

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

Development of reproduction methods of Past River flooding condition using GIS and image analysis system

傳田正利¹・天野邦彦²・原田守啓³

Denda Masatoshi, Amano Kunihiko, and Harada Morihito

抄録：過去の河川生態系の状況を推定するために、その初期段階として過去の物理環境情報、特に河川の氾濫状況を定量的に再現するシステムを開発した。開発したシステムは、大正期の旧版図、河道内測量結果をGIS、画像解析及び数値計算を用いて効率・定量的に過去の氾濫状況を再現するのが特徴となっている。開発したシステムで再現した大正12年の歴史的洪水の計算結果と過去の文献資料に残る痕跡水位の傾向は概ね合致し、システムの有効性を示す結果となった。本システムは、河川生態系を構成する物理環境復元を通じて、過去の生物群集の生息状況を推定するのに有効な手法・システムである可能性が示唆された。

Abstract: To estimate condition of river ecosystem in past, we developed a system which quantitatively reconstruct physical environment information and river flooding condition. The system have characteristic which reconstruct river morphology and flooding condition from topographic map and measurement of river channel morphology, using Geographic information System (GIS), image analysis and numerical simulation. The water lever of river flood condition in 1892 which is reconstructed by the system matched with the result of water level recorded in past document. The result indicated the efficiency and possibility of the system in river ecosystem restoration project.

キーワード：河川生態系, GIS, 画像解析, 氾濫計算

Keywords : past environment, river ecosystem, Geographical Information System, Image analysis, flooding simulation

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てしまったのかな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る。

河川改修での必要性から、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、

1 : 正会員 博士(工)独立行政法人土木研究所水環境研究グループ河川生態チーム 研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 Tel:029-879-6775)

2 : 正会員 博士(工)独立行政法人土木研究所水環境研究グループ河川生態チーム 上席研究員

3 : 正会員 修士(工) 岐阜大学大学院 工学研究科 博士後期課程 生産開発システム工学専攻

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となると考えられる。

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、本研究では、河川氾濫原の物理環境再現手法を開発する。

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、有効な研究成果・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向性を議論することを目的とする。

2. 研究の方法

(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-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・戦後で大きな変貌と遂げた流

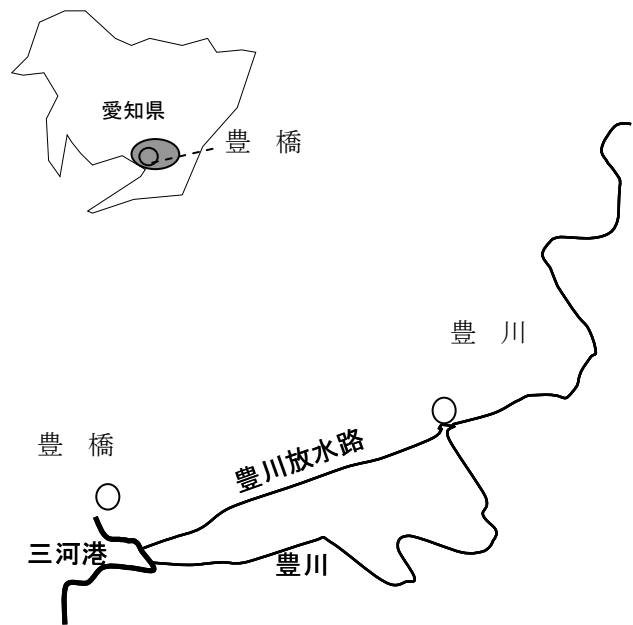


図-1 調査地の概要

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連続した堤防で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形式である。

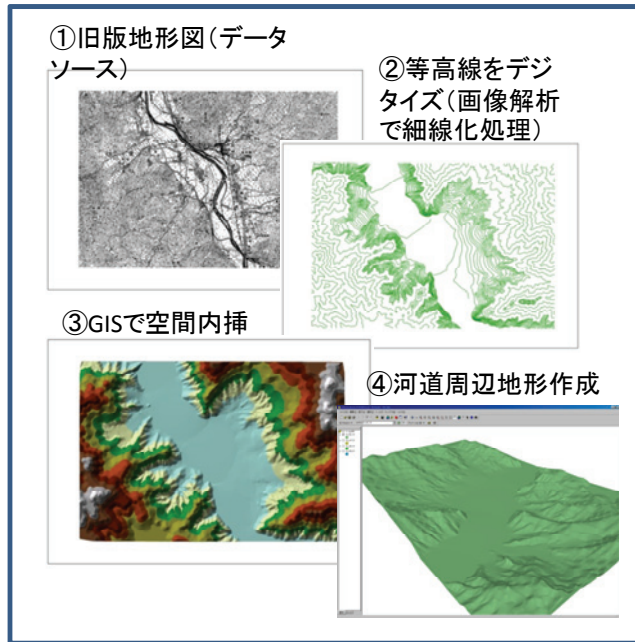
この豊川は、1960 年代に大きな変化を遂げた。それは、霞堤の連続堤化・豊川放水路の完成による氾濫の減少である。霞堤の連続堤化・豊川放水路の完成は、劇的に洪水氾濫・河川周辺を減少させ、社会基盤の受ける損害を減少させた半面、氾濫原に住む貴重な生物群集の低減などが確認されている。

(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

a) 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

サブシステムA: 河道周辺地形の再現



サブシステムB: 河道内地形の再現

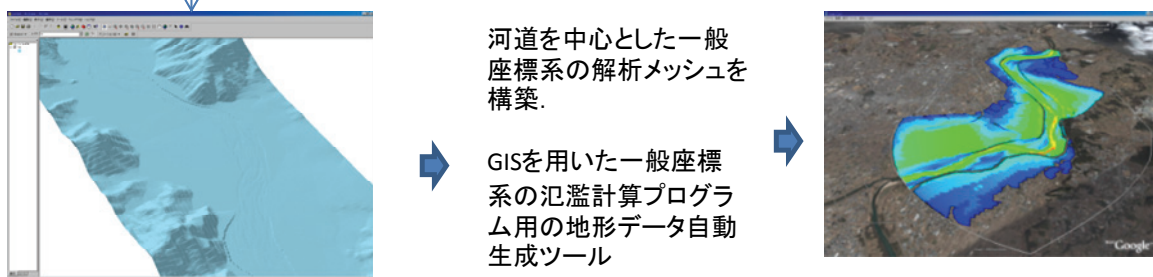


図-2 システムのブロック図

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。

b) 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 に示すアプリケーションを組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-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の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。

c) 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。

d) 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。

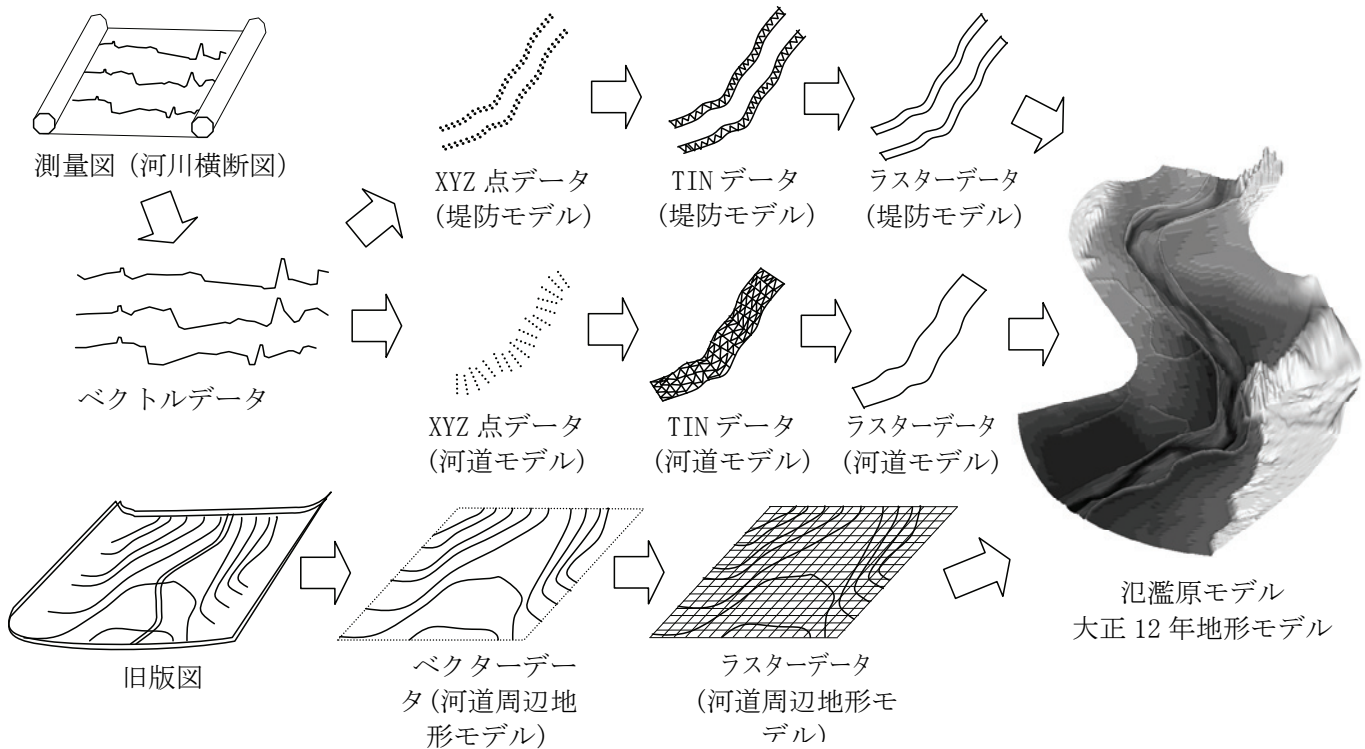


図-3 地形作成手順の詳細

豊川市史まとめられた「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=30.3cm、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最近隣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。

3. 結果

(1) 河道地形再現結果

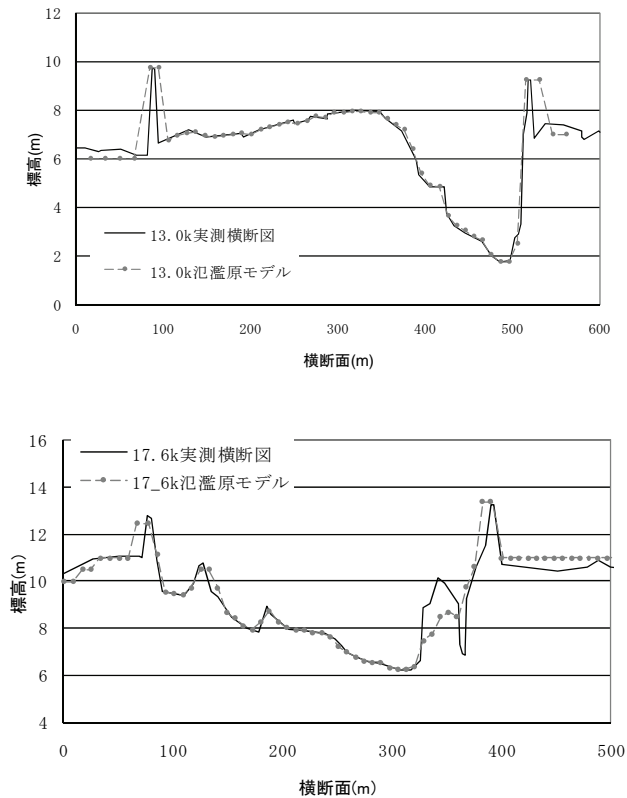


図-4 横断面 13.0km における大正 12 年の測量結果と河川地形及び河道周辺地形モデルの比較

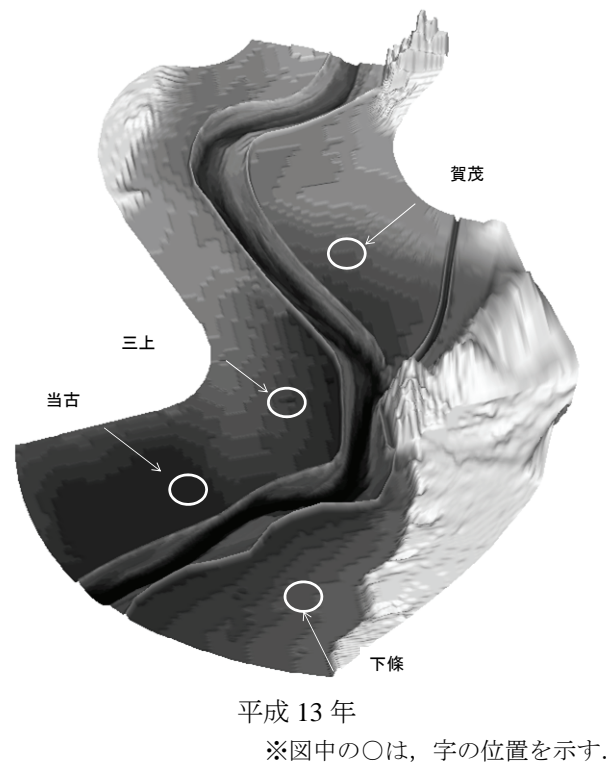
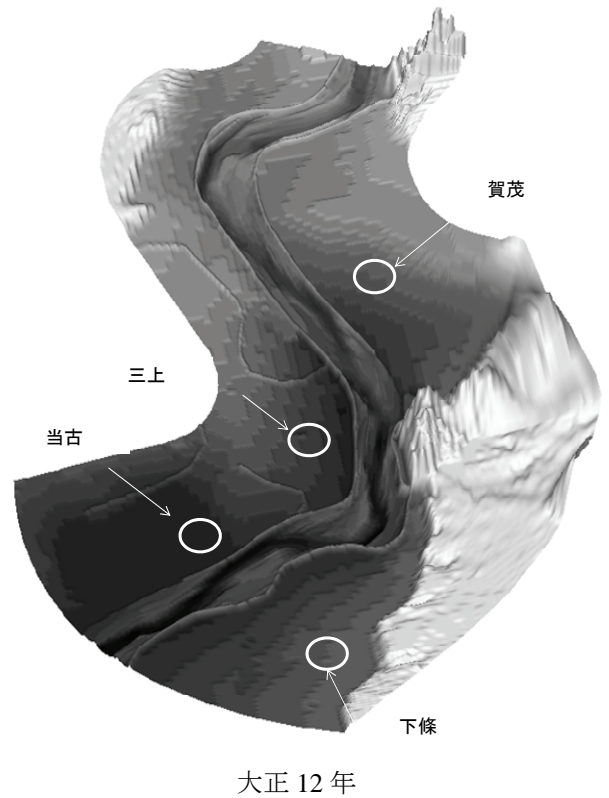


図-5 大正 12 年と平成 13 年の河道周辺地形及び河道内地形モデルの概要
※図中の○は、字の位置を示す。

横断面 13.0km 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-4 に、図-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-4, 図-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, 霞堤の切り欠き部の形状, 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好に再現できた. また, 豊川及び支川(間川)の連続堤部



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-6 氾濫状況再現結果

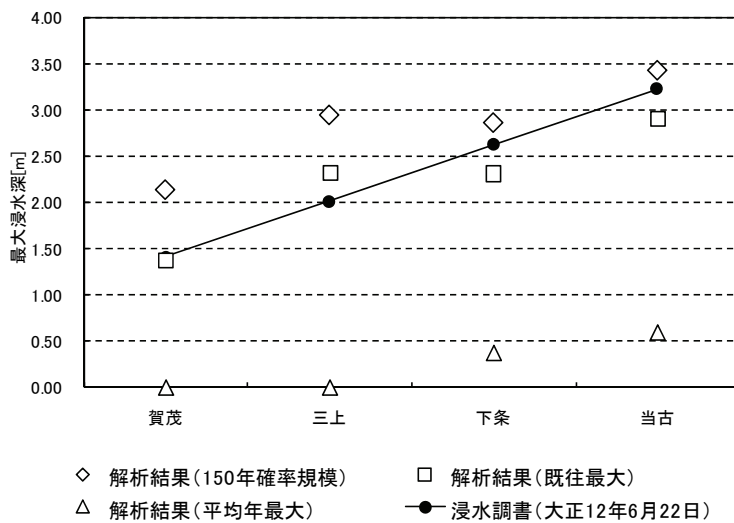


図-7 過去の床上痕跡水位による計算結果検証

分も良好に再現できた結果となった。

(2) 氾濫時の流況再現の結果

図-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可能性が高い。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。

(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-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に比較を示す。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。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。

4. 考察

(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-6, 図-7)。計算結果の水位が解析地域全体に分散する主要な痕跡水位に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の可能性を示している。

本研究では計算実施はしていないが、大規模な出水が良好精度で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) 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-6)。しかし、より過去の氾濫状況を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が進まない流域と判断し、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。

(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があったのか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)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。

まとめ

過去の河川地形を復元すると共に水文状況を整理し、

さらに水理計算を組み合わせることで、仮想的に過去の河川環境復元を行った。単に画像的な比較を行うのみではなく、水理計算を行うことにより出水時の氾濫状況や水理量(水位, 流速, せん断力等), 河川生態系を評価する上で重要な物理環境指標をダイナミックに復元することが出来た。本手法を用いることで、過去の河川の物理環境が河川に生息する生物に対して有していた機能を定量的に評価できると考えられる。

このような機能の過去からの変遷を評価することで、将来の河川環境保全・修復の方向性を示すことが可能となる。

謝辞: 本研究では、貴重な過去の河川測量資料の閲覧・複製を許可していただいた国土交通省中部地方整備局豊橋河川事務所, 文献調査にご協力いただいた愛知県図書館, 豊川市立図書館, 国立国会図書館筑波分室の職員の方々には、調査期間中、様々な面で便宜を図っていただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 鷲谷いづみ・矢原徹一：保全生態学入門—遺伝子から景観まで，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 pp.1228-1259, 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会：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 卷（資料編）[上],豊川市,2003