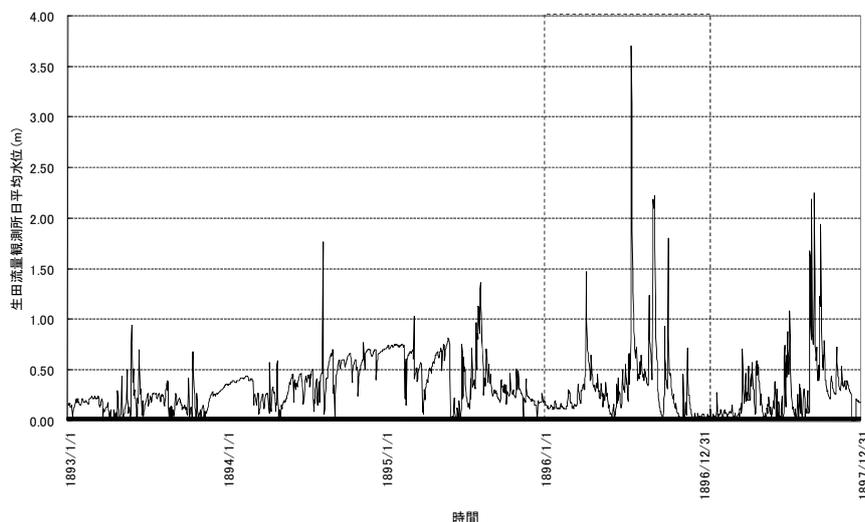


図-6.2 検証用データの日平均水位時系列（点線部：検証用データ）

表-6.1 年特性と対応年

分類	対応年
1	1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980, 1989, 1991, 1993, 1998
2	1981, 1990, 1992, 1994, 1995, 1996, 1997, 1999, 2001, 2003, 2004
3	1982, 1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 2000, 2002, 2005, 2006

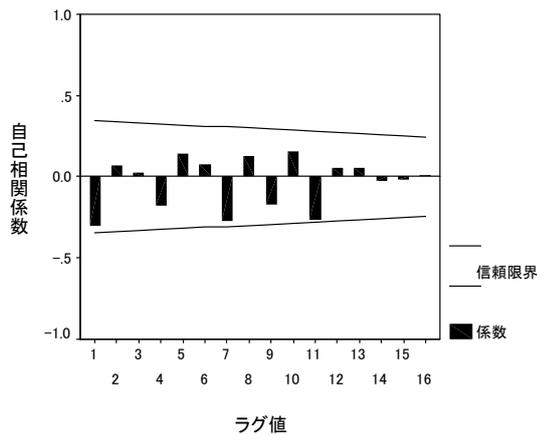


図-6.3 自己相関係数のプロット

2) 周期性の抽出

図-6.3に年周期の自己相関係数を示す。4, 7, 11年に周期性が認められた。ただし、4年周期は、信頼性が低かった。この結果は、図-6.1での判読結果と同様の結果となった。

3) 季節変動性の抽出

図-6.4に水位データに共通する季節変動性を示す。季節変動に由来する周期は、4, 7, 9月に月平均水位が高くなる特性があった。水位は10月から減少を始め、1~2月頃、再度上昇する特性があった。

4) 月平均水位・月平均標準偏差による各年の分類

表-6.1に月平均水位・月平均標準偏差による各年の分類結果を示す。水位変動特性から、3つに分類する

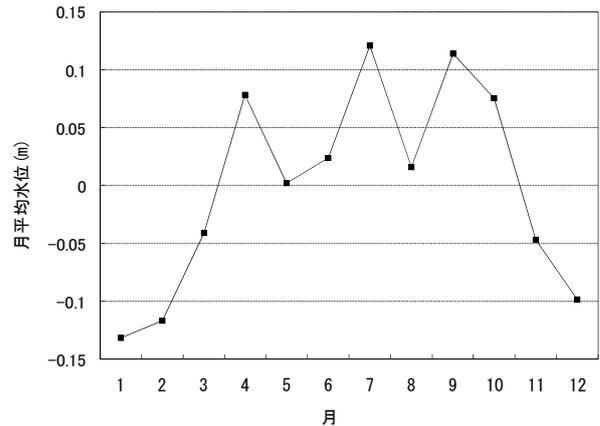


図-6.4 季節変動性のプロット

ことができた。図-6.5に代表的な年の水位変動特性を示す。タイプ1は、年間を通じた平均水位は平均的で、出水が多発しない。タイプ2は、年間を通じた平均水位が高く、出水が多発する出水年タイプであった。出水は、季節変動性で認められた7月、9月近傍で大規模な出水が発生する平水年タイプであった。タイプ3は、年間を通じた平均水位は低く出水が多発しない。出水は、季節変動性で認められた7月、9月近傍で大規模な出水が発生する渇水年タイプであった。

5) 各年特性の月平均水位の変動特性

図-6.6に各タイプの水位データを各月で集計した箱ひげ図を示す。各タイプともに各月の平均水位は図-6.4に示す季節変動性に類似していた。季節変動特性を維持したまま、各タイプの水位特性に応じて上下に

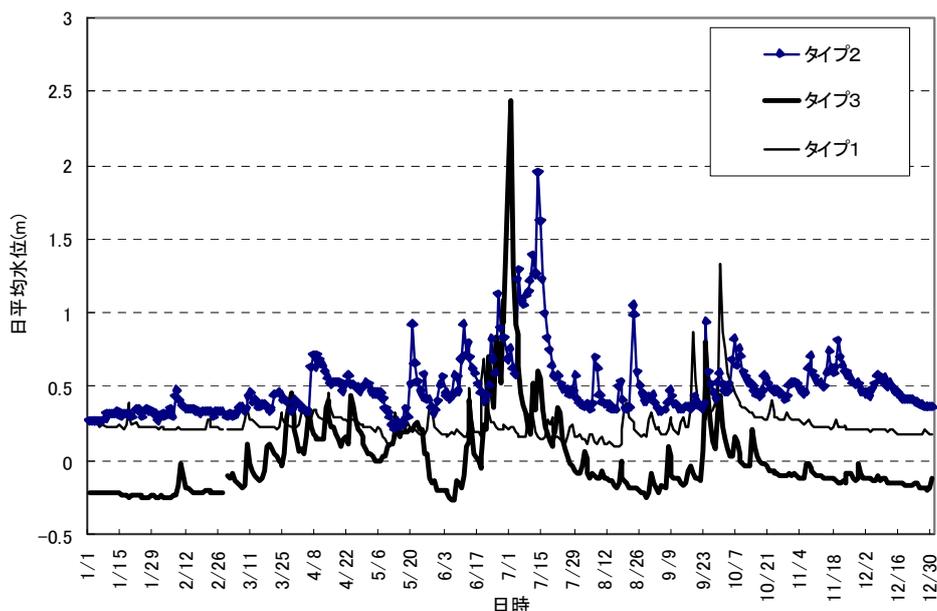


図-6.5 各年特性の代表的な水位変動特性

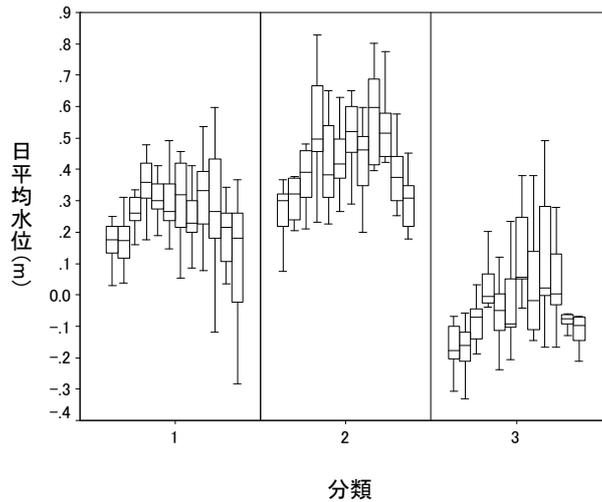


図-6.6 各年特性の月毎の水位変動特性

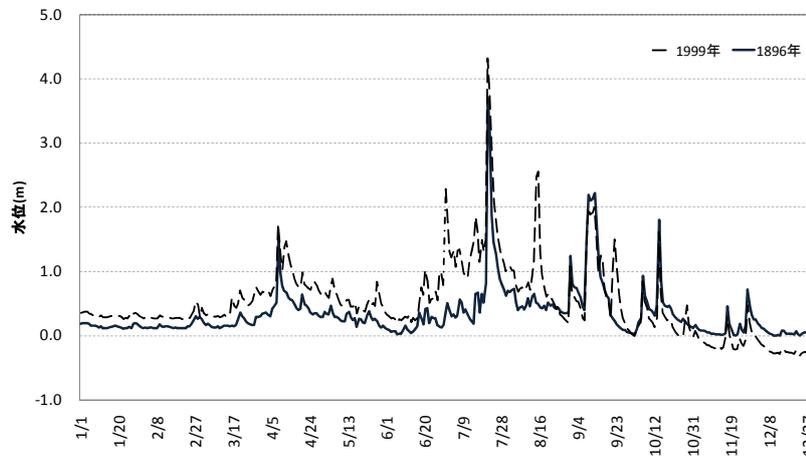


図-6.7 1896年と1999年の水位時系列の比較

オフセットするような状態であった。また、各タイプにおける月毎の水位変動特性も明瞭に異なっていた。特に、顕著な違いを示したのは、出水が多発する4月の水位変動特性である。例えば、タイプ2は4月の変動が大きい、すなわち出水が多い傾向があった。また、タイプ3では、出水が多発する時期の変動が大きい特性があった。

6) 典型性を用いた1896年の信頼性の検証

1896年の年特性は、1975年を起点に考える周期性と、4月に中規模な出水がある1896年の水位変動特性から考慮するとタイプ2の周期である可能性が高い。このため、タイプ2の年特性と比較を行った。図-6.7に1896年と1999年の日水位データの比較を示す。4月、6月、9月の主要な時期の出水のタイミングは、良好な合致を示した。

6. 4 考察

6. 4. 1 典型性抽出への時系列解析の可能性

本研究で行った時系列分析、K-平均法などの統計解析を併用することで、より正確な典型性を抽出することが可能であると考えられる。

本研究で用いた自己相関係数は、時系列データの中に隠された周期を特定することまでしか出来ない。図-6.1では、1975年をスタートにして、明瞭な周期性を持ち、時系列が変動するが、タイプ2からタイプ1への移行を何年にするかは、判断が難しい。自己相関係数を見れば、5年か7年かは推定できるが、断定的には判断できない。また、図-6.1のように明瞭な変化点が時系列データの中にある場合がある。この場合には、周期をカウントする始点をどこにするかは、大きな問題である。

しかし、統計的な分類は、この判断を助ける。自己相関係数により、その周期が明瞭になることは、時系列データの中にある年特性の数を示唆する結果とな

る。この個数を目標にK-平均法など、特定数の集団への分類を加えることで、周期の中に含まれる年をより明瞭に特定でき、年特性の抽出につながった。この点は、本研究で提案できる有用な方法であると考えられる。

また、年特性に属する年が特定できれば、年特性内に属する年の日水位変動の特徴がより明瞭に把握できる。更に季節変動性を年特性に照らし合わせれば、一般的な季節変動と年特性の違いがより明瞭に把握できる。

6. 4. 2 時系列分析で抽出できる典型性の普遍性

図-6.7の結果が示すように、本研究で抽出した典型性は、1896年のような過去データの検証に有用と考えられた。1896年は、年特性の周期性から、タイプ2に該当すると考えられるが1896年と1999年は4月出水の発生や7月下旬の出水などと主要な部分は合致している。

しかし、7月中旬、8月中旬などの水位上昇は合致していない。つまり、時系列解析、統計解析による典型性抽出には、一定の限界があると考えられる。千曲川の場合、梅雨前線に低気圧が重なる場合か、台風の通過による降水が6~9月まで頻繁に見られる。このような場合、出水の時期、出水の規模は、確率的に変動し、良好な合致は得られないと考えられる。これらの部分に「典型性」の信頼解析は利用できないが、他の一般的な水位時系列には、この方法は利便性が高いと考えられる。

6. 4. 3 典型性を今後の河川環境管理に活かすための考察

今後、河川環境の保全をより定量的に進めたいというニーズが強まると考えられる。その場合、河床変動計算などの数値計算が有効な手法と考えることが出来るが、その時、入力条件となる流量条件は、その変動を考察する上で、極めて重要な要素となる。しかし、既存の方法では、過去の流量時系列をそのまま適用することが多い。この方法では、長い流量時系列で計算すれば、典型性にに基づいた一定の成果を得られると考えられるが、将来予測には適さない部分が多い。例えば、過去の流量時系列では、過去の変動シナリオに検討が限定されるなど、初期の定着条件が重要となる生物群集などの予測計算には不向きな部分も多い。

一方、本研究で扱った典型性に基づき出水シナリオを作る場合には利点がある。それは、事業を検討する

対象河川で今後生じうる流量時系列を、河川改修検討時の状況にあわせて作れる利点がある。高水敷の切り下げを行う時点を基準として周期性を判断し、今後、どのような年特性が生じうるかなどの検討に利用できると考えられる。本研究で提案する手法は、今後、本格化する自然再生事業やアダプティブマネジメントで、有用な手法になると考えられる。

6. 5 まとめ

河川の流量変動を抽出するため、時系列解、統計解析を併用し、流量変動（水位変動）の典型性を抽出する手法を提案した。同時に、抽出した典型性の時間的普遍性を、明治の水位変動データを用いて検証した。

その結果、各年の水位変動特性から、各年の水位変動を類型化し、類型化されたグループの典型的な水位変動時系列をより正確に抽出することが可能となった。また、抽出された典型性は時間的な普遍性を持っていると判断できる類似性を持っていた。

本研究で提案した手法による典型性は、一定の普遍性を持っていた。年特性が一致すると考えられる1896年の日平均水位時系列と比較した結果、年特性に特有の特徴を1896年でも確認することが出来た。

7. おわりに

本研究では、過去の河川生態系の状況を推定した上で、現在と比較し、河川環境保全目標を明確に設定するための手法開発を目指した。このために、河川生態系に影響を与える地形・流況、流域における窒素投入量の歴史的变化の推定や及び水位変動の典型性を文献資料から推定する方法を開発した。

2~4章では、千曲川・豊川を対象に、地理情報システム（GIS）、水理計算を用いて明治・大正期の地形・流況を再現するシステムを開発した。その結果、明治・大正期のみお筋は網状に流下し、陸域に氾濫しやすい特性があり、その氾濫域は魚類避難場提供等の機能を有していたことが明らかになった。同様に豊川では上記システムを利用し、明治と現在の河川・水田のNWの構造は差異を抽出し、その結果、過去の河川・水田のNW構造は分岐する回数が少なく魚類が水田と接続していない水路へ迷入する回数がないなどの特徴が推定できた。

5章では、過去の大正期と平成の窒素投入量の比較を行い、水田への窒素投入量は現在の約1/10、畑地への窒素投入量は現在の約1.4倍の窒素投入量が明らかになった。

6章では、水位変動の典型性を抽出した結果、対象河川の水位変動特性の典型性を抽出することに成功し、その典型性は明治期の水位変動と概ね合致し、一定の普遍性を持っていることが明らかになった。

本研究で取り組んだ研究結果は、定性的な比較で終わることが多かった過去と現在の河川生態系比較をより定量的に比較することを可能とした。

この発展は、自然再生事業などの効果の向上、実施内容の重点化などに貢献すると考えられる。従来の自然再生事業などでは、「昔の河川生態系は良かった」というイメージが先行し、河川生態系保全のための実施項目が総花的になることが多かった。

しかし、本研究の方法は、過去の河川生態系像をより明瞭に推定し、過去と現在の河川生態系の違い、その違いを特徴づけるシステムの抽出を可能とする。本研究で実施した内容を基本に、過去の河川生態系の情報復元領域の拡大、開発した技術を発展させることにより、今後より重点・効率化が求められる自然再生事業に、具体的な河川環境修復目標を提示することが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 鷺谷いづみ・矢原徹一：保全生態学入門—遺伝子から景观まで，文一総合出版，1998
- 2) David O'Sullivan and Daivid J.Unwin: Geographic Information Analysis pp.356-380, JHON WILEY and SONS, Inc 2003
- 3) 高木幹雄・下田陽久：新編 画像解析ハンドブック pp1228-1259, 東京大学出版会, 2004
- 4) 間瀬茂・武田純：空間データモデリング空間統計学の応用，共立出版， pp. 136-159, 2001
- 5) 千曲川・犀川治水史研究会編：千曲川一世紀の流れ 明治26年測量図と今，信濃毎日新聞社，2003
- 6) B.Spinewine and Y. Zech: An ex-post analysis of the German Upper Rhine: data gathering and numerical modeling of morphological changes in the 19th Century, pp.57-68, J. Flood Risk Management, 2008
- 7) アーミーア・ラザビ，ESRI ジャパン株式会社訳：VBAによるArcGISプログラミングガイド，pp. 57-67, トムソンラーニング 2003
- 8) 土木学会水理委員会，水理公式集改定委員会，水理公式集例題プログラム集編集部：水理公式集例題プログラム集，pp. 18-pp19, 社団法人土木学会，2002.
- 9) 近畿大学文芸学部文化学科：豊川市当古の民俗，pp. 20-28, 1996.
- 10) 新編豊川市史編集委員会編：新編豊川市史第6巻（資料編）[上]，豊川市，2003
- 11) 綾史郎，紀平肇，松波由佳，井田康夫：河川の水流量の周年/経年変化と河川生態環境，河川技術に関する論文集，Vol. 6, pp. 77-82, 2000
- 12) 河川環境管理財団：わんどの機能と保全・創造 ～豊かな河川環境を目指して～，pp95-111, 2001
- 13) 紀平肇：淀川・楠葉ワンド群の干しあげとその再生，淡水魚保護，pp63-65, 1989
- 14) 綾史郎，河合典彦，小川力也，紀平肇，中西史尚，竜門俊次：淀川における水位の変化と魚類の産卵行動，河川技術論文集 Vol. 10, pp333-pp338, 2004
- 15) WEIGEL B. M., LYONS J. and RASMUSSEM P.W.: Fish Assemblages and biotic integrity of a highly modified floodplain river, the upper Mississippi and Large relatively unimpacted tributary the lower Wisconsin, River Res. Applic.22:pp.923-936,2006
- 16) Larned S. T., Hicks D. M., Schmidt, J., Davey, A. J. H., Dey K., Scarsbrook M., Arscott D. B., Woods, R. A.:The Selwyn River of New Zealand: a benchmark system for alluvial plain rivers, River Res. Applic. Vol.24, pp.1-21, 2008
- 17) 傳田正利，天野邦彦，辻本哲郎：一時的水域の魚類群集多様性向上への寄与とそれを支える物理環境に関する研究，土木学会論文集 G, pp. 340-358, Vol. 62, No. 3, 2006.
- 18) 傳田正利，對馬孝治，時岡利和・天野邦彦・辻本哲郎：千曲川におけるギンプナの産卵行動と一時的水域の物理特性との関連性評価，水工学論文集，第50巻，pp. 1465-1470, 2006
- 19) 傳田正利，天野邦彦，辻本哲郎：物理生息場モデルを用いた一時的水域内の物理環境特性が魚類生息に与える影響の評価，水工学論文集，第51巻，pp. 1297-1302, 2007
- 20) 島谷幸宏，今村正史，大塚健司，中山雅文，泊耕一：松浦川におけるアザメの瀬自然再生計画，河川技術に関する論文集，Vol. 9, pp. 451-456, 2003
- 21) 庄建治朗，富永晃宏：歴史洪水資料を用いた琵琶湖の洪水頻度分析，水工学論文集，Vol. 48, pp. 97-102, 2004
- 22) 庄建治朗，長尾正志，富永晃宏：古記録を用いた歴史時代における瀬田川疎通能力の検証水工学論文集，Vol. 45, pp. 1-6, 2001
- 23) 高島和夫，村田文人，早川典生：信濃川実績洪水群の降雨特性からみた横田切れの洪水規模の検証，水工学論文集，Vol. 49, pp. 13-18, 2005
- 24) 傳田正利，天野邦彦，原田守啓：GIS・画像解析シス

- テムを用いた過去の河川氾濫状況再現手法の開発, 土木情報利用技術論文集 Vol. 17, 2008
- 25) 明野和彦, 星野秀和, 安藤暁史: 旧版地図を利用した時空間データセットの試作, 国土地理院時報 No. 99, pp89-102, 2002
- 26) 千曲川・犀川治水史研究会編: 千曲川一世紀の流れ 明治 26 年測量図と今, 信濃毎日新聞社, 2003
- 27) 辻本哲郎, 永禮大: 魚類生息環境変質の評価シナリオ, 水工学論文集, Vol. 43, pp. 947-952, 1999
- 28) 近畿大学文芸学部文化学科: 豊川市当古の民俗, pp. 20-28, 1996.
- 29) 新編豊川市史編集委員会編: 新編豊川市史第 6 巻 (資料編) [上], 豊川市, 2003
- 30) 土木学会水理委員会, 水理公式集改定委員会, 水理公式集例題プログラム集編集部会: 水理公式集例題プログラム集, pp. 18-19, 社団法人土木学会, 2002
- 31) TUKAMOTO K., KAJIHARA K.: 魚類の遊泳行動, 月刊海洋科学, Vol. 15, NO. 4, pp. 176-177, 1983
- 32) 辻本哲郎, 田代喬, 伊藤壯志: 生活圏の連結性に着目した魚類生息環境評価法の提案と河道内微地形の役割評価, 河川技術に関する論文集, Vol. 6, pp. 167-172, 2000
- 33) 真田誠至, 藤田裕一郎: 水系の連続性を考慮した魚類生息空間評価に関する調査, 水工学論文集, Vol. 46, pp. 1157-1162, 2002
- 34) 田代優秋, 上月康則, 佐藤陽一, 大久保美知子, 村上仁士: 都市近郊農業水路の魚類群集に及ぼす水路構造と河川との連続性の影響, 水工学論文集, Vol. 50, pp. 1219-1224, 2006.
- 35) 島谷幸宏, 今村正史, 大塚健司, 中山雅文, 泊耕一: 松浦川におけるアザメの瀬自然再生計画, 河川技術に関する論文集, Vol. 9, pp. 451-456, 2003.
- 36) 傳田正利, 天野邦彦, 原田守啓: GIS・画像解析システムを用いた過去の河川氾濫状況再現手法の開発, 土木情報利用技術論文集, Vol. 17, pp. 249-256, 2008.
- 37) 傳田正利・天野邦彦・原田守啓: 過去の河川氾濫状況の定量的復元と氾濫原が有していた魚類避難場の機能検証, 水工学論文集, Vol. 53, pp. 1195-1200, 2009.
- 38) 大林淳男監修: 定本 豊川の歴史 母なる川 —その悠久の歴史と文化—, 郷土出版社, pp. 182-199, 2002.
- 39) 愛知県東三河農林水産事務所: 県営かんがい排水事業松原用水地区・松原用水第 2 地区 概要書, 2003
- 40) 農業土木学会古典復刻委員会編: 農業土木古典撰集 6 巻 農業土木実用教科書, 日本経済評論社, pp. 93-177, 1989.
- 41) 伊里正夫・白川功・梶谷洋司・篠田庄司: 演習グラフ理論 基礎と応用, コロナ社, pp133-175, 1983
- 42) 玄光男・林林: ネットワークモデルと多目的 GA, pp47-88, 共立出版, 2008
- 43) 片野修・斎藤憲治・小泉顕雄: ナマズ *Silurus asotus* のばらまき型産卵行動, 魚類学雑誌, pp203-211, 1988
- 44) 近畿大学文芸学部文化学科: 豊川市・当古の民俗, pp. 67-68, 1996.
- 45) 水谷正一編著: 水田生態工学入門 - 農村の生きものを大切に—, 農文協, pp100-111, 2007
- 46) 國松孝男・村岡浩爾: 河川汚濁のモデル解析, pp. 50-68, 技報堂出版, 1994.
- 47) 近畿大学文芸学部文化学科: 豊川市当古の民俗, pp. 14-34, 1996.
- 48) 大林淳男監修: 豊川 母なる川—その悠久の歴史と文化, pp. 94-117, 郷土出版社, 2002.
- 49) 愛知県農会編・発行: 農家経済調査: 昭和 3 年度, pp. 183-218, 1930.
- 50) 愛知県農会編・発行: 農家経済調査: 昭和 8 年度, pp. 147-184, 1935.
- 51) 愛知県農会編・発行: 愛知の農業, 1929.
- 52) 野口弥吉・川田信一郎: 第 2 次増訂改版 農学大辞典 pp. 1498-1501, 養賢堂, 1987.
- 53) 奥田東著: 第 2 次改著 肥料学概論, pp. 1316-1317, 養賢堂, 1960.
- 54) 愛知県農会編・発行: 愛知の農業, 1929.
- 55) 愛知県豊川市生活活性部農務課編・発行: 平成 18 年度豊川市の農業概要, p. 16, 2006.
- 56) 愛知県編・発行: 農作物の施肥基準, pp. 3-152.
- 57) 近畿大学文芸学部文化学科: 豊川市当古の民俗, pp. 20-28, 1996
- 58) BUNN, S. and ARTHINGTON, A.H: Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Biodiversity, Environmental Management Vol.30,No.4, pp.492-507, 2002.
- 59) POFF, N.L. ALLAN, D., BAIN, M. , Karr, J., PRESTEGAARD, B., RICHTER, B. SPAREKS, R. and STROMBERG, J. : The Natural Flow Regime, A Paradigm for river conservation and restoration, Bio Science, Vol.47, No.11, pp.769-784, 2002.
- 60) 藤田睦博・神田徹: 土木学会編 新体系土木工学 Vol. 26, 技報堂出版, 1982.
- 61) 神田徹・牧龍一郎: ショット・ノイズ過程の流量時系列への適用, 土木学会関西支部年次講演会講演概要, 1981.

62) 千曲川河川事務所;建設省北陸地方整備局編, 千曲川犀
川 三十年のあゆみ, 山海堂, pp. 35-38, 1980.

63) 土木学会水理委員会編 : 水理公式集, 土木学会,
pp. 77-78, 1999.

64) 国友直人・山本拓 : 時系列モデル入門, 東京大学出版
会, 2004.

【英文要旨】

Development of restoration methods of past environment situation using aerial photograph etc.

For comparison between past and present status on the ecosystems and setting the purpose of river ecosystems, we developed methods which can estimate river morphology, distribution of water depth, current velocity, nitrogen load and pattern of water level fluctuation in past.

We have assessed the difference of flooding condition to estimate the available refuge area during floods. Fish refuge area decreased from 1820s to 1960s. In particular, after two hours from the beginning of flood, the formation process of the fish refuge remarkably differed between past and present status.

The amount of nitrogen load derived from agricultural activities in 1928 and 1932 was estimated by analyzing agricultural information recorded in previous literatures. The amounts of nitrogen load from paddy fields and farms were about 1/10 and 1.4 compared with that in 2006, respectively. These results indicate that it is able to estimate the previous nitrogen load by detailed analysis of agricultural information recorded in past literatures.

We attempted to extract pattern of water level fluctuation by using time series analysis of water level data from 1975 to 2006. In the results, universality of the pattern was examined by comparing with water levels in 1890s. The results showed that time series analysis were able to extract the pattern. Particularly, flooded periods and seasonal variation of flow rate were well extracted and the pattern was very similar to in 1890s. However, we were not able to find similar patterns in the scale of floods between two periods because the flooded scale depended on stochastic variation.

Past environment of status, River ecosystem, Geographical Information System, Hydraulic simulation, Physical Habitat Simulation Model