

魚類自動追跡システムの現地実証実験と 魚類行動特性の把握

傳田正利¹・天野邦彦²・辻本哲郎³

¹正会員 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番地6)

E-mail:denda@pwri.go.jp

²正会員 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番地6)

E-mail:amano@pwri.go.jp

³フェロー会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科 社会基盤工学専攻
(〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

E-mail:ttsujimoto@genv.nagoya-u.ac.jp

魚類自動追跡システム (Advanced Telemetry System : ATS) の実用性検証のため、千曲川鼠橋地区 (調査地) で実証実験を行った。調査地の受信局配置では、ATSは水中にある電波発信機の位置を電波到来角推定誤差4.05°、調査地では平均誤差約18.93mで位置特定可能であった。ATSで供試魚の行動を追跡した結果、約3分に1回の割合で連続的に155日間魚類行動を追跡し、出水時の追跡にも成功した。平水時には、供試魚は約4000m²を行動圏として活動し主に深部を利用していった。出水時には、供試魚は流量増加に伴う流速変化に対応し、流速の遅い場所を選択し下流への流下を回避することが明らかになった。本研究の結果は、出水時、高水敷が魚類の避難場として機能していることなどを示唆するものであった。

Key Words :telemetry, advanced telemetry system, fish behavior, flush flood

1. はじめに

河川改修等による物理環境改変が生物群集に与える影響を低減するためには、物理環境と生物群集の因果関係を理解する必要がある。生態学では、近年、物理環境と生物群集の関係性・因果関係に関する研究が活発に行われ、「景観生態学」という新たな研究領域を形成している¹⁾。

景観生態学で定義される「景観」は、「無数のスケールがある空間的階層性の中で、最も大きなスケールとしての地球全体と、均一なシステムとしての単位であるエコトープ (ecotope) あるいはパッチ (patch) やコリドー (corridor) の中間に位置する、比較的大きな開放系システム」²⁾と定義される。

景観生態学では、主に、景観を構成する物理環境と生物群集の相互作用、生物群集生息の空間パターンを支配する景観の物理環境などに関して、活発な研究が実施されている。これらの研究成果は、景観の機能を評価する上で、重要な情報となる。

景観生態学の研究成果を、河川事業 (自然再生事

業、多自然川づくり) へ反映していくためには、定性的に表現されることが多い「景観」が有する共通の特性、すなわち「典型性」を定量的に抽出することが望まれる。定量的評価が可能になれば、景観の典型性・機能が持続的に維持される川づくりに役立つ。

景観の定量的な典型性抽出の方法には、様々な取り組み方が考えられる。工学的な取り組みを主とする河川工学分野では、景観の機能の特徴づける物理環境特性の抽出をまず行い、その物理環境特性と生物群集の関係性を把握していくという手順が取組みやすい。このような手順をとることで、物理環境特性を示す指標によって生物群集に対して景観の持つ機能が定量的に評価され、さらにこれを持続的に維持するために必要な指標値が把握できれば、河川改修及び河川管理方策の検討がより具体化される。

例えば、「瀬」という景観が持つ「アユの採餌場」の機能を例とすれば、「瀬」が「アユの採餌場」としての機能を持つために必要な流速、水深などの物理環境特性を定量的に抽出することが著者ら

が目指している「典型性」の定量的抽出である。出水などによる自然攪乱が特徴の河川生態系では、特定の「瀬」は、必ず変化・消失する。そのシステムの中で「アユの採餌場」が消失しないためには、アユの採餌場の機能を支える典型性（物理環境特性）を持つ新たな「瀬」が、河川内に持続的に創出・維持されればよい。新たな「瀬」が創出されるような動的な砂州動態を持つ川づくりが河川工学上の課題となると考えられる。

一方、特定の「景観」に内在するメカニズムを研究する景観生態学では、このような典型性の定量的抽出までは研究対象とされることは少ないため、河川工学への応用を考えた場合に、より定量的な発展が必要と考えられる。また、動的システムである河川を対象に、生態系の保全・復元を実践する河川工学においては、種々の空間スケールを取り扱う必要があるため、スケールを任意に設定しうる新たな景観概念の定義が必要となる。

辻本の指摘する「類型景観」が上記の問題に大きな示唆を与える。辻本は、上述の「景観の典型性」を「類型景観」と定義している。個別性はあるが統計的母集団という視点で同一の「類型景観」を意識し、「類型景観」の特性が維持できる河道計画の必要性を指摘している。この概念は、様々な空間スケールの複合として成立する河川生態系を議論・理解する上では、重要な概念である³⁾。以後、本研究では、「類型景観」の概念を導入し、「類型景観」の用語を用いる。

本研究で対象とする魚類行動、類型景観が魚類生息に果たす役割に関しては、多くの研究が実施されている。魚類行動に関しては、古くは、各魚種の個体レベルの行動に着目し、その行動特性、遊泳能力、行動特性に影響を与える魚類生理に着目した研究が多くされた^{4), 5), 6)}。

また、工学の分野では、横断工作物による魚類移動阻害の低減のため、魚道の開発、その設計手法に関する研究が数多く実施された^{7), 8), 9), 10)}。

近年では、前述した景観生態学の分野を中心に、物理環境の空間的不均質性と魚類生息の因果関係についての研究が多く実施された¹¹⁾。また、本研究で着目した調査手法、テレメトリ法で得た魚類行動に関するデータから読み取った魚類行動特性や、物理環境との関係性に言及した論文などが欧米を中心に多数発表されている^{13), 14)}。

それらの研究の一例として、魚類の生息環境の定量的評価手法の研究事例があげられる。魚類の生息環境の定量的評価手法のひとつに IFIM (Instream

Flow Incremental Methodology) があり、その一部である PHABSIM (Physical Habitat Simulation) は多くの適用例がある^{15), 16)}。PHABSIMは、物理指標（流速、水深等）を用いて生息域の適性を評価する手法で局地的な生息環境評価を行うことが出来る。しかし、魚類は、魚種やその成長段階によって異なる摂餌、休息、逃避、産卵等の行動状態を持つことが知られている¹⁷⁾。PHABSIMのような手法を更に発展させるには、魚類の行動状態を考慮し、様々な状態を総合的に評価する必要がある¹⁸⁾。

楊ら¹⁹⁾は、この異なる行動状態に着目し、異なる行動状態を「行動モード」と定義付け遊泳魚オイカワ (*Zacco platypus*) を用いた水路実験を行うことにより各モード毎に流速、水深、遮蔽等の物理環境に対する選好性が異なることを示した。辻本らは、魚類が通常定位する場、摂餌する場、産卵する場、避難する場といった生活する上で重要な場を想定し、それぞれの場が連携し生活圏が形成される必要性を示し「アクセス性」の概念を取り入れた²⁰⁾。

これらの既往研究の生息空間評価に関する研究成果を総合すると、(1)魚種、成長段階、行動状態により、魚類の行動は異なり、物理環境に関わる空間選好性は変化する、(2)魚類にとって良好な環境は、彼らがさまざまな成長段階、行動状態で利用する生息空間が連結している必要がある、という2つの概念が導かれる。

しかし、上記の概念を定量化し評価するために、実際の調査・研究を実施するには大きな問題がある。それは魚類行動を示す位置データ群の取得である。特に魚類行動追跡を一定誤差範囲内で行って利用空間を特定することや、魚類行動を一定間隔で長期間追跡し続けることは既存の潜水観察・直接採捕では難しかった。

この様な調査を可能にする手法の一つに、電波テレメトリ手法（野生動物に電波発信機を装着し、その行動を人手を用いて追跡する手法、以下、テレメトリ法）がある。この手法は、野生動物の行動を詳細に追跡できるため、野生動物が行動と利用した空間の物理環境特性の関係性を詳細かつ定量的に把握できると考えられる。このため、上述した景観の典型性抽出の研究に大きな駆動力になると考えられる。

しかし、テレメトリ法は通常人力で行うため定量的なデータ取得に問題があった。筆者らはテレメトリ法を自動化・高精度化・高機能化したマルチテレメトリシステム (Multi Telemetry System, 以下、MTS) を開発し中型陸上哺乳類の自動追跡を実現してきた²¹⁾。しかし、魚類追跡の自動化は MTS のシ

システム原理では難しかった。この様な背景から、土木研究所では、魚類調査へ適応するために MTS の改良を試み、魚類行動の自動追跡が可能な ATS (Advanced Telemetry System, 以下, ATS) を開発した。また、土木研究所内の調整池 (周囲長約 590m, 面積 1ha) で魚類 (ギンブナ) の行動を約 12 日間連続追跡し ATS の実用性を検証した²²⁾。ATS の開発の成功により魚類行動を定量的かつ時系列的に分析することが可能になり河川生態系に関する研究に大きく寄与する可能性が高い。

しかし、ATS の実用性検証は実際の河川でも行う必要がある。実河川では水深分布が多様で水中から電波が透過しないことも考えられるし、水中から発信された電波が伝搬する過程では、河道内微地形が干渉し、植生群落等が障害物として繁茂し、水中から発信される電波の伝搬状況に大きな影響を与えることが考えられる。

この他にも、出水時の様なイベント中においては、水の濁りの影響で電波を受信できなくなる可能性があるため、実河川における検証は不可欠である。

上記の様な懸念を解消するという目的と共に、本来の開発目的である実際の河川で魚類行動を長期間追跡すること、特に、魚類生息に影響を与える重要なイベントである出水時の魚類行動も追跡可能なことを実証することを目的に、実河川での試験を行う必要が残っていた。

このような背景から、土木研究所では ATS を実河川に適用し現地実証実験を行った。実証実験では実河川での ATS のデータ取得成功率の検証を行った後、魚類行動を約 5.5 ヶ月間追跡を行った。また魚類行動追跡結果を GIS で解析し、平水時の魚類行動圏・空間選好性、出水時の魚類行動と流速分布との解析を行った。

本稿は、1)実河川での ATS の機能の実証実験、2)魚類行動を ATS を用いて追跡した実証実験結果、3)ATS を魚類行動の解析に利用する利点についての検討の 3つの観点から記述し、ATS を用いた魚類行動の解析が、魚類群集、水域生態系の研究・保全に貢献する可能性について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

調査は 2005 年 2 月から 2005 年 8 月にかけて、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 の大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。調査地は千曲川の中流部に位置する鼠橋付近 (長野県埴科郡坂城町、東経 138°12'4.6", 北緯 36°25'14.4", 以下、調査地とする) で行った。調査地の概要を図-1 に示す。調査地は長野県境から 95.6km~97km 区間で、流域面積 2560km²、河道幅約 100m、河床勾配 1/200、河道兩岸に築堤が行われている区間である。

調査地の河床は、主に礫で構成され河床波形態は複列砂州であった。礫の主要構成材料は 20~200mm, $d_{50}=100\text{mm}$, 最大粒径 200~300mm 程度である²³⁾。右岸側には本流と比高差が小さく年に複数回冠水する高水敷、左岸側には本流と比高差が約 3m 程度あり 2~3 年に 1 回程度冠水する高水敷が形成されている。

千曲川では 2004 年 12 月から 2005 年 6 月末まで、小規模な出水 (約 50m³/s) を記録しているが目立った出水は記録されていない。7 月 4 日には調査地点で流量約 380m³/s の出水が確認された。本研究で出水とは、調査日近傍の流量に対して著しい流量増加が生じた場合でピーク時の流量が流量増加前の平均流量に対し、約 2 倍の増加が生じた場合を出水とした。調査地では、出水 1 (3 月 18~20 日:最大流量 50.87m³/s)、出水 2 (3 月 23~28 日:最大流量 50.87m³/s)、出水 3 (7 月 4~9 日:最大流量 388.34m³/s) を出水とした。調査地ではウグイ (*Leuciscus bakonensis*)、オイカワ (*Zacco platypus*)、ギンブナ (*Carassius auratus langsdorffii*)、アブラハヤ (*Pboxinus lagowski steindachneri*)、ニゴイ (*Hmibarbus labeo barbuis*)、モツゴ (*Pseudorasbora parva*) を主とする 10 科 24 種の魚類が確認された²⁴⁾。本流ではウグイ、オイカワが優占し、一時的水域 (Temporary Water Area: TWA, 以下, TWA と記述

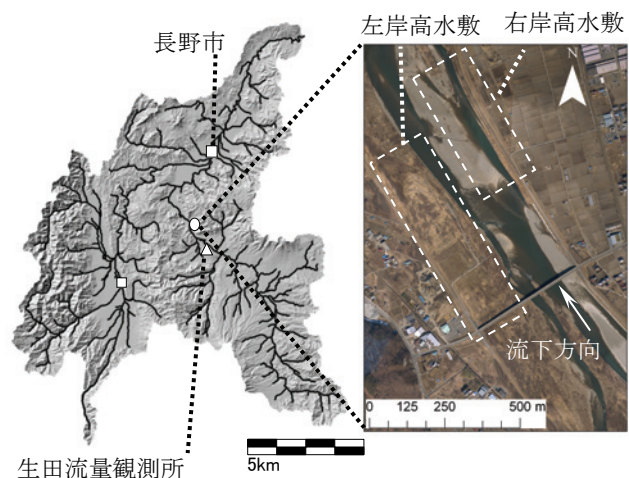


図-1 調査地の概要

する)ではアブラハヤ, ギンブナ, トウヨシノボリ (*Rhinogobius sp. OR*), ドジョウ (*Misgurnus anguillicandatus*), ニゴイが本流よりも多く確認された。ギンブナは本流, TWA とともに生息が多数確認されている。

(2) 現地調査の方法

a) ATS の概要と現地実証実験環境の整備

図-2 に ATS の概要を示す。ATS は, 制御局, 複数の受信局により構成される。制御局は無線 LAN を介して受信局の電波到来角計測作業を制御している。受信局は制御局の指令を受けると同時に指向性アンテナを回転させ電波到来角 (電波が来る方向) を推定する。各受信局で推定した電波到来角から, 三角測量と同様の原理で電波発信機の位置を特定する。

通常, テレメトリで使用される電波発信機は, 発信機の小型化・長寿命化を目的として間欠発信していることが多い。このため, 単に指向性アンテナを回転させるだけではビームパターン (アンテナの回転角度と受信強度の相関図) は離散的となり電波到来角の推定精度が著しく悪化する。

ATS の最大の特徴は, 補間計算を用い, 離散的なビームパターンデータから連続的なビームパターンを推定し, 電波到来角推定の精度を向上させている点にある。

ATS の受信局設置位置を図-3 に示す。調査地内に ATS (制御局 1 局, 受信局 4 局) を設置し実証実験を行った。今回の受信局配置では, ATS が魚類行動追跡可能なエリア (以下, 調査エリア) は約 2.2km² である。受信局は, 約 350m 間隔で右岸堤防上に直線的に配置した。受信局には指向性アンテナ (第一無線電波工業社, BeamAntena シリーズ A144S10, 144~146MHz, 利得 16.1dBi, 以下, アンテナ) を設置しローテータでアンテナを回転させ電波到来角を推定した。その後, 制御局の位置特定プログラムを用いて水中の電波発信機及び魚類の位置特定を行った

b) ATS のデータ取得成功率と位置特定精度の検証

調査地の河川内の既知地点に電波発信機を固定した後, ATS で位置特定を行い水中の電波発信機のデータ取得成功率及び位置特定精度を検証した。電波発信機は LOTEK 社製 (MBF-7A, 周波数 144MHz, 以下, 電波発信機) を使用した。

調査エリア内の魚類が利用すると考えられる浅部, 深部等の類型景観 (砂州上にみられる典型的な景観要素) を網羅するように電波発信機を水中に設置し

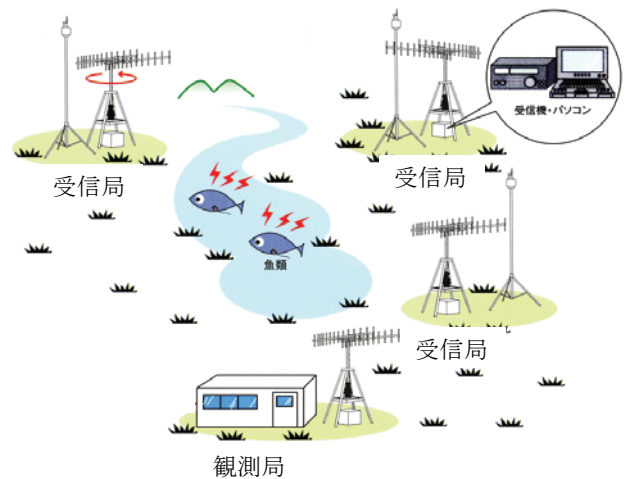


図-2 ATS の概要図



図-3 ATS の受信局設置位置



図-4 固定点の設置位置

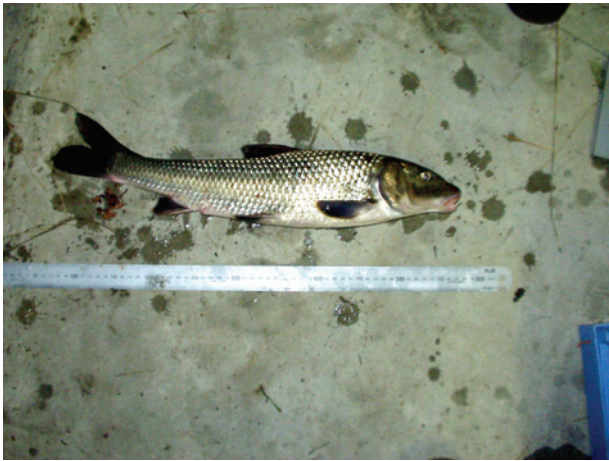


図-5 供試魚の概要

検証した。

発信機を設置した箇所の水深は約 0.5~1.5m の範囲とした。検証箇所は 12 箇所とした。それぞれの固定点において、水中に電波発信機を固定し（以下、固定点、図-4）、ATS を用いて座標値（平面直角座標系，第 8 系）を計測した。同時に固定点の座標（平面直角座標系，第 8 系）を DGPS を用いてを記録した。

c) 魚類行動追跡方法

調査地において、ニゴイ (*Hemibarbus labeo barbatus*，以下、供試魚) を投網(目合：18mm)を用いて 1 匹採集した。図-5 に供試魚の写真を示す。供試魚は、全長 46.7cm，体長 41.3cm，湿重量 1195g であった。採捕後、濃度約 5% に調整した麻酔薬（田辺製薬株式会社製魚類・甲殻類用麻酔薬 FA-100）で満たしたバケツ内に供試魚を入れて麻酔をかけた。その後、十分な麻酔状態になるまで観察し麻酔状態を確認後、供試魚の腹腔内をメスで開き、電波発信機を埋め込み外科手術糸で縫合した。縫合後、供試魚は麻酔薬が混合していないバケツ内で養生し麻酔から覚醒するまで、安静化をはかった。

供試魚を調査地内の河川に設置した生簀に放流前日 16:00 に入れ放流日午前 10:30 まで蓄養し調査地の水への適応をはかった。供試魚の移動追跡は、ATS で行った。測定間隔は約 3 分に 1 回の割合で測定した。2005 年 2 月 23 日~8 月 7 日までの約 5.5 ヶ月間、供試魚の行動を追跡した。

(3) データ解析

a) ATS データ取得成功率の検証と位置特定精度検証方法

ATS のデータ取得成功率の検証と位置特定精度検証方法は、1)ATS での水中電波発信機での位置特定成功率の算出、2)固定点座標との座標値の差の分

析を行った。

データ取得成功率の検証は、固定点に設置した水中の発信機を ATS で複数回測定し測定の成功率（測定成功回数/全測定回数）を算出した。測定成功回数は、固定点に設置した電波発信機の位置を ATS で特定できた回数とした。

また、現地調査における受信局の適正な設置のために、電波伝搬シミュレーションを行った。電波伝搬シミュレーションは、仮定の電波発信源を調査地内の任意の場所においた場合、受信局で電波受信が可能かどうかを検証できるシミュレータである。電波発信源と受信局間の電波伝搬に関する障害物（地形、植物群落）を GIS の見通し解析ツールで分析し、障害物がない場合、平面大地電波伝搬モデルで受信局における電波受信強度を算出する²⁵⁾。

本研究で使用した電波発信機と同じ出力の電波発信源が調査地内にあった場合、各受信局で受信可能かを検証した。電波伝搬解析の設定は、陸上の場合には電波発信源が陸上 0.1m，電波発信源が水中の場合には、水中約 0.1m から発信されたと仮定し解析した。調査地内に 1m ごとに仮想電波発信源を設置する設定で電波伝搬シミュレーションを行った。電波伝搬シミュレーションの結果とデータ取得成功率を比較し、データ取得成功率の地点間の違いを検証した。

位置特定精度の検証では以下の手順で行った。DGPS で取得した固定点の座標値を真の座標値（以下、真値）とし、次に、全ての固定点で ATS を用いて計測した座標と真値の差を誤差距離とし、記述統計（平均値、標準偏差等）から誤差特性を評価した。誤差特性の評価は、全固定点及び各固定点で評価した。

b) 流量観測所水位データと調査地の流量の水位—流量曲線の作成と流量発生頻度の算定

調査地の流量を算定するため、最寄りの流量観測所である生田流量観測所の水位データ (h) から調査地の流量 (Q') の $h-Q'$ 曲線を以下の手順で作成した。1)2000 年~2003 年までの生田流量観測所の $h-Q$ (但し Q は生田流量観測所の流量) 曲線を作成した。2)GIS により生田流量観測所と調査地の流域面積を算出し流域面積比を算出した。3)生田流量観測所の Q に流域面積比を乗じ調査地の流量 Q' とし $h-Q'$ 曲線を作成した。4)作成した $h-Q'$ を用いて、2005 年 1 月 1 日から 8 月 4 日までの流量 Q' を算出し、流量 Q' の発生頻度を算定した。

c) 水理計算による調査地の水理状況の推定

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、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²⁶⁾を用いて定常計算を行った。

河床形状データは調査地のレーザープロファイラによる測量成果、水域内の河床高現地測量データを基に内挿し流下・横断方向ともに 6m ピッチの河床高データを作成した。流量データは、以下の条件を設定した。上流端流量データは、定常流量 ($Q=40\text{m}^3/\text{s}$, $50\text{m}^3/\text{s}$, 以降 $50\text{m}^3/\text{s}$ 刻みで $400\text{m}^3/\text{s}$ まで) の流量を与えて計算した。調査地の平均流量は約 $15\text{m}^3/\text{s}$ で $40\text{m}^3/\text{s}$ は平水よりも 0.5m 程度水位が上昇した状態である。計算時の下流端水位データの設定に関しては、上流端から与える流量に対応して Manning 式による等流水深を下流端水位とした。初期水位データについては、各計算横断面において Manning 式による等流水深を初期水位条件として設定した。等流公式におけるエネルギー勾配 I_e は、対象横断面の上下流断面（流下方向に $\pm 6\text{m}$ ）の最深河床勾配とした。逆勾配が生じている区間では、計算区間全体の平均河床勾配である $1/227$ を与えた。粗度設定は、礫床、植物群落の分布を総合的に考慮した。試験的に出水時の水理計算を行い、水理計算結果と出水時の痕跡水位に合致するように粗度調整し、最終的に $n=0.032$ とした。計算時間ステップ Δt は、 $\Delta t=0.1[\text{sec}]$ を基本とし、数値振動が発生する場合は $\Delta t=0.05[\text{sec}]$ とした。水理計算の妥当性は、7 月 27 日の現地調査時に $40\sim 50\text{m}^3/\text{s}$ の出水状態を現地観測した。堤防上からの目視の結果、冠水域は水理計算結果と良好に合致し、水理計算結果は冠水域、冠水状態を良好に再現していると考えられた。同時期に、出水痕跡調査を行い、出水 3 の出水痕跡と水理計算結果が合致していることを確認した。

上記の条件で算出した水理計算結果を GIS (ESRI 社, ArcGIS Ver9.1) 上にインポートした。

d) 魚類行動追跡結果の解析

ATS により取得した供試魚の行動を示す位置データ群を、GIS (ESRI 社, ArcGIS Ver9.1) に取り込み物理環境情報（流速、水深）と関係付けを行った。ATS はその特性から各位置特定に際し、一定の計測誤差があることが予想される。そのため、ATS で取得した各データを分析し著しく誤差が生じている可能性が高い場合には、そのデータを除去した。この分析は、以下の様に行った。ATS は、受信信号の受信状態、三角測量の幾何的な状態に関する評価値（電波受信状況等）をプログラム解析時に付加する機能があるため、その値から判断し除去

を行った。除去により、供試魚の行動を示す位置データ群は位置特定精度が高いデータに限定されると考え、除去後のデータは特に補正を行わなかった。

供試魚の行動特性と物理環境（水深、流速）の利用特性を把握するため、以下の手順で行動特性を解析した。

まず、供試魚の追跡期間約 5.5 ヶ月を通した供試魚の行動圏を最外郭法で解析し行動圏面積を算出した。追跡期間の間には出水を含めた流量変動が生じ調査地内の流速分布は変化した。その流速分布変化に対応し、供試魚は行動すると考えられる。そのため供試魚の行動と調査地の流量変動との関係を考慮して上記で算出した行動圏を細分化し、平水時の行動圏、出水時の行動を供試魚の全データから抽出・分類した。

供試魚が平水時、出水に利用した空間の物理環境特性の違いを分析する目的で、魚類行動を示す位置データ群と水理計算結果の関係を分析した。魚類行動を示す位置データ群と同一日時の調査地の流量を $h-Q'$ 曲線により特定した（以下、対象流量とする）。メッシュデータとして算出される対象流量の水理計算結果から供試魚の行動を示す位置データ群と最も近いメッシュの水理計算結果（流速、水深）を検索し魚類が利用した空間の物理環境特性とした。平水時、物理環境（流速、水深）に対して供試魚が明確な選好性を持つか検証する目的で、供試魚が利用した空間の物理環境特性と調査地全体の物理環境特性の分散を比較した（F 検定、両側検定、有意水準 5%）。更に、魚類が利用した空間の物理環境特性を平水時と出水時に分類し、その特性を分析し物理環境特性から空間選好性を分析した。

供試魚の出水時の行動と流速分布特性の関係を分析する目的で、出水時の供試魚の行動と水理計算結果の関係性を分析した。調査期間中の出水 1（2005 年 3 月 18～20 日）、出水 3（2005 年 7 月 4～8 日）を分析対象とした。以下、出水 3 を対象出水と記述する。対象出水中の流量変化を出水前期、ピーク付近、出水後期に 3 期間に分類した。各分類期間中の流量に対応する水理計算結果を時系列順にならべ、各分類期間中の流速分布変化とした。もとめた流速分布変化と供試魚の行動を GIS 上に重ね合わせて行動との因果関係の分析を行った。

さらに対象出水中における供試魚が利用した空間の流速特性を分析する目的で、前述した方法で魚類行動と水理計算の方法を結びつけ、供試魚が利用した空間の水理特性（流速、水深）を時系列データとして整理した。

3. ATSのデータ取得成功率評価結果

表-1 に ATS の測定成功率を示す。ATS は、調査地内で概ね安定し 90%以上の確率で位置特定できた。固定点 3, 4, 6 では測定成功率が 25%以下であった。特に、固定点 4 では測定が不可能であった。

ATS の位置特定精度検証の結果を表-2 に示す。ATS の位置特定誤差は平均 18.93± 20.30m (平均 ±1.96×標準偏差) であった。図-6 に ATS の誤差距離のヒストグラム及び累積確率を示す。誤差距離は 15~25m が多く累積確率 25m までで約 80%となった。

表-3 に固定点ごとの位置特定誤差の記述統計を示す。位置特定誤差は地点ごとにことなり誤差が最も少ない点での平均は 10.64m, 最も大きい点では 72.88m であった。

図-7 に電波伝搬シミュレーションの結果を各受信局ごとに示す。図-7 で示す色は、その位置から発信された電波の受信局における受信強度を示す。色がない場所では、受信局で電波が受信されない状況を示す。各受信局、電波伝搬状況は河道内の地形、特に砂州中央部の微高地の影響を強く受けた結果となった。A 局から河道内を見通した場合、微高地の裏側は受信が不可能な場所が多く、受信が不可能な場所は、固定点 3,4,5,8,9 周辺に多かった。B 局から河道内を見通した場合も微高地の裏側は受信が不可能な場所が多かったが、A 局と比較して受信不可能な場所は少なく、固定点 8,9 よりも左岸側に一部受信不可能な場所が集中した。C 局から河道内を見通した場合には、橋の影響と微高地の影響を受け、C 局から固定点 3,4 を結ぶ線上に受信不可能な場所が集中した。これら 3 つの図から測定困難と考えられる固定点 4 と左岸側のみお筋や上流の左岸側みお筋では、測定誤差が大きい可能性があるが、測定頻度自体、受信局の設置には大きな問題はなかったと考えられる。

4. 魚類行動追跡の結果

図-8 に供試魚の行動を示す位置データ群のプロット図を示す。ATS による魚類行動追跡の結果、2005 年 2 月 23 日~8 月 7 日の約 165 日間にわたり、供試魚の行動追跡に成功した。追跡期間中、供試魚は約 4000m² 四方の範囲を移動し、複数の深部を集中的に利用していた。

表-1 ATS の測定成功率

固定点No.	平均	中央値	標準偏差	最小	最大
1	16.10	16.05	6.43	6.75	38.13
2	21.43	18.86	11.13	1.57	45.02
3	19.90	18.41	8.54	10.34	30.13
4	-	-	-	-	-
5	16.52	14.08	7.79	5.43	35.79
6	72.88	69.01	7.29	68.33	81.29
7	16.04	16.32	4.85	7.50	24.14
8	14.42	14.54	4.26	5.50	20.73
9	10.64	9.07	5.32	1.83	19.60
10	28.54	28.66	10.89	10.55	50.13
11	16.36	15.92	5.89	7.76	33.08
12	24.03	24.13	8.69	9.09	38.17

(単位: m)

表-2 位置位置特定精度検証結果

誤差距離 (単位: m)	
平均	18.93
標準誤差	0.51
中央値	17.28
標準偏差	10.36

表-3 固定点ごとの位置特性誤差の記述統計

固定点No.	総測定回数	測定数	測定成功率(%)
1	32	32	100.0
2	32	32	100.0
3	32	7	21.9
4	21	0	0.0
5	21	21	100.0
6	21	3	14.3
7	20	20	100.0
8	20	20	100.0
9	20	20	100.0
10	24	24	100.0
11	24	24	100.0
12	24	23	95.8

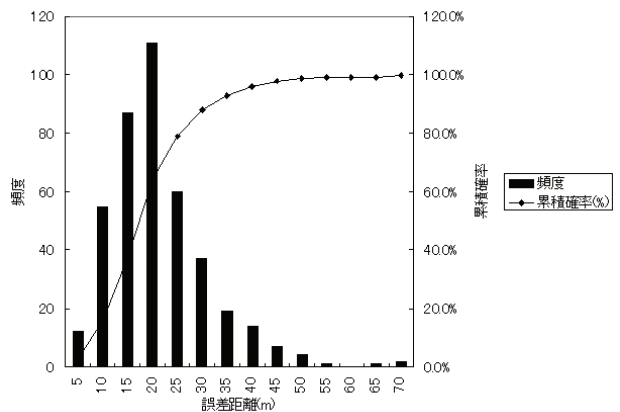


図-6 ATS の誤差距離のヒストグラム及び累積確率

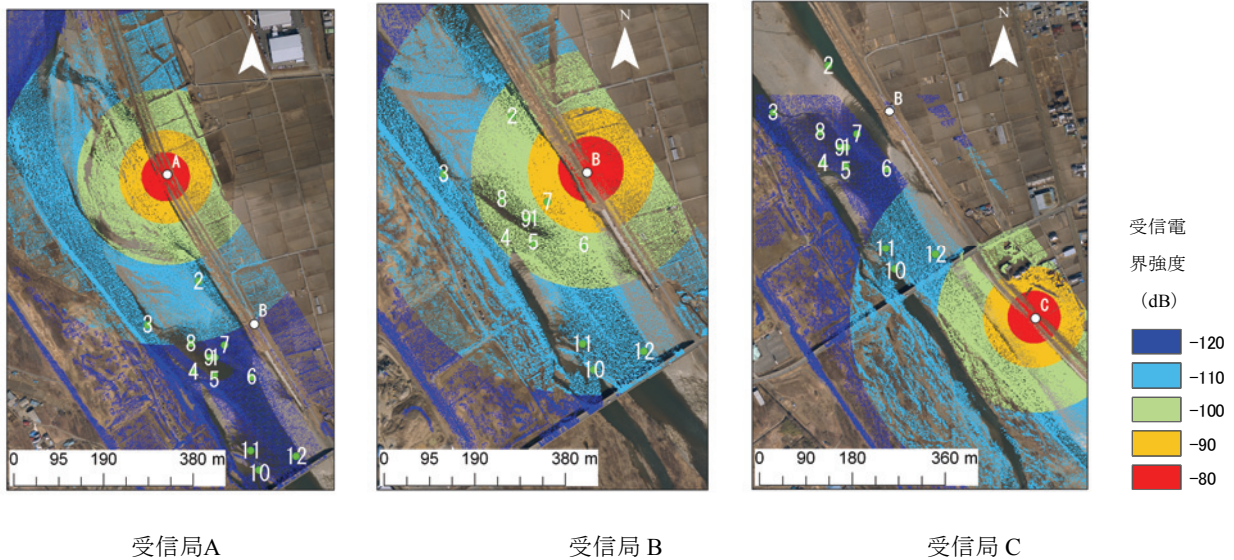


図-7 電波伝搬シミュレーションの結果



図-8 供試魚の行動を示す位置データ群プロット図

調査期間中の流量変動，特に出水が供試魚の利用空間に大きな影響を与えていた。図-9 に供試魚の行動圏を細分化した結果を示す。2月23日～3月17日には，供試魚は行動圏1)を主に利用していた。3月18日～19日に生じた小規模な出水により供試魚は下流側の深部を中心とする行動圏2)へ流下した。流下後，3月20日～4月5日まで行動圏2)で生息した。4月6日～4月7日に生じた小規模な出水により供試魚は上流側の深部，行動圏1)に再移動し7月3日まで行動圏1)に定着した。7月4日～9日まで，調査地では推定約400m³/sの中規模な出水が発生した。供試魚は，下流側の行動圏2)へ流下するが，その後，流量の増加と共に行動圏3)の方向へ移動

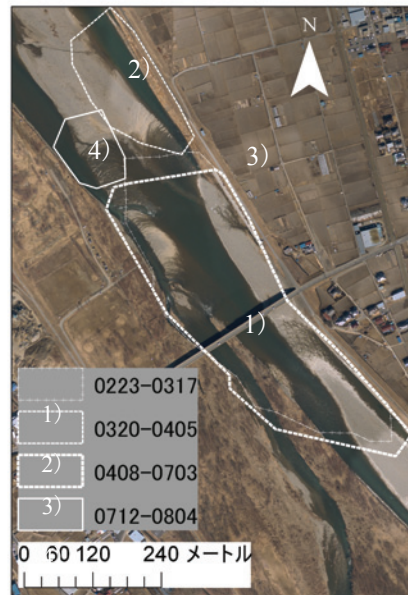


図-9 供試魚の行動圏の細分化結果

し行動圏3)に定着する。その後，供試魚は7月10日～8月4日まで行動圏3)に定着し，その後，下流側へ移動し調査範囲外へ移動した。

流量30m³/s時の調査地全域の流速・水深と，平水時と出水時に供試魚が利用した空間の流速・水深の違いを図-10, 11に示す。平水時，供試魚は流速が約0.6m/s，水深約0.5m，を中心に利用した。最大流速は，約1.5m/sの空間まで利用した。平水時，供試魚が利用した空間の物理環境（流速，水深）は調査地全体の物理環境特性と有意に異なっていた（流速：F値=0.91，水深：F値=1.37）。供試魚は，調査地の中でも低流速で水深が深い空間を選択し，その特性は流速0.6m/s，水深は0.5mであった。

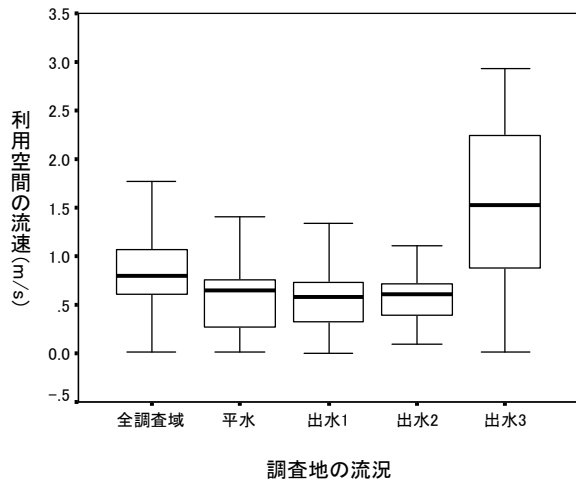


図-10 供試魚の利用空間の流速 (計算値)

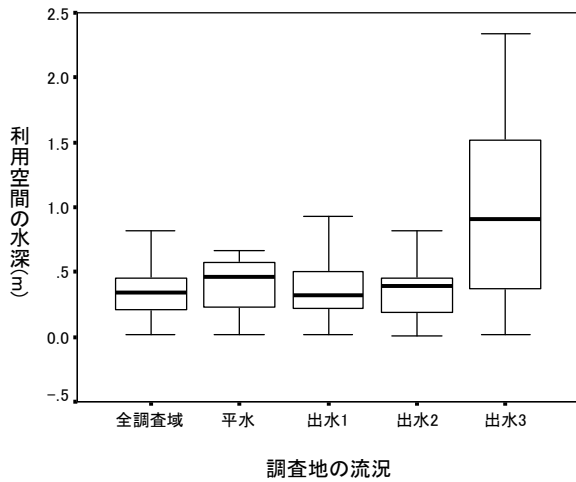


図-11 供試魚の利用空間の水深 (計算値)

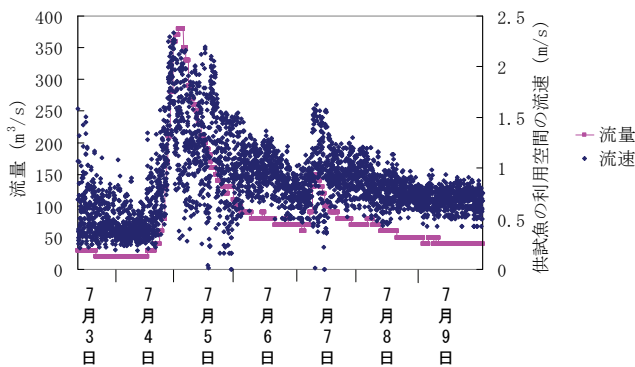


図-12 出水時の流量と利用空間の流速 (計算値)

出水時は、その流量により異なる結果となった。流量が小さい出水 1, 2 の期間中、供試魚は流速が約 0.5m/s、水深約 0.5m、を中心に利用し、最大流

速は、約 1.5m/s 以下の場所に存在しており、平水時と大きな変化はなかった。一方、出水 3 では、供試魚が存在した空間においても、流速は約 1.5m/s、水深約 1.0m、にまで達していた。

出水 3 の期間中に、供試魚が利用した空間の流速時系列と出水 3 の流量時系列の比較を図-12 に、対象出水時の魚類行動と流速分布の関係を図-13 に示す。出水による流量増加に対応し、供試魚が存在した空間の流速も増減した。

流量増加時の 7 月 4 日 5:00~11:00 供試魚は、高頻度で利用した深部の右岸よりに移動し、その時利用した空間の流速は最大約 1m/s であった。7 月 4 日 11:00~12:00 の間に供試魚は、高水敷の冠水地域を流下し、左岸よりの深部に移動した (図-13)。供試魚が流下前まで利用した空間の最大流速は約 1.6m/s であった。その後、供試魚は左岸よりの深部で出水中定位した。その深部における最大流速は約 2.6m/s であった。

5. 考察

(1)ATS の有効性

a) 実河川での実用性

ATS は、データ取得成功率の検証の結果、12 の固定点の内 11 箇所水中の電波発信機の位置特定が可能であった。また、12 の固定点の内 9 箇所約 90%以上の測定成功率であった。類型景観としては、浅部、深部、等の魚類の生息空間として重要とされる類型景観で問題なくデータ取得がされている。

データ取得成功率が悪かった固定点 3, 4 では、ATS の受信局から固定点を結ぶ伝搬路中に、砂州の起伏部が存在し、電波伝搬の経路を遮っていたため測定成功率が悪かったと考えられる。一般に土や建造物などの遮蔽物は著しく電波伝搬を遮るとされている。測定が出来なかった固定点 4 では、その傾向が著しい (図-7)。固定点 4 は右岸側から見て砂州上の局所的な窪地内に位置している。水面から放射された電波は窪地の地形で遮断され電波が伝搬せず、データ取得成功率が低下したと考えられる。固定点 6 は、電波伝搬シミュレーション結果が示すように、調査地内には、電波受信不安定なポイントが存在する。固定点 6 は、その電波受信不可能なポイントに該当すると考えられ、電波受信が安定しなかったと考えられる。

ATS には、固定点 4 に代表されるように調査地の電波伝搬条件から電波受信が不安定な箇所が存在し、

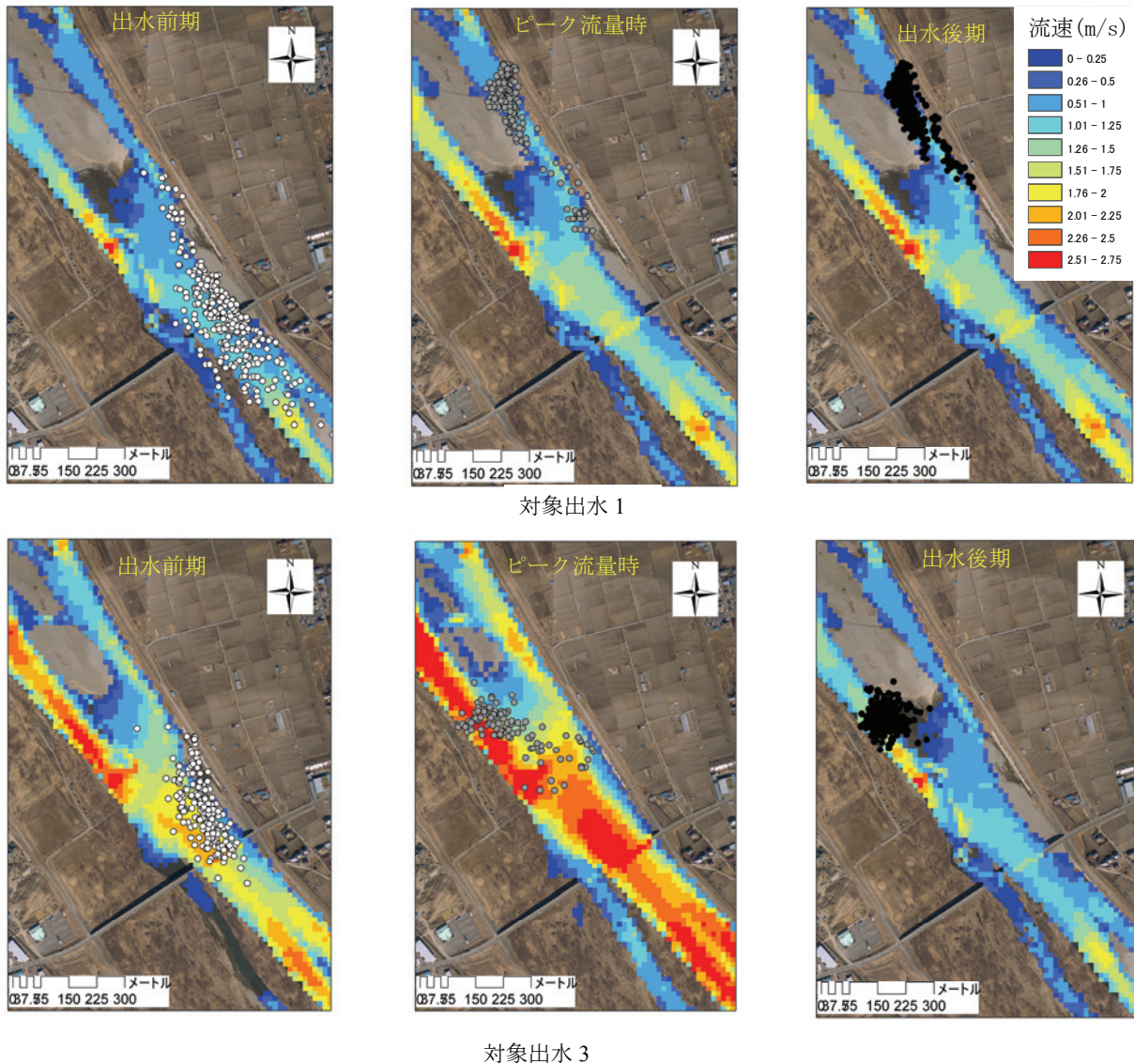


図-13 対象出水時の魚類行動と流速分布の関係

データ取得成功率に影響する。しかし、受信不安定ポイントは、電波伝搬解析、受信局の効果的な配置を十分に行えば回避できる問題であり、ATSの実用性を著しく下げるものではない。今回の検討の様に予め電波伝搬シミュレーションを行い、受信局の適正な配置を行うことで、ATSは実河川での調査ツールとして十分な活用できると考えられる。

b) 位置位置特定精度

ATSの位置特定誤差は、平均 $18.93 \pm 20.30(m)$ で、誤差距離は 15~25m 程度が最も多かった。このことは、今回の受信局の配置パターンにおいて、ATSは概ね約 20m 程度の誤差で水中の魚類行動を追跡できることを示している。誤差 20m の距離は、調査地を約 40m の空間解像度でラスタ化することが可能であることを示している。解像度は、浅部、深部のどの部分を利用しているのかを分析するには十分な位置特定精度があると考えられる。

ATSのシステムアルゴリズムの改良や、位置特定精度の信頼性のデータを付与する等、今度システムアルゴリズムを改良する必要があると考えられる。
c) 出水時の魚類行動を示す位置データ群の信頼性

本稿のような電波伝搬過程、すなわち、水中から電波を放射後、水面を透過し空中に電波を放射する電波伝搬経路の場合、水深が最も影響があるとされている²⁵⁾。著者らが行ったATSの基本性能実験の検証結果では、ATSの位置特定機能は、水深の増加により著しく悪化しないことが示されている²²⁾。また、データ取得成功率の検証時には異なる水深の場所で精度を検証している。本稿で示した誤差は、水深が異なった場合を考慮した検証結果であるといえる。そのため、ATSにより取得した出水中の魚類行動を示す位置データ群は、一定の精度を担保していると考えられる。

d) 魚類行動に関する新しいデータの取得と効率化

図-8, 9 に示す供試魚を用いた魚類行動を示す位置データ群が、魚類行動生態研究ツールとしてのATSの可能性（行動圏解析・空間選好性の位置特定精度向上等）を示している。

図-8のような長期かつ連続的な魚類行動を示す位置データ群は、捕獲調査や人力に頼るテレメトリ調査では不可能であったと考えられる。これは、ATSの利点である。行動圏解析、空間選好性把握、出水時の魚類行動追跡を例に挙げ、その利点を考える。

まず、行動圏解析では、従来の調査手法で、行動圏解析を行えばデータ不足に伴い行動圏を少なめに算出される可能性が高いし、行動圏内部の利用頻度の違いは正確に把握できない可能性がある。ATSは多量、連続的、定量的な魚類行動を示す位置データ群を自動的に取得できるため、従来の調査手法よりも正確な魚類行動解析が可能になると考えられる。

魚類の空間選好性の把握にも、ATSの多量のデータ取得の機能は貢献すると考えられる。図-8に示すように、供試魚は深部を集中して利用し深部を選好していること明瞭であるし、流速変化に応じて深部以外の場所（河岸部や高水敷）を利用し生息していることがわかる。ATSによる多量、連続的、定量的な魚類データがあれば、より空間選好性を把握することができる。

出水時の魚類行動追跡結果もATSの魚類行動解析ツールとしての可能性を示している。従来の調査手法では、出水時の魚類行動追跡は不可能に近い状態であった。直接採捕・潜水観察調査では出水時に調査することは不可能であるし、人力によるテレメトリ法では出水時に合わせて調査を行うことは成功する可能性は少なかった。しかし、ATSを用いれば、魚類行動を継続的に追跡することが可能になり出水というイベントを適切に捉えることが可能になる(図-12, 13)。

(2)ATS データから見える魚類行動特性

a) 明瞭な行動圏と空間選好性

供試魚の行動を約5.5ヶ月追跡した結果、供試魚は複数の深部を含む約4000m²を利用した。行動圏内部を均一に利用するわけではなく、深部を重点的に利用した(図-8)。

出水前後で、供試魚が生息した深部を変えた理由は、能動的移動というよりは流速増加による受動的移動が原因と考えられる。出水時、本流内の流速が早くなった場合、河岸・高水敷上に現れる低流速

空間を利用しながら流下を回避する。その場合には、出水前に存在した場所よりも下流側へ移動する場合にある。出水のピークを過ぎ流量が減少するに従い、河岸・高水敷上に現れる低流速空間も縮小していくが、供試魚は水域を求め本流側へ移動し、移動した本流内で選好する空間（深部）を利用したと考えられる。

また、ATSのデータは水理解析と結合することで、供試魚が深部という類型景観を選好した理由を物理環境の面から把握することも可能とする。図-10, 11の結果は、供試魚が流速約0.6m/s、水深約0.5mの特性を持つ空間を中心に利用することを示し、供試魚が選好する深部の中でも前述の諸元の空間を選好することを示し明瞭な空間選好性を有していることが明らかになった。

b) 平水時と洪水時の行動特性の違いから見える行動モード

平水・出水1・2と出水3では、供試魚が選択した空間の流速・水深は異なった(図-10)。

供試魚は存在する場所の流速が速くなり下流への流失の可能性が高くなった場合、回避を試みると考えられる。出水1・2のような小規模出水の場合、河道内には流速の遅い空間が点在するため、供試魚は、流速が遅い空間を容易に発見して、そのような場所に移動することが出来たと考えられる。そのため、平水時と行動状態を著しく変える必要がなかったと考えられる(図-13)。

一方、出水3の場合、河川内の多くの場所で流速2m/s前後となった。そのため、供試魚は、その周囲に流速が遅い空間を発見し移動することが出来なかったと考えられる。このため仮に、平水時や出水1・2と同じ遊泳速度で泳ぎ続けた場合、供試魚は著しく下流へ流下したと考えられる。しかし、供試魚は、著しく下流へ流下はしていない(図-13)。

この結果は、楊ら¹⁹⁾が指摘する行動モードを参考に考えると考えやすい。出水3の場合、供試魚は、下流への流下を回避するため、周囲の低流速域を発見・移動しようと試みるが実現出来ず、高流速域でも耐えられる遊泳行動（例えば、突進速度に近い遊泳行動）をとり、高流速域での流下を最小限に留め退避行動をとったと考えられる。これは、楊らが指摘する行動モードの変化と考えられる(図-13)。

この結果は、出水時、供試魚は、周囲の物理環境変化を把握し、物理環境変化に対応できるように適宜その行動モードを決定し、自己の生存可能性を上げていたとことを示していると考えられる。しかし、本研究では、2次元水理計算しか行っていない。2

次元水理計算では表現しきれない微細な空間特性が供試魚の行動に影響を与えた可能性もあると考えられる。今後、ATSの高度化を進めるとともに、物理環境再現についても高度化を図り、より詳細な因果関係の解明に取り組むことも必要である。

c) ATSによる魚類行動と物理環境との関係性解明

長期に渡る供試魚の行動追跡結果は、河道内微地形の理解、ひいては河川改修計画に大きな示唆を与える。供試魚は、追跡期間中、出水による流速の増加に対応し、流下を防ぎながら調査地内を移動し、複数の深部を存在した。結果として調査期間の行動圏は、複数の深部を内包する構造となった。この結果は、供試魚は明瞭な空間選好性を有するが、選好する空間が単独であるよりは、複数の選好空間が連結して配置されることがよりよい魚類の生息空間になることを示している。つまり、流量変動等、物理環境変化が激しい河川の場合には、選好する空間が点在しているほうが、出水等で攪乱を受けた場合に退避・別の選好空間で生息することが可能であることを示している。今後の河川計画に重要な知見を提供していると考えられる。

出水時の供試魚の行動追跡結果も大きな示唆を与える。出水時、供試魚は流速の遅い空間を探し河川の河岸沿いに存在している。流量の増加に伴い平水時に流路であるところに低流速域がなくなると、供試魚は平水時は高水敷上の低流速域の空間に存在している。このことは、魚類の生息空間、特に避難場として高水敷の形状が重要であることを示している²⁷⁾。調査地のように平水時の流路と高水敷が緩やかな地形でつながっている場合、高水敷は出水時の魚類の避難場として機能する。しかし、高水敷が小規模な出水で冠水するが一定標高である場合や、平水時流路と高水敷の間が崖状になっている場合は、前述の機能は期待できない。高水敷が一定の標高である場合には低流速域は形成されるが、高水敷上に均一の水深の冠水域が形成され十分な水深は確保されず魚類は避難場として利用できない。高水敷が崖状の場合には、高水敷上へ越流するまでは低流速域が形成されない。このような空間では、魚類は下流へ流される可能性が高くなると考えられる。これらの情報は、魚類の生息環境保全を目的とした河川計画を行う場合、高水敷の形状に配慮する必要性を示唆している。通常の魚類調査ではこのような知見を得ることが難しかったと考えられる。

(3) ATSの利用可能性

ATSの開発は、河川生態系、魚類行動生態学等

の研究に大きな貢献をすると考えられる。ATSの最大の利点は、特定個体の行動を連続かつ定量的に追跡できることである。既存調査手法（魚類採捕、潜水観察等）では一時的な魚類生息状況しか把握できないため、魚類行動圏、空間選好性を評価するには難しい側面があった。既存調査手法では、出水時のデータを取得するのは極めて困難であったため、ATSで取得可能である出水時の魚類行動を示す位置データ群は極めて重要な知見をもたらすと考えられる。ATSが河川生態学研究の中で積極的に利用され、対象魚種等が拡大していけば、PHABSIMに代表される物理環境情報を用いた生息空間評価手法や個体群ベースモデル^{28)~30)}に代表される魚類行動シミュレーションの研究進展に大きく寄与すると考えられる。

ATSは、多自然川づくり・自然再生事業等に代表される野生生物の生息空間保全、既存河川構造物の改良等の事業評価にも大きく貢献すると考えられる。例えば、魚類生息空間保全（生息空間・避難場の創出）を目的としてワンドの保全・復元事業を行った場合、魚類がその生息空間を利用しているかの評価や、魚類移動阻害とされる河川横断工作物や付属する魚道の改修を行った場合の効果等を評価することが可能になると考えられる。

また、ATSによる魚類行動を示す位置データ群は、河川事業の効果を分かりやすく一般社会にPRすることも可能にする。今後の河川生態系保全、河川事業・行政を行う場合にはその効果を一般社会に分かりやすく伝える必要になる。そのような場合にはATSで得られる定量的なデータは、よりわかりやすい形で一般社会に河川生態系保全・河川事業等の効果を伝えていくのに有力なツールとなると考えられる。

6. 結論

(1) 魚類に電波発信機を装着し魚類行動と自動で追跡可能なシステム、アドバンスドテレメトリシステム(ATS)を開発した。水中の電波発信機データ取得成功率・その位置特定精度検証、魚類(ニゴイ)行動追跡を目的とし、信濃川水系千曲川鼠橋地区(調査地)で実証実験を行った。その結果、ATSは調査地のほぼ全域で水中の電波発信機の位置特定が可能であった。また、平水時、出水時とも魚類行動を把握できた。

(2) 今回の実証実験における受信局配置では、ATS

は水中にある電波発信機の位置を誤差平均約18.93mで位置特定することが可能であった。

- (3) 魚類行動をATSで追跡した結果、約3分に1回の割合で155日間魚類行動追跡に成功した。また、追跡期間中、出水時の魚類行動を追跡することが可能となった。
- (4) 平水時、ATSで追跡した期間中、供試魚は約4000m²を行動範囲として活動した。長時間定位置した類型景観は深部であり、その物理環境特性は、流速約0.6m/s、水深0.5mと一定の物理環境特性を持っていた。
- (5) 出水時、供試魚は流量増加に伴う流速変化に対応し下流への流下を回避する行動をとった。供試魚の行動は、供試魚のいた空間の流速と対応していることが明らかになった。
- (6) (4)、(5)の結果から、様々な類型景観が連結し、魚類がこれらの間を容易に移動できる河川の物理環境が重要であることが示唆された。
- (7) ATSは、河川生態系研究、生息空間保全等の河川事業に有用なツールであることが示唆された。

謝辞：秋田大学工学資源学部電気電子工学科知能情報通信工学講座、井上浩教授、春日貴志助手、神馬英介氏には水中からの電波伝搬研究を進める上で有益なご助言を頂いた。また、北陸地方整備局千曲川河川事務所、坂城町役場の職員の方々には、調査期間中、様々な面で便宜を図っていただいた。(株)山本システムデザイン山本頼寿氏にはATSのシステムデバイス製作、(株)大日コンサルタント環境・水工部の原田守啓氏には電波伝搬シミュレーション作業、(株)アイナスの池田勝彦氏、内藤慎二氏、児玉保氏、早川聡氏にはATSのシステムソフトの実装作業、(株)竹内組の竹内敏正氏にはATSの維持管理、更埴漁業共同組合宮原修氏には魚類採捕で多大なご協力をいただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Turner, M.G., Gardner, R.H., O'Neill, R.V. (中越信和, 原慶太郎監訳) : 景観生態学—生態学からの新しい景観理論とその応用, pp.138-139, 文一総合出版, 2004.
- 2) 巖佐 庸, 松本忠夫, 菊沢喜八郎, 日本生態学会編 : 生態学事典, pp.138-139, 共立出版, 2003.
- 3) 辻本哲郎 : 砂州景観保全を河川生態工学からどう意義づけるか, 河川技術に関する論文集, Vol.10, pp.43-148, 2004.
- 4) 井上実 : 魚類の行動と漁法, pp.148-174, 恒星社厚生閣, 1978.
- 5) 川本信之 : 新版魚類生理生態学, 水産学全集, Vol.13, pp.332-343, 恒星社厚生閣, 1959.
- 6) 水野信彦, 御勢久右衛門 : 河川の生態学 補訂・新装版, pp.184-199, 築地書館, 1993.
- 7) Enders, E.C., Boisclair, D. and Roy, A. G.: A model of total swimming cost in turbulent flow for juvenile Atlantic Salmon, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol.62, No.5, pp.1079-1089, 2005.
- 8) Gosset, C., Larinier, M., Porcher, J.P., Travede, F. (中村俊六, 東信行監修) : 魚道及び効果対策の知識と設計, 財団法人リバーフロント整備センター, pp.48-63, 1996.
- 9) Odeh, M.: *Advances in Fish Passage Technology Engineering Design and Biological Evaluation*, American Fisheries Society, 2000.
- 10) 浪平篤, 後藤真宏, 小林宏康 : 階段式魚道における流量変化に伴うプール毎の流況およびウグイの遡上行動, 水工学論文集, Vol.51, pp.216, 2007.
- 11) 橋本麻未, 酒井哲郎, 後藤仁志, 原田英治 : Boid型魚類行動モデルに基づく数値魚道の開発, 水工学論文集, Vol.49, No.2, pp.1477-1482, 2005.
- 12) 井上幹生, 中野繁 : 小河川の物理的環境構造と魚類の微生息場所, 日本生態学会誌, Vol.44, pp.151-160, 1994.
- 13) Crook, D.A.: Movements associated with home-range establishment by two species of lowland river fish, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol.61, No.11, pp.2183-2193, 2004.
- 14) 東信行, 佐原雄二, 鴨下真吾, 関泰夫, 渡辺勝栄 : 増水時における河川魚類の行動と河川構造, 環境システム研究, Vol.27, pp.793-798, 1999.
- 15) 小出水規行, 藪木昭彦, 中村俊六 : IFIM/PHABSIMによる河川魚類生息環境評価, 河川技術に関する論文集, Vol.6, pp.155-160, 2000.
- 16) 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.
- 17) 島谷幸宏, 萱場祐一, 渡辺昭彦 : 水辺における生物生息空間創成技術及び生物保全工法に関する研究, 環境保全研究成果集, Vol. 19, No.Pt2, pp.83, 1996.
- 18) Richard, T. and Forman, T.: *Land Mosaic, The ecology of landscape and reigons*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
- 19) 楊継東, 関根雅彦, 浮田正夫, 今井剛 : 行動モードを考慮した魚の選好性に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.636/VII-13, pp.35-45, 1999.

- 20) 辻本哲郎, 田代喬, 伊藤壮志: 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.
- 21) 傳田正利, 島谷幸宏, 尾澤卓思, 岩本俊孝, 久木田重蔵: 野生生物調査のためのマルチテレメトリシステムの開発とその応用, 日本生態学会誌, Vol.51, pp.15-222, 2001.
- 22) 傳田正利, 天野邦彦, 辻本哲郎: 魚類行動自動追跡システムの開発と実用性の検証, 河川技術論文集, 第11巻, pp. 459-464, 2005.
- 23) 河川生態学術研究会千曲川グループ: 千曲川の総合研究—鼠橋地区を中心として—, (財)リバーフロント整備センター, pp.105-206, 2001.
- 24) 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, Vol.62, No.3, pp.340-358, 2006.
- 25) 堤誠: 電磁波工学ノート, 総合電子出版社, pp.40-44, 1998.
- 26) 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, 2002.
- 27) 天野邦彦, 傳田正利, 時岡利和, 対馬孝治: 河川環境評価における流域特性や河川地形からの視点と新技術の適用, 土木技術資料, Vol.46, No.55, pp.26-31, 2004.
- 28) 石川雅朗, 足立恒, 平野弘晃: 個体ベースモデルによる魚類生息環境評価手法の構築, 河川技術論文集, Vol.7, pp.315-320, 2001.
- 29) Grimm, V. and Railsback, S. F.: *Individual Based Modeling and Ecology*, Princeton, University Press, Princeton, 2005.
- 30) 楠田哲也, 巖佐庸: 生態系とシミュレーション, 朝倉書店, 2002.

(2007. 7. 2 受付)

FISH BEHAVIOR ANALYSIS THROUGH A FIELD EXPERIMENT BY USING ADVANCED TELEMETRY SYSTEM

Masatoshi DENDA, Kunihiko AMANO and Tetsuro TSUJIMOTO

To test the performance of Advanced Telemetry System (ATS), which can track wildlife behavior automatically, we carried out a demonstration experiment in Chikuma River.

Calibration showed that the average positioning error was about 18.9 m in the field. ATS successfully tracked the fish behavior at about every 3 minutes for 155 days even during flood which occurred in the research period. The ATS showed that the test fish have clear home range of about 4000m² and inhabit in pools mainly. ATS also indicated that the test fish reacted quickly to the change of velocity to avoid being washed away during floods.