

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

Comparison of aquatic habitat networks between past and present in relation to setting targets for river restoration

傳田正利¹・天野邦彦²・中田和義³

Masatoshi DENDA, Kunihiko AMANO and Kazuyoshi NAKATA

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
(〒305-8156 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所環境研究部 河川環境研究室 室長
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

³正会員 博(水産) 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 専門研究員
(〒305-8156 茨城県つくば市南原1-6)

Using geographic information on cadastral maps in 1890s, we quantitatively estimated structures of the aquatic habitat networks (AHN), which were composed of a river, ditch networks and paddy fields, by Geographic Information System (GIS). Also we quantitatively calculated the current velocities and water depths of the channel networks by hydro accounting and then evaluated the influences of differences of AHN between present and past on the spawning behavior of catfishes. The results indicated that the past AHN had the following characteristics compared with the present one: (1) catfishes were able to move easily into paddy fields from ditches as fragmentation between the ditches and the paddy fields was small; and (2) the frequency of catfish migration into the ditches, which were disconnected to the paddy fields, was lower because there were fewer branch structures of irrigation canals.

Key Words: Historical comparison, Habitat networks, Paddy and ditch network, Cadastral map, Graph theory, Network analysis

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¹⁾。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。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水利利用の変化等による生息域の劣化が指摘されている²⁾。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

体的方策を示す。

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³⁾。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: Geographic 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⁴⁾、魚類避難場の機能変化の評価

を行った⁵⁾。

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。

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）。豊川流域が属する東三河は、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⁶⁾。

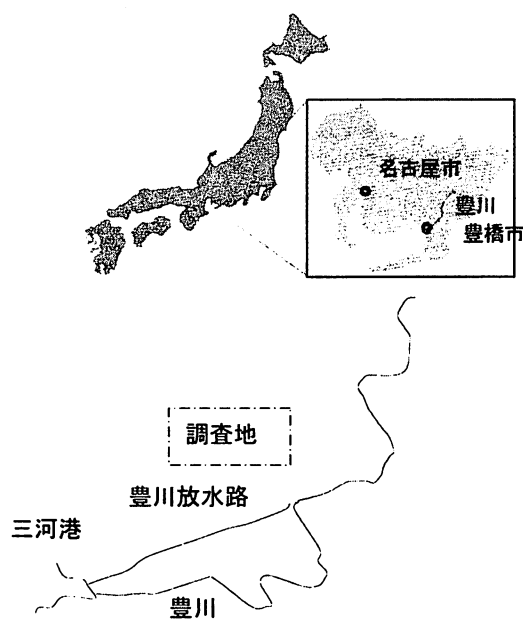


図-1 調査地の概要

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⁷⁾。

(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。

(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

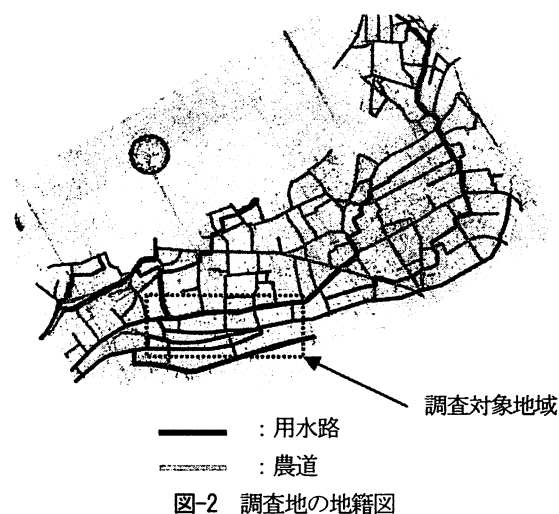


図-2 調査地の地籍図

表-1 水理計算ケースの概要

Case	水位条件	推定根拠	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%	平時時の流況	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

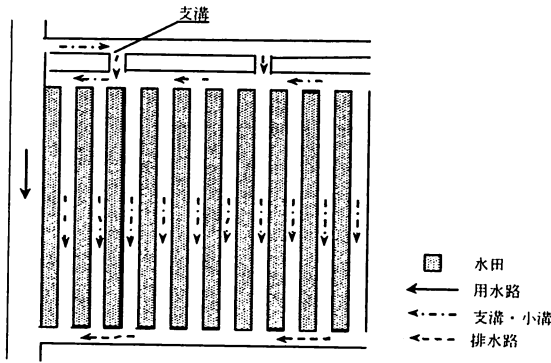


図-3 緩傾斜地での水田・小溝・排水路設置方法⁹⁾

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-2)。

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、地籍図に記録された現在の地形図でも確認される地物(寺社・農道網を参考に、地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⁹⁾。調査地の地形データから、調査地は、図-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が掘るとされ、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) 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、等流計算を用いて行った。計算ケースは、表-1に示す3ケースとした。

a) 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。

b) 過去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 $f=0.005\sim 0.006$ 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。

(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^{9) 10)}。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。

(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¹¹⁾。このため、評価項目としては、①河川や用水路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があるかで評価した。

3. 結果

(1) 現在と過去のNW復元結果の比較

図-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

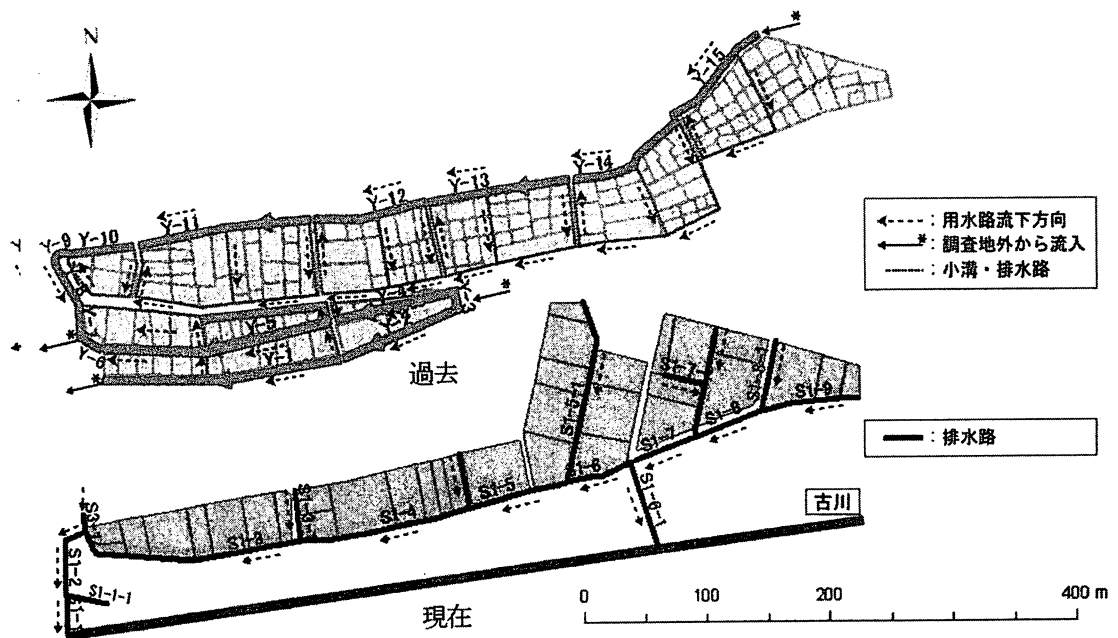


図-4 現在と過去のNWのGISデータ

表-2 現在と過去の水田の面積・個数比較

年	1926	2008
面積(m ²)	234.80	1451.10
標準偏差	157.64	757.92
個数	172	30

表-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	流速	水深	流速	水深		流速	水深	流速	水深	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	0.02	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	0.35	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

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-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。

(2) 現在と過去のNWの水理特性比較

表-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類似した水深であった。

(3) 過去と現在における水路網のNW構造の比較

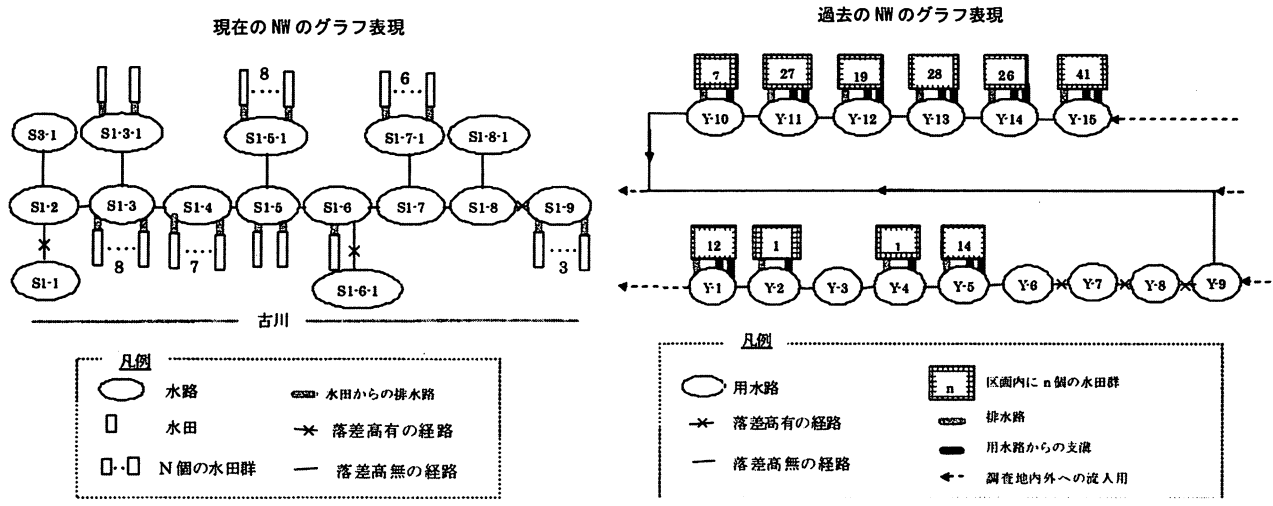


図-5 現在と過去のNWのGISデータ

図-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) 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-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. 考察

(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-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となると考えられる。

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 の分岐数の差である。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。①, ②, ③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。

(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-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ですが、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。

(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、魚類群集多様性保全に何らかの貢献をされると考えられる。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、本研究で指摘したように、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低い排水路に改善を行う必要があると考えられる¹²⁾。

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。

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つ

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。

謝辞：本研究では、貴重な過去の地籍図の閲覧・複製を許可していただいた愛知県公文書館、文献調査にご協力いただいた水土里ネット松原用水の職員の方々には、調査期間中、様々な面で便宜を図っていただいた。城西大学経済学部の山下琢己氏には、地籍図判読、GISデータの作成に尽力いただいた。赤川真弓女史、青木加代子女史には、困難な地籍図判読、GISデータの作成にご尽力いただいた。ここに感謝の意を表す。本研究は、文部科学省科学技術振興調整費「伊勢湾流域圏における自然共生型環境管理技術開発」の一環として実施した。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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
- 8) 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.
- 9) 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, pp. 133-175, 1983
- 10) 玄光男・林林: ネットワークモデルと多目的GA, pp. 47-88, 共立出版, 2008
- 11) 片野修・斎藤憲治・小泉頭雄: ナマズ*Silurus asotus*のばらまき型産卵行動, 魚類学雑誌, pp. 203-211, 1988
- 12) 近畿大学文芸学部文化学科: 豊川市・当古の民俗, pp. 67-68, 1996.
- 13) 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, pp. 100-111, 2007

(2009. 4. 9受付)