

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

QUANTITATIVE RECONSTRUCTION OF PAST FLOOD CONDITION AND VERIFICATION OF FISH REFUGE FUNCTION OF PAST FLOODPLAIN

傳田正利¹・天野邦彦²・原田守啓³

Masatoshi DENDA, Kunihiko AMANO and Morihiko HARADA

¹正会員 博(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)

²正会員 博(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
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³正会員 修(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
(〒501-1112岐阜県岐阜市柳戸1番1)

This study quantitatively reconstructed past flooding condition by GIS and hydraulic simulation, and compared differences of flooding condition between past and present. We have assessed the difference of flooding condition to estimate the available refuge area during floods. Fish refuge area decreased from 1920s 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. Construction of continuous levees influenced this change. For restoration of fish refuge equivalent to the condition, the results of this study indicate that various flood condition and ecological network between main channel and tributary stream are needed.

Key Words: *flooding condition, hydraulic simulation, Geographic information system, fish refuge*

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^{1)~6)}。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^{7)~9)}。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¹⁰⁾。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。

過去資料の分析による歴史的洪水規模の検証や、河川の疎通能力検証, 洪水頻度分析などを行う既往研究は^{12)~14)}、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再現の復元に焦点をあて、その方法論の開発に概ね成功した¹⁴⁾。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¹⁵⁾。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¹⁶⁾。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。復元した過去の流況に物理生態場モデルを適用することにより、過去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¹⁷⁾。

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。

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、段戸山(標高 1,152m)から流下し、三河湾へ流入する流域面積 724km²、幹川流路延長 77km の1級河川である(図-1)。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、現在とは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を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。なお、図-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。

豊川は、河川改修によりその特性が大きく変化した

河川である。豊川流域は、急峻かつ細長い形状であると同時に、降雨時には時間降水量が多い。そのため、河況係数が大きく氾濫が多かった。霞堤は、今も間川に現存し、出水時には氾濫域を形成する。しかし、豊川は、1960年代に大きな変化を遂げた。河道周辺へ氾濫を許容する治水形式を改良し、豊川放水路の建設、霞堤の連続堤化による治水形式で改修が行われた。その結果、豊川流域、特に、下流域での堤内地への氾濫は著しく減少した。これにより、河川周辺農耕地への氾濫が減少し農業生産が安定した反面、魚類移動の連続性などは減少したと考えられる。

(2) 過去の地形復元の方法と地形変化の概観

本研究では、過去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: 不整形三角形網)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¹⁸⁾¹⁹⁾。

次に、過去河道内地形の作成を行った。河川横断面図をデジタル化した。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、その特徴に合わせて内挿計算を行った。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河道内地形の変遷を把握

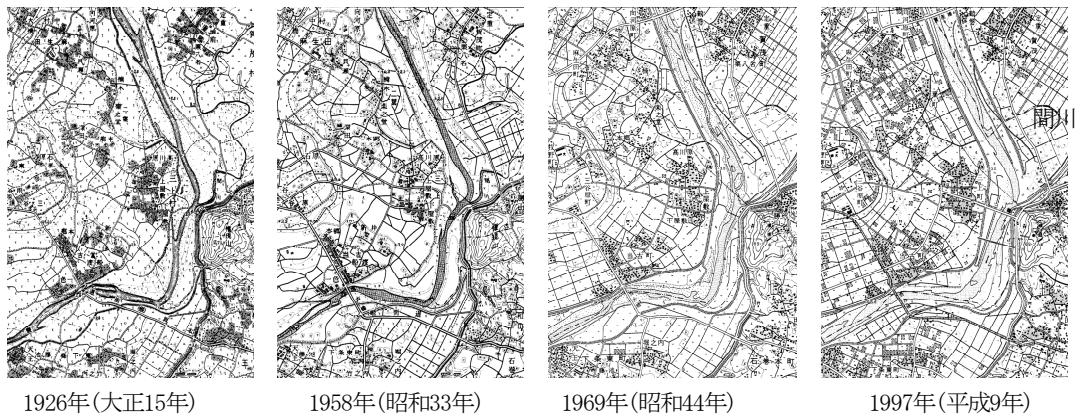


図-1 調査地の変遷(旧版図、地形図の比較)

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) 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。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い平面2次元流解析プログラムを用いて非定常計算を行った²⁰⁾。

平面流計算の粗度設定は、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 $20 \times 20\text{m}$ 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 $945\text{m}^3/\text{s}$ 、最大流量 $1800\text{m}^3/\text{s}$ 、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、(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た^{14) 18) 19)}。

(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²¹⁾。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⁷⁾。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²¹⁾。

$$BS=10*BL \quad \text{式(1)}$$

ここに

BS：突進速度 (m/s)

BL：体長 (m)

突進速度を求めるため、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代と比較し、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

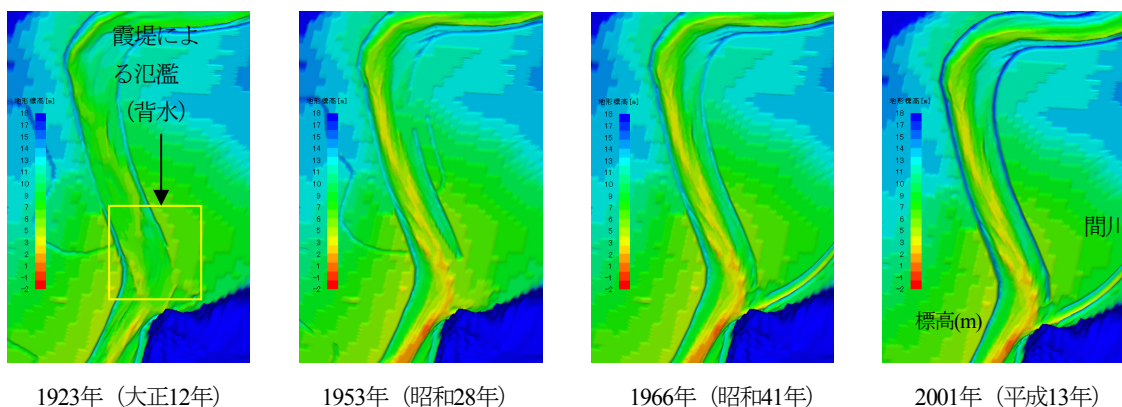


図-2 1923年から2001年までの河川地形変遷

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。

(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)節において計算した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(4)節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㎡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. 結果

(1) 過去の地形復元の方法と地形変化の概括

図-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、比高差が生じた。低水路には、明瞭な交互砂州が形成された。

(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(*Rhinogobius 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。

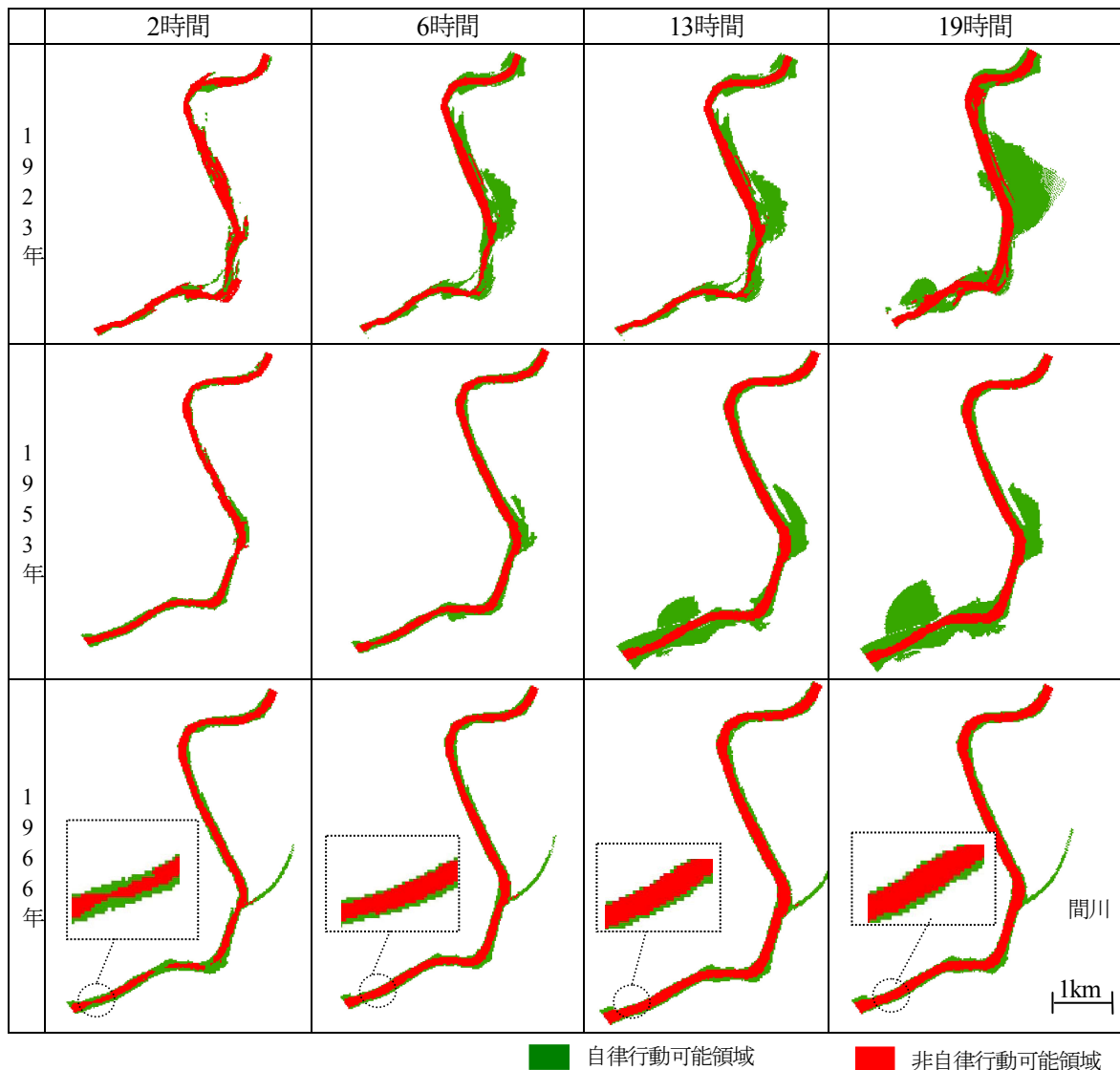
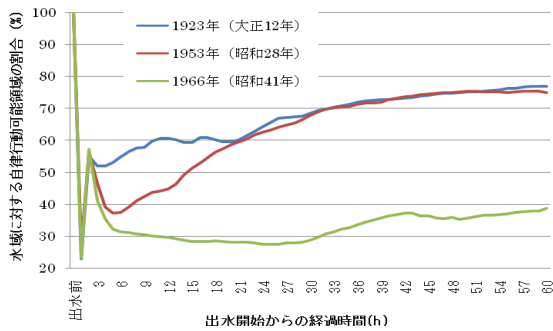


図-3 1923, 1953, 1966年の調査地で氾濫状況比較

■ 自律行動可能領域

■ 非自律行動可能領域



※1923～1966年の出水前は同一値

図-4 水域に占める自律行動可能領域の時系列変化

(3) 自律行動可能領域の空間分布の比較

図-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。

(4) 自律行動可能領域の面積の時系列変化の比較

図-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。

4. 考察

(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, 図-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。

(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）。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-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例を示している。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拡大部）。

(3) 過去から現在かけての魚類避難場機能の低下の代償措置の検討

魚類避難場の機能低下は、反面、河川氾濫の低下を目的とした治水事業の成功を意味している。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。本節では、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代償する可能性が高く、エコロジカルネットワークが一つの代償方法となると考えられる。

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。

5. 結論

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。機能低下の代償方法としては、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。

参考文献

- 1) 綾史郎, 紀平肇, 松波由佳, 井田康夫: 河川の水位・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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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.22:923-936, 2006
- 6) 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
- 7) 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.
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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疏通能力の検証水工学論文集, Vol.45, pp.1-6, 2001
- 13) 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古記録を用いた歴史時代における瀬田川疏通能力の検証水工学論文集, Vol.49, pp.13-18, 2005
- 14) 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 (採択済み), 2008
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 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
- 18) 近畿大学文芸学部文化学科: 豊川市当古の民俗, pp.20-28, 1996.
- 19) 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
- 20) 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
- 21) 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
- 22) 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

(2008. 9. 30受付)