

I-19 ITを活用した野生生物追跡調査手法の開発

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 13～平 17

担当チーム：河川生態チーム

研究担当者：天野邦彦、傳田正利

【要旨】

本課題では IT を活用した野生生物追跡調査手法の開発を行った。主に検討した内容は、①野生生物自動追跡システムの開発とその汎用化、②開発した野生生物自動追跡システムを活用した新しい野生生物調査手法の開発である。①野生生物自動追跡システムの開発とその汎用化では、野生生物の行動を約 3 分、誤差 10m～25m 程度で自動追跡が可能なシステムであるマルチテレメトリシステム（Multi Telemetry System、以下 MTS）を開発し中型野生生物の行動追跡に成功した。また、MTS の汎用化（小型化・低予算化・対象生物の拡大）を目的としたアドバンスドテレメトリシステム（Advanced Telemetry System、以下、ATS）を開発し、魚類の行動追跡、特に出水時の魚類行動の追跡に成功した。②の MTS、ATS を活用した新しい野生生物調査手法の開発では、MTS、ATS で追跡した野生生物の行動データを地理情報システム（Geographic Information System、以下、GIS）に取り込み物理環境情報との関係性を分析することで、野生生物と物理環境情報の関係性の分析、野生生物の行動を予測することが可能であることが明らかになった。貴重生物の生息空間の保全や環境に配慮した河川改修事業等の計画時、野生生物自動追跡システム（MTS、ATS）は、従来の調査手法で取得することが難しかった野生生物の行動特性の定量的なデータ取得を可能にし、効果的な自然環境の保全・復元に重要な調査ツールであることが明らかになった。

キーワード：野生生物、行動、自動追跡システム、GIS、河川改修、物理環境改変、騒音振動、出水時魚類行動

1. はじめに

河川改修事業やダム事業等の人為的インパクトが野生動物の行動に与える影響の把握については、既往研究・調査において多くの努力がなされてきた。しかし、生息域への人の侵入、生息空間の改変等の人為的インパクトが生じた時、野生動物の行動変化を把握、予測することは難しかった。土木研究所は野生生物の行動を定量的に追跡出来る行動追跡手法の開発を目標として研究・開発を行ってきた。既往技術で野生生物の行動を定量的に把握する手法として、テレメトリ（野生動物に電波発信機を装着し、行動を追跡する方法）があった。しかし、この手法は調査員がアンテナを持って電波の受信を音で確認しながら追跡するしか追跡方法がなく、高精度、長期間の連続調査は難しかった。

このような背景から土木研究所では既存のテレメトリ手法をシステム化し、自動で野生動物の行動追跡が可能なマルチテレメトリシステム（Multi Telemetry System、以下、MTS）の開発や、MTS の発展形・汎用型であるアドバンスドテレメトリシステ

ム（Advanced Telemetry System、以下、ATS）の開発を行った。また、MTS、ATS で取得した野生生物の行動データと物理環境情報を地理情報システム（Geographic Information System、以下、GIS とする）を用いて解析すると、野生生物の行動と物理環境変化の因果関係を定量的に確認できることが明らかとなった。

本報告では、2つの流れに従い本課題の成果を報告する。一つは、MTS、ATS と続くシステム開発・機能検証、機能検証結果に基づくシステム改良の流れを経時的に報告する。もう一方は、MTS、ATS で取得した野生生物の行動データと物理環境変化の因果関係を GIS を用いて解析する有効性を、実際の現地データを例示しながら報告する。内容は、①五ヶ瀬川水系北川における大規模河川改修時の植生伐採、騒音振動環境の変化が野生生物の行動に与える影響評価に関する研究、②信濃川水系千曲川における 6 ヶ月間の魚類行動軌跡と出水時の魚類行動と流速分布の因果関係に関する研究、以上の 2 点について報告する。

上記の報告を通して本研究課題により得られた研究成果の有用性及び、その将来的な利用・研究進展の可能性を論じ重点課題の報告とする。

2. 野生生物自動追跡システムの開発

2.1 テレメトリ調査の問題点とMTSに必要な機能の設定

テレメトリは、野生生物に発信機を装着しその行動をアンテナをもった調査員追跡する方法である。発信機は、陸上、河川中流域では主に電波発信機を使用することが多い。アメリカ・ヨーロッパを中心に鳥類、陸上哺乳類、魚類などの野生生物移動追跡調査などで多くの実績がある。野生生物の移動追跡の把握には有効な手法と考えられている。

しかし、従来のテレメトリ調査は多くの問題点がある。最も深刻な問題は、調査自体が人力に頼る部分が多く野生生物の行動を追跡するのに莫大な時間と労力を要し、その位置特定精度は低く長期間の継続的な調査は難しい。また、複数の種・個体を同時に追跡するのは極めて困難であった。

このようは背景から土木研究所ではテレメトリ手法を自動化するシステム開発を試みた。システム開発にあたり、真に野生生物調査に有効な手法を開発するために野生生物の研究者と議論し、以下の3つの目標を設定した。

- ① 複数個体、複数種の野生生物の位置を同時に特定できること
- ② 位置特定精度を向上させること
- ③ 長期間の継続調査を行えること

①により生態系を構成する野生生物の複雑な関係を把握することが可能になる。②により、野生生物の移動を正確に把握でき野生動物がどのような物理的環境を必要とするのかが把握できる。③により、短期間では予測できない野生生物の行動特性が把握できる。

2.2 MTSの概要(特徴)

上述の開発目標を考慮し、開発したMTSの概要(機器構成と位置計測原理)を図-1に示す。本システムは、送信局、インテリジェント発信機、複数の受信局と情報制御所から構成される。送信局は、フィールド内の任意の発信機ごとに発信命令を送信する機能を持っている。インテリジェント発信機は、送信局から発信命令が送信された時のみ発信するインテリジェント機能を持ち、発信間隔、発信スケジュールなどを遠隔で制御できる。従来型の発信機は生物

に装着し、発信機が発信を始めると一定間隔で発信し続けるため、観測していないときでも電池を消費し、発信機の寿命を短くしていた。インテリジェント機能により、余分な電池消費を防ぎ、長期間の連続観測を可能にする。受信局は発信機から発信される電波を受信し、受信した電波の到来角データを無線LANを通じて情報制御所に伝送する機能を持っている。情報制御所は受信局からの伝送されるデータを解析し、位置を特定し地図上に表示する。実際の受信局の設置状況を図-2に示す。本システムは、従来のテレメトリ調査のように、発信機から一定間隔で電波が発信され、その信号をもとに位置を特定するだけでなく、インテリジェント発信機により任意に観測スケジュールを変更し、夜行性の生物には夜間観測の回数を増やすなどの柔軟な観測を可能にしている。また、複数の受信局を設置し受信局のデータを解析するプログラムにより、自動的かつ高精度に野生生物の位置を特定することを可能にしている¹⁾。

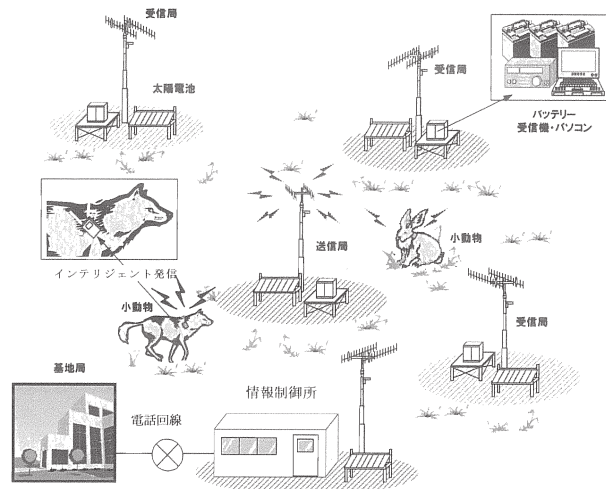


図-1 MTSの概要図

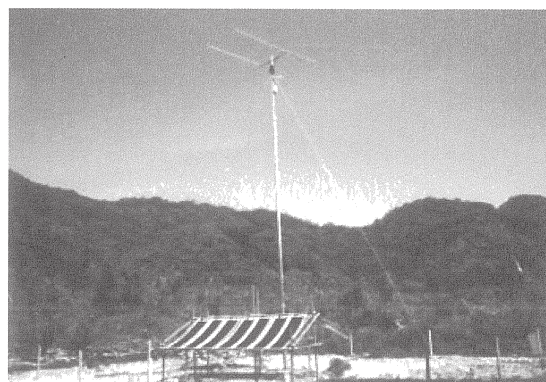


図-2 MTSの受信局の設置状況

2. 3 MTS の位置特定機能

2. 3. 1 調査地の概要および実験方法

調査は宮崎県東臼杵郡の五ヶ瀬川支川北川で実施した。北川は傾山 (1,602m) に源を発し、桑原川、小川などの支川を合わせながら、河口で祝子川、五ヶ瀬川と合流し、日向灘に注ぐ流域面積 587.4 km²、流路長 50.9km の 1 級河川である。その流域は宮崎県北部と大分県南部にまたがり北浦町、宇目町、北川町及び延岡市から構成されている。

実験は、北川の野地区の湾曲部で 2 回行った。調査地区内にマルチテレメトリシステムの送信局兼受信局を 1 局、受信局を 4 局及び情報制御所を設置し、以下の (1) と (2) の 2 点を目的として実験を行った (図-3)。

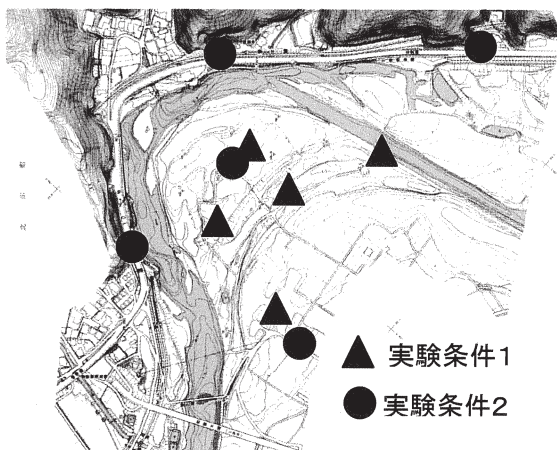


図-3 調査地における受信局設置状況

(1) インテリジェント機能、発信機からの電波伝搬などのマルチテレメトリシステムの実証

①送信局からの遠隔制御により発信機を制御できるか。また、遠隔制御によるスケジューリングにより多個体の同時追跡が可能か。②発信機から発信された電波が調査地区周辺の構造物、地形などで反射・回折し、位置特定の障害にならないか。

(2) 位置特定の精度の検証

精度の検証に関しては、発信機を一点に固定し、発信機の位置を DGPS (デファレンス GPS : 1 m 精度で位置座標を特定可能な GPS 測量) で特定する。その後、固定した発信機から電波を複数回発信させ、本システムで位置データを収集し、DGPS と本システムによる特定位置の差を検証した。なお、実験時、DGPS の衛星捕捉状態は良好で、既知の測量座標との整合性は精度 1 m 以内であった。

2. 3. 2 実験結果

留意点①については、2 回の実験ともにすべて問題なく機能し、発信機の遠隔制御、測定スケジュールの制御により多個体の同時追跡が可能であることが確認された。留意点②については、発信機から発信される電波は、受信局に到達するまで多くの影響を受け、電波到来角データが大きく変動することが確認された。単純に受信局で受信したデータを解析するだけでは、位置特定の精度は極端に落ちることが明らかになった。このため、位置特定プログラムを作成し、受信局から送信されるデータを複合的に解析することによって、位置特定精度は格段に向上することが確認された。

発信機が固定された位置と本システムが特定した位置の距離の差を示す。誤差距離は、実験1では $3.87 \pm 0.56\text{m}$ (信頼区間 95%)、実験2では $7.59 \pm 0.4\text{m}$ (信頼区間 95%) である (図-4、5)。

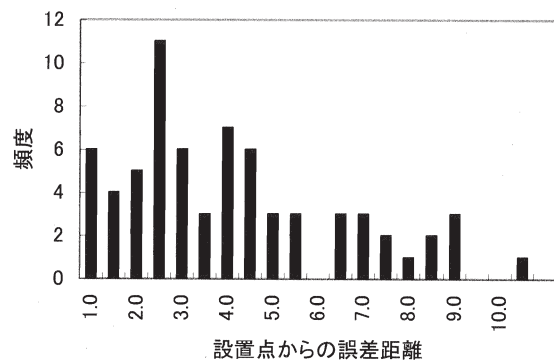


図-4 位置特定精度検証結果 (実験条件 1)

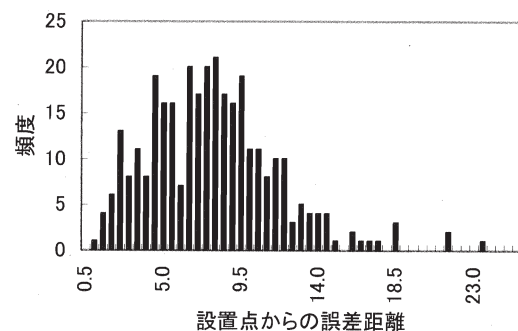


図-5 位置特定精度検証結果 (実験条件 2)

調査地区面積が小さい実験1では最悪の条件でも 10m 四方での位置検出、調査地区面積が大きい実験2では 20m 四方での位置検出が可能であることがわかる。実験1と実験2を比較すると、実験2が位置特定精度が低く、また、本システムでの特定位置のばらつきが大きいことがわかる。これは実験2の方が、発信機から受信

局まで電波が伝搬する距離が長く、受信局で得られる電波到来角データの精度が低いことが原因と考えられる。現在、受信局で得られる電波到来角データは、市販の無線機器から得られるデータを使っているが、この機器を改良すれば、位置特定精度の向上が期待される²⁾。

2. 4 MTS で追跡した野生動物の行動

2. 4. 1 野生動物の行動追跡実験の方法

土木研究所では、宮崎大学教育文化学部生態学研究室と共同で、MTS を用いた実際の野生動物、行動追跡実験を行った。本実験の目的は、実際の野生動物調査を通じ MTS の適用性を検証することである。調査地で動物を捕獲し、野生動物に MTS 発信機を装着し野生動物の行動を追跡した。追跡した野生動物は主に、チョウセンイタチ (以下、イタチ)、ウサギ及びホンダヌキ (以下、タヌキ) である。野生動物に MTS 発信機を装着し 30 分に 1 回の割合で野生動物の行動を追跡した。

2. 4. 2 野生動物の行動追跡実験結果

本報告ではホンダヌキの行動追跡結果を報告する。図-6 にタヌキの行動追跡結果を示す。タヌキは、昼間山で生活し、夜間、河川周辺を周遊することが明らかになった。河川周遊時に、河川内の特定地点で止まり、採餌・休息をとっている状況を MTS の追跡結果は示している。また、位置特定試験の結果から約 15m 程度で野生動物の行動軌跡を特定することが可能であることが示されている。本実験により MTS は野生動物の行動と物理環境の因果関係の定量的な解明に有用なツールであることが明らかにされた。

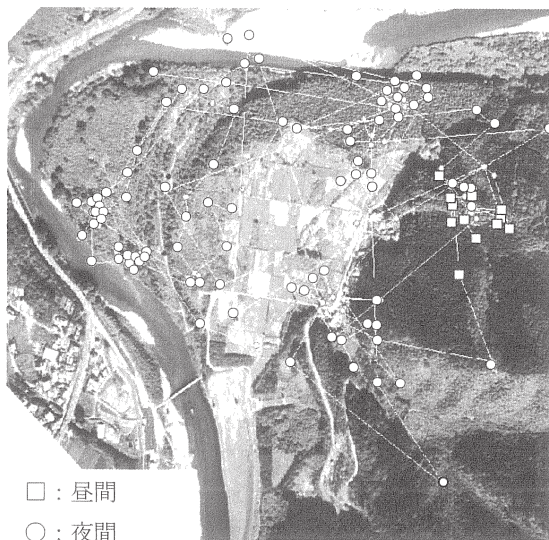


図-6 MTS によるタヌキの行動追跡結果

MTS は、他の野生動物 (イタチ、ウサギ) でも同様に野生動物の行動を追跡できることが現地実験により確認された。野生動物調査、特に、定量的に野生動物の行動、利用空間、行動周期等の調査には極めて有効な手法であることが示された結果となった。

2. 5 MTS の問題点

問題点 1: MTS は陸上中型哺乳類には有効手法であることが明らかになった。しかし、小型の陸上哺乳類や魚類、鳥類等、対象動物の拡大を考えた場合、MTS には大きな問題点があった。MTS のシステム構成図を参照しながら MTS の問題点を整理する。

MTS は調査地内に制御局、送信局、複数の受信局 (以下、受信システム) を設置し野生動物に MTS 発信機 (MTS で野生動物を追跡するための専用発信機、以下、MTS 発信機) を装着して放逐し、図-7 内に示すプロセスで行動を追跡する。

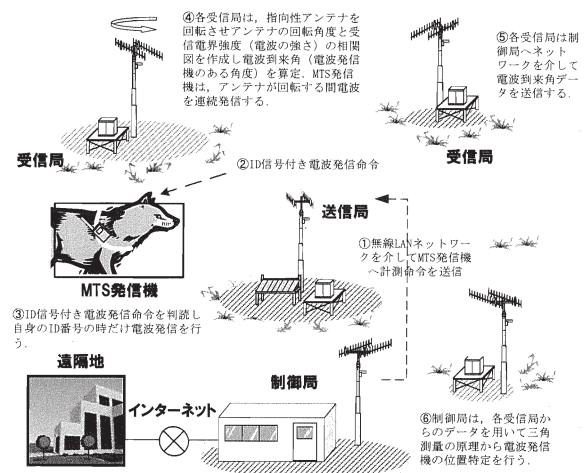


図-7 MTS の概要と制御フロー図

魚類行動の追跡を MTS で行う場合、プロセス②、④が特に問題になる。②での問題は、MTS 発信機が行う ID 認識・発信制御の実現には電子回路に CPU 搭載する必要性があり、MTS 発信機の電子回路を複雑にしていた。その結果、MTS 発信機の小型化が難しく、魚類等、小型野生動物等 (以下、小型生物) への装着が不可能であった。プロセス④での問題は、一定期間の電波の連続発信は電力消費が多く容量が大きい電池を必要とする点である。この問題も、MTS 発信機の小型化を阻み小型生物への装着を難しくしていた。MTS を小型生物に適用するには、水中への電波発信命令の送信を省略すること、小型の電波発信機を使用もしくは開発する必要があった。

問題点 2: 上記の問題点は MTS の機能に着目した問題点であったが、MTS の普及を考えた場合 MTS の

堅牢性、現地での設置の容易さ・可般性も問題となる。MTS は野生生物自動追跡システムの試作機として作成されているため、既存部品等を現地の試験状況に合わせ適宜組み合わせている部分が多い。構成する機器の機能、仕様等の統一化が図れていない状況も問題点として挙げられる。野生生物の位置特定を可能とするシステムアプリケーションは現地状況に合わせ設定する必要がありシステム導入費が増大する可能性がある。

2. 6 ATS の開発

2. 6. 1 ATS のシステム原理の開発 (問題点 1. の解消)

上記の問題点 1. を解消する最も有力な方法は、既存の小型テレメトリ発信機 (以下、従来型発信機) を小型生物に装着し MTS 受信システムで追跡する方法である。従来型発信機は、電子回路自体が単純化・小型化され消費電力も小さく長期間の電波発信 (長いものでは 1 年以上) を可能にしている。小型生物用も開発済みで実用性・経済性ともに利点が多い。また、従来型発信機は、電波発信命令がなくても一定間隔で電波発信を行うため水中への電波発信命令を省略できる利点がある。

しかし、従来型発信機を MTS 受信システムで追跡するにはプロセス④に問題がある。MTS ではアンテナが回転する間、MTS 発信機は電波を発信し続けるため各受信局で連続的なビームパターンを得ることが出来る。その結果、高精度な電波到来角推定が可能になり、高精度な位置特定が行える。一方、従来型発信機は、消費電力の節約・小型化のため電波を間欠発信する。結果として、ビームパターンは離散的な形状 (以下、離散的ビームパターン) となり、電波到来角の推定精度は極端に低下し野生動物の位置特定精度が低下するのが問題であった。

上述の問題を解消するため、離散的に取得されたビームパターンから連続的なビームパターンを推定する方法を検討した。検討時の観点としては、MTS のシステム構成を大きく変更する必要がなくプログラム上で対応可能な方法を検討した。離散的ビームパターンをスプライン補間等の汎用的な数値計算法³⁾で補間し、計算した連続的なビームパターンから電波到来角を推定する方法 (以下、補間方法) を考案した。補間方法に用いる数値計算法には、スプライン補間 (B-spline, Spline)、シャノンの標本化定理⁴⁾、LPF、DNF、直線補間の方法を複数実装し、電波受信状況に合わせ適宜選択を行った。

開発した ATS の概要、MTS との違いを以下に記す。ATS は、MTS を改良し従来型発信機に対応したもので、MTS 用発信機を製作する必要がなく従来型発信機に広く対応する。システム構成は、MTS は、制御局、送信局、受信システムで構成されたのに対し、ATS は制御局、受信システムのみで構成される。各受信局は、補間方法をシステムプログラムに実装し、従来型発信機を追跡する際に問題となる離散的ビームパターンを連続的ビームパターンに補間する作業を自動的に行うのが特徴となっている (図-7)⁵⁾。

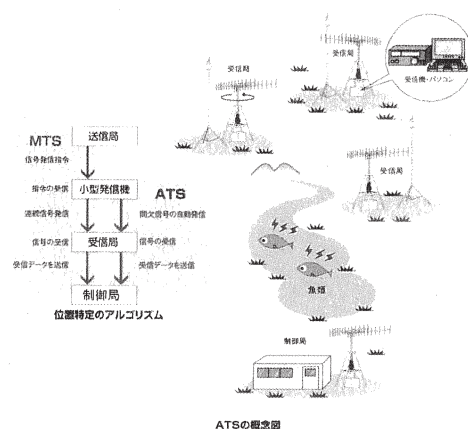


図-7 ATS の概要

2. 6. 2 MTS の汎用型機材の開発 (問題点 2. の解消)

MTS の汎用化を行うため以下の手順で MTS の構成を見直した。① MTS のシステム機能の機能分解。② システム機能を実装している構成機器・システムアプリケーションの再分類。③ 各システム機能の構成機器・システムアプリケーションの再検討、必要に応じての改善。④ 構成機器廉価版の制作、システムアプリケーションの汎用化。⑤ 廉価版、汎用化システムアプリケーションを用いた MTS の再構築。⑥ 北川においての、機能試験、現地実証実験。⑦ 長期間の現地実証実験による汎用型 MTS の機能評価。

MTS の汎用化の方法 (2.1①~③) の結果、北川で従来稼働していた MTS は、北川での現地開発 (既存無線機器等を組み合わせ現地状況に合わせて改良、システムアプリケーションの開発設定を行っていた。そのため、実装機器に関しては安定性、堅牢性が欠如していた。システムアプリケーションは、設定パラメータの体系化が行われていない状態で、システムアプリケーションの論理的な整合性に一部不備な点があった。このた

め、MTSの改良（MTSの汎用化の方法④～⑤）を行った。

その結果、汎用型MTSが概ね完成した。汎用型MTSは、システム構成機器自体が小型化し、簡易に移動・設置が実現できるようになった（図-8）。また、複雑なパラメータフィッティングが必要であったシステムアプリケーションを、三角測量を行う際の幾何的なパラメータと電波伝搬過程を考慮したパラメータに集約することができた。北川での設置・実証実験ではシステム設置・機能確認・パラメータフィッティングを約2日間で実現することが出来た。また、機能分解・構成機器の精査を行ったため、システム機能単位の動作が安定し長期間安定したシステム運用が可能になった（図-9）。今後は現地フィールドでの実証実験数を増やし、より汎用的なシステムへの改良を行う必要がある⁶⁾。

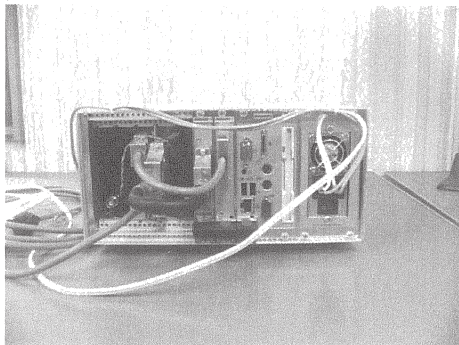


図-8 小型化したATS受信局（本体）

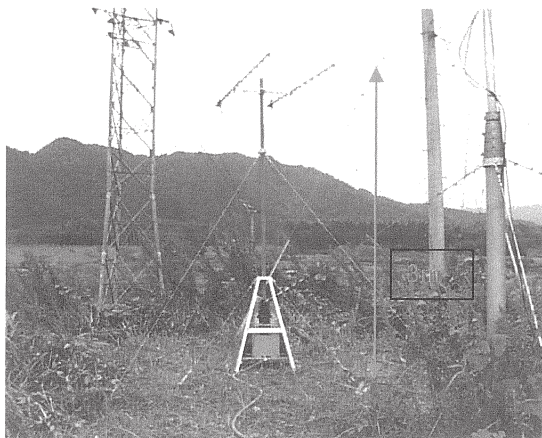


図-9 小型化したATS受信局（全体）

2. 7 ATSの位置特定機能及び精度検証

2. 7. 1 ATSの機能検証の方法

ATSの開発により従来型発信機の使用が可能になったことから、小型生物の行動追跡の可能性が向上した。そのため土木研究所内の調整池でATSの機能を検証す

る実証実験を行った。実証実験は、河川生態系研究上、重要な魚類を対象として行った。実証実験の概要を以下に示す。

1) 調査地の概要

実証実験は、土木研究所内の調整池（以下、実験池）で行った。実験池は、土木研究所及び周辺地域の調整池で逆L型の形状である。周囲長約590m、面積1ha、水深約1.3m程度で、河岸はコンクリートブロックで護岸されている。実験池の周囲にATSを（制御局1局、受信局3局）設置し、水中の従来型発信機特定の機能、実際の魚類行動追跡の機能の実用性を検証した。現地調査は、2004年10月16日から2004年10月27日までの12日間で行った。システム原理の実用性の検証として、水中に固定した電波発信機の位置特定、魚類に従来型発信機を装着しての行動追跡を行った。

2) 研究の方法

水中に固定した電波発信機の位置特定は以下の方法で行った。座標値が既知の基準点（以下、既知座標を基準座標とする）を実験池内に複数設置する（図-10）。電波発信機を固定した測量用ポール（木製、径40mm）を従来型発信機の位置が水面から0.5m、1.0mになるように基準点に固定した。その後、ATSで従来型発信機の位置特定を行い従来型発信機の位置をATSで特定できるかの検証を行った。また、基準点1、2に関しては、位置特定誤差を検証するために、ATSで複数回位置特定し座標値（以下、観測座標）を算出し、基準座標と観測座標の差を算出し位置特定誤差とした。解析には、平面直角座標世界測地系9系を使用した。



図-10 調査地及び基準点の概要

3) データ解析

ATSによる位置特定精度の検証として、ATS受信局における電波到来角推定の精度検証、ATSによる位置特定精度の検証を行った。電波到来角推定精度の検証では、受信局と基準点を結ぶ幾何的な角度と受信局が計測する電波到来角を比較し、その誤差を検証した。受信局と基準点の座標から、受信局と基準点を結ぶ直線を求め直線と真北が作る角度を正確な電波到来角（基準電波到来角）としATSが算出する電波到来角と比較し、その精度を検証した。位置特定精度の検証では、ATSで位置特定した全てのケースにおいて基準座標と観測座標を同一の相関図上にプロットし観測座標と基準座標の距離差を算出し位置特定誤差とした。

2. 7.2 ATSの機能検証の結果

水中に設置した電波発信機の電波を各受信局で良好に受信することができた。受信局1~3で最も離れた設置地点での電波も安定して受信することができた。また、各計測点で魚類が生息しそうな水草内や植生カバーの下等に発信機を設置した場合にも、良好な受信状態を確認できた。水深を変化させ、水面近くや底面付近に発信機を置いた場合でも受信局1~3で安定した電波受信が可能であることが判明した。

離散的なビームパターンを数値計算法により補間することで、電波到来角の推定精度は向上した。数値補間しない場合には電波到来角の推定精度が約12度だったのに対し、数値補間後は平均で約4.5度程度に向上した。また、電波到来角精度向上の効果が高いのは、DNF、B-spline、Splineの順で、電波到来角推定誤差は概ね4度であった。この結果、ATSでは主にB-splineを補間方法として採用し実装している（表-1）。従来型発信機を水中に固定しATSで位置特定をした場合、位置特定誤差は平均11.87mであった。従来型発信機の場所を変化させて位置特定誤差を検証した結果、水深に関わらず基準点1の方が良い結果となった。また、発信機設置位置の水深を変化させ実験した結果では水深0.5mの場合の方が基準点1、基準点2ともに位置特定誤差が少ない結果となった。水深1mの場合は位置特定誤差の平均が10m~15m程度あり、変動も大きい結果となった（表-2）。

表-1 電波到来角推定精度の検証結果

	数値補間なし		数値補間あり			
	B-Spline	Spline	Shannon	LPF	DNF	
平均	15	3.90	4.55	4.33	6.76	3.72
標準偏差	-	15.88	15.04	16.53	19.79	15.99

表-2 水中の発信機位置特定精度検証結果

	Case1	Case2	Case3	Case4	計
平均	1.57	8.39	7.40	15.61	11.87
中央値	1.39	5.89	6.95	15.60	9.64
標準偏差	0.93	5.93	2.48	7.03	7.56
分散	0.86	35.18	6.14	49.37	57.22
最小	0.24	0.68	4.03	0.96	0.24
最大	4.36	22.14	18.05	32.68	32.68
標本数	40	248	67	420	775

2. 8 ATSによる魚類行動追跡結果

2. 8.1 ATSによる魚類行動追跡の方法

実際の魚類に電波発信機を装着しての魚類行動追跡は、利根川水系霞ヶ浦土浦港付近で採捕したゲンゴロウブナ (*Carassius cuvieri*、全長30.5cm、体長26.5cm、湿重量592g、以下、供試魚) に従来型発信機(LOTEK社製、MBF-7A、直径16mm、長さ83mm、空中重量29g、水中重量16g)を装着し、ATSで3分に1回の頻度で行動追跡を行った。

ATSを用いて観測した供試魚の行動データを用いて、供試魚の行動圏解析(以下、行動圏解析)、供試魚の活動サイクル(以下、活動周期)を分析した。行動圏解析はATSで取得した供試魚の行動データをGIS(ESRI社、ArcGISVer9.0)に取り込んだ後、1日(0:00~24:00)ごとに整理した。その後、1日ごとの行動データを最外郭法で解析し行動圏の面積を算出し、行動圏の日変化を把握した。

2. 8.2 ATSによる魚類行動追跡の結果

ATSを用いて、供試魚の行動を12日間追跡することができた。この間、供試魚の位置を4130回、すなわち測定間隔約3分30秒に1回程度でサンプリングできた。供試魚の位置特定は、供試魚が水草群落内にいることが予測される箇所でも可能であった。

供試魚の移動範囲は、最小で30m²程度(例えば10月24日)、最大2100m²(10月22日)程度であった。行動範囲は観測日により大きく異なり、10月16日~19日までは400m²から980m²の行動範囲であったが、10月20日~23日までは650m²から2100m²の範囲を移動し、10月24日~27日までは37m²~

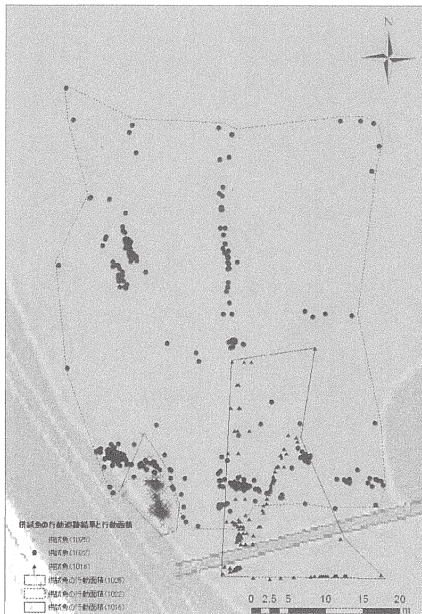


図-11 ATSで推定した供試魚の1日あたりの行動範囲

62 m²の範囲を移動している (図-11)。

3. 野生生物自動追跡システムを利用した野生生物調査手法の開発

3.1 地理情報システム (GIS) と野生生物自動追跡システム併用の可能性

MTS、ATSの開発の結果、野生生物の行動追跡を一定の範囲で量的に行えるようになり、野生生物の行動特性が量的に把握できるようになった。野生生物の保全を行うには更に一步踏み込み野生生物の生息空間の特性を把握することが重要である。すなわち野生生物がその生活史で必要とする物理環境特性を特定し河川改修事業等時に優先的に保全する必要がある。

近年、急速に普及が進むGISは、上記を行うために大きな可能性を秘めている。MTSやATSにより取得した野生生物の行動データをGIS上にオーバーレイし、物理環境情報と関係付けて解析することで、野生生物の空間選好性 (野生生物の物理環境の好き嫌い) 等の新たな情報を創出すると考えられる。本章では、(1)五ヶ瀬川水系北川での野生動物の行動と河川改修工事時の騒音振動との関係性を把握した研究事例の報告、(2)信濃川水系千曲川での出水時の魚類行動と流速の関係の研究事例の報告を通し、MTS、ATSを使用した新しい野生生物調査手法の開発結果を報告する。

3.2 大規模河川改修時の物理環境変化が野生生物の行動変化に与える影響

3.2.1 研究の方法

1) 調査地の概要

現地調査はMTSの実証実験と同じ五ヶ瀬川水系北川の野地区 (以下、調査地) で行なった。北川流域では、平成9年9月の台風19号に伴う豪雨により、甚大なる被害が発生した。この洪水を契機として、河川激甚災害対策特別緊急事業が平成9年より実施されて平成13年度に終了した。

北川は野地区付近で大きく湾曲し、湾曲の内側には植生が発達した高水敷が形成されている (図-12)。河川改修は流下能力不足の解消、河道断面積の確保を目的として行われた。具体的な方法としては、①高水敷の樹木の伐採、②高水敷の掘削、③低水路の部分的な掘削、④引堤による川幅の拡幅を組み合わせで行われた。調査地では、①高水敷の樹木の伐採、②高水敷の掘削に加えて新規築堤を組み合わせ河川改修が進められた²⁾。

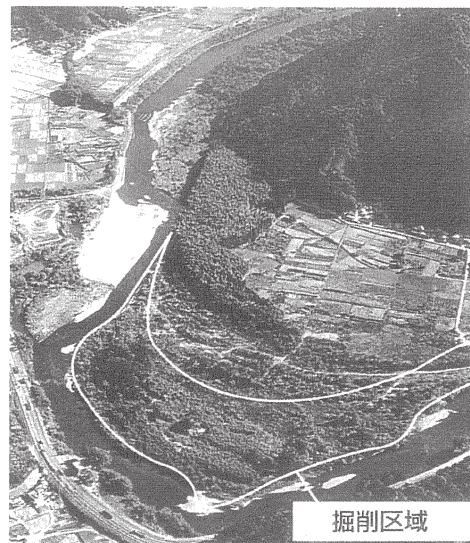


図-12 野地区の概要

2) 現地調査の方法

本調査では、河川改修工事時の野生動物 (タヌキ) をMTSで追跡した。また、河川改修工事時の野生動物の行動と騒音振動の関係性をGIS上で分析した。その方法を以下に示す。

野生動物の捕獲 (タヌキ) は野生動物の大型捕獲装置 (大型の箱ワナ) を用いて行った。大型捕獲装置による捕獲は、平成12年度から餌付けを行い夜間大型捕獲装置内部に侵入した野生動物を捕獲した。捕獲した野生動物にMTS用発信機を装着して放逐し

その行動を追跡した。上記の作業により、発信機を装着した野生動物の行動を概ね 30 分に 1 回の割合で追跡を行い、MTS にその移動軌跡を記録した。

河川改修工事による環境の変化が野生動物に及ぼす影響を把握するための基礎的な資料を得るために、調査地区における北川河川改修工事の実施状況についても記録した。記録した内容は、①各工区内での施工内容、②各工区内で作業した調査員人数、③各工区内で稼働した建設機械の機種と台数、④各工区内における調査員、建設機械の作業位置(概要)である。記録は工事が実施されている全ての日について行った。また、工作機械・作業員の動きを把握するため工作機械・作業員に DGPS (Trimble 社 PocketGPS)、ポータブル GPS (SONY POCKET GPS) を取り付けて、その行動を記録した。

河川改修時の騒音振動環境の把握のために、騒音振動データの計測を行った。河川改修工事の進捗状況により、主な騒音・振動源である工作機械の機種、台数及び稼働位置に変化が見られること、地表を被う植生の伐採や、掘削工事による地形の改変等により、騒音の伝搬特性に変化が予想されることから、河川改修工事の状況を考慮して 4 回の現地調査を行った。騒音に関しては調査地内で 15 地点、振動に関しては 25 点で計測した。騒音の評価量としては、等価騒音レベル LAeq (単位: dB、以下 LAeq とする。) を用いた。振動の評価量としては、80%レンジの上端値 L10 (単位: dB、以下 L10 とする。) の測定値を利用した。対象とする動物によって可聴音域等の周波数特性は異なるが、本調査では対象とする動物の可聴音域等の周波数特性が人間に等しいと仮定し LAeq、L10 を用いて評価を行った。

3) データ解析

河川改修工事に伴う騒音・振動環境の変化等と野生動物の行動の関係について GIS (ESRI 社 ArcGISVer8.2) を用いて解析した。まず、MTS で追跡した野生動物 (タヌキ・イタチ) の行動データの座標 (平面直角座標系 2 系) を GIS のポイントデータとしてインポートした。GIS では、野生動物の行動追跡結果を騒音・振動環境等の空間情報と結合するために、調査地をカバーする 16m 解析ポリゴン (以下、解析ポリゴン) を設定しているが、インポートしたポイントデータを解析ポリゴンと空間結合し、解析ポリゴン上のポイントデータ数を野生動物の解析ポリゴンの利用頻度とした。16m 解析ポリゴンの設定は、MTS の誤差特性を考慮したためである²⁾。

野生動物が利用した空間における騒音・振動データについては、タヌキ、イタチで別個のデータを用いて解析を行った。タヌキには、タヌキの行動データが得られた期間の工事状態に近い騒音振動の現地実測データを用いた。騒音振動の実測データは、調査地内でポイント的に計測しているため、面的な騒音振動の空間分布が必要になる。このため、騒音振動の実測データから GIS の空間解析機能である TIN を用いて内挿計算を行い騒音振動の空間分布を算出した。その後、16m 解析ポリゴンを内挿計算結果上にオーバーレイし解析ポリゴンに属性情報として格納した。

3.2.2 結果及び考察

1) タヌキの行動と騒音振動実測との関係分析

調査地内の騒音・振動の空間分布は河川改修工事区間 (高水敷掘削区間、築堤区間) を中心に高い値を示す結果となった。また、タヌキの行動追跡結果との比較を行うと、タヌキは調査地内の騒音・振動の少ない地点を中心に利用していることがわかる (図-13、図-14)。

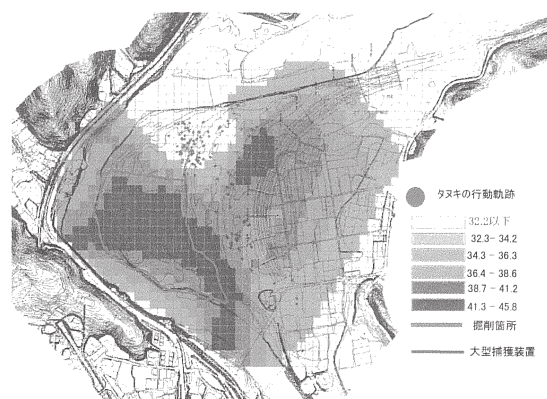


図-13 タヌキの行動と騒音分布

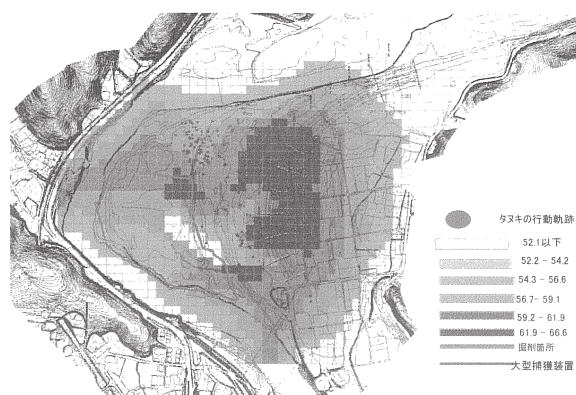


図-14 タヌキの行動と振動分布

騒音については調査地内で最も低いレベルの場所、振動については、調査地で工事箇所から離れた最も振動が少ない箇所を選択していることが示唆される結果となっている。

解析ポリゴンごとのタヌキの利用頻度と騒音データとの相関図(図-15)、解析ポリゴン毎のタヌキの利用頻度と振動データの相関図(図-16)を示す。騒音・振動レベルが増加すると利用頻度が減少する傾向があることが示されている。しかし、騒音・振動ともに同じ条件(騒音・振動データが同じ値)でも利用頻度が少ないデータもあることが分かる。このことは、タヌキは騒音・振動がより少ない空間を愛好するが騒音振動以外の要素にも影響を受け、利用空間を選択していることを示唆していると考えられる(図-15、図-16)⁷⁾。

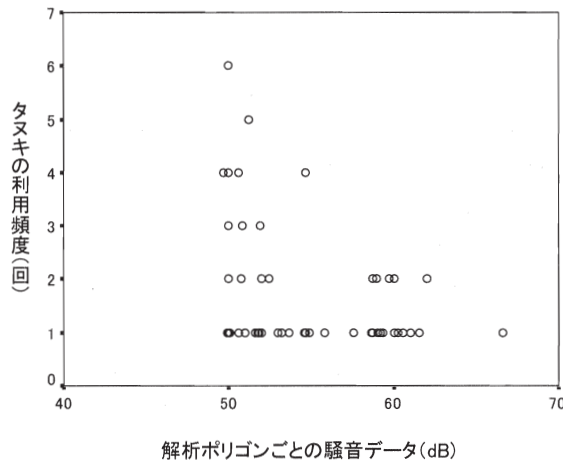


図-15 タヌキの行動と騒音の関係

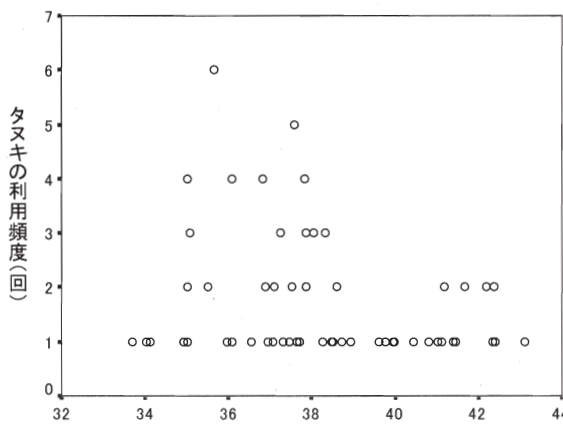


図-16 タヌキの行動と騒音の関係

3.3 出水時の魚類行動追跡と流況関係性の分析

3.3.1 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-17に示す。調査地は長野県境から95.6~97km区間で、流域面積2560km²、河道幅約100m、河床勾配1/200、河道両岸に築堤が行われている区間である(図-17)。

千曲川流域では2004年12月から2005年6月末まで、流量変化が少なく小規模な出水も確認されなかった。調査地でも2005年に入ってから6月30日に初めて小規模な出水を記録し、7月4日にはじめて調査地内で流量380m³/s程度の流量が確認された(図-18)。調査地の魚類群集は、ウグイ、オイカワ、ギンブナ、アブラハヤ、ニゴイ、モツゴを主とする10科24種の魚類が確認された⁶⁾。

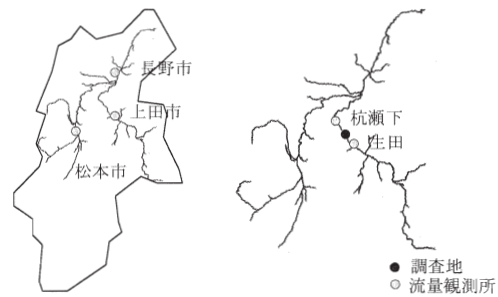


図-17 調査地の概要

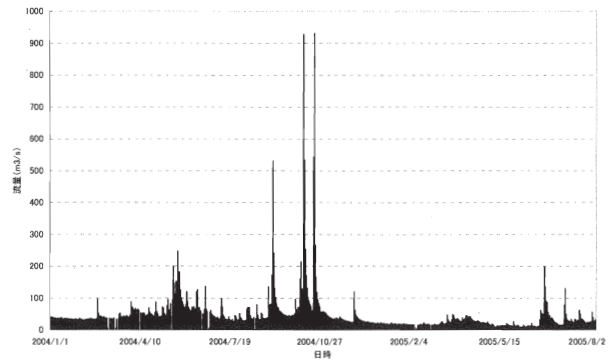


図-18 調査地の流量時系列

2) 調査地へのATSの設置

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。受信局を4局、制御局を1局設置した（図-19）。ATSが魚類行動追跡可能なエリア（以下サービスエリア）は約2.2km²である。受信局は、約250m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（アンテナ回転機）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。



図-19 調査地内に設置した受信局

3) ATSの位置特定機能の検証

調査地の河川内に電波発信機を固定しATSで位置特定を行い水中の電波発信機の位置特定機能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。

位置特定機能の検証では、サービスエリア内の魚類が利用すると考えられる瀬、淵等の景観要素を網羅するように電波発信機を水中に設置し検証した。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（図-20）。位置特定精度の検証では、水中に電波発信機を固定し（以下、固定点）、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。調査地内に固定点を12箇所設置し、位置特定精度を検証した。検証は、①電波発信機の位置特定成功率、②位置特定誤差（ATSで特定した座標値とDGPSで特定した座標値の差）の平均値、標準偏差を算出した。



図-20 調査地内の固定点の位置

4) ATSによる魚類行動追跡

調査地において、ニゴイ（*Hemibarbus labeo barbuis* 以下、供試魚）を投網（目合は18mm）を用いて4匹採集した。図-21、表-3に供試魚の概要を示す。供試魚を採捕後、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。

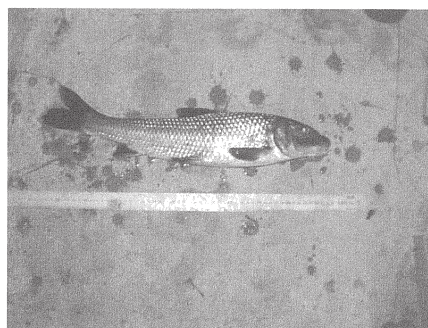


図-21 行動追跡を行った供試魚

表-3 供試魚の概要

魚種	採捕日	全長(mm)	体長(mm)	体重(湿重量:g)
ニゴイ	2005/2/23	503	440	1415
ニゴイ	2005/2/23	412	353	794
ニゴイ	2005/2/23	467	413	1195
ニゴイ	2005/2/23	443	396	987

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。

ATS による魚類行動追跡結果は、平水時の行動と出水時の行動に分け分析した。出水時の行動に関しては水理計算結果（固定床平面流計算）の結果と魚類行動データを GIS でオーバーレイし、関係性を分析した。

3. 3. 2 研究結果

1) ATS の位置精度検証結果及び考察

ATS の位置機能検証結果を示す。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 4、6 は測定成功率が低く固定点 6 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-4 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-22 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 が最も多く累積確率 25m までで約 80%となった。

表-4 ATS による位置特定精度

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

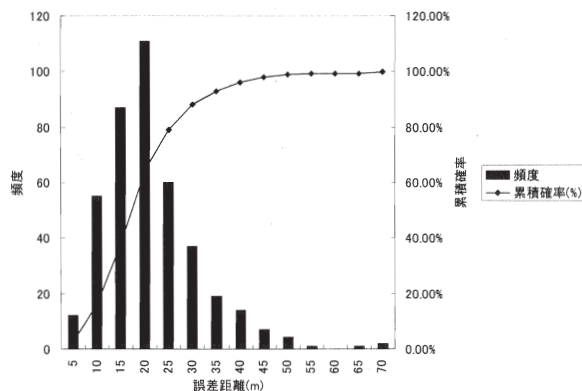


図-22 ATS の誤差ヒストグラム

このことから ATS により位置特定は誤差 20~25m 程度で位置特定が可能であると考えられる。

ATS による位置特定機能の検証の結果、ATS はサービスイリア内の固定点 6 を除いては、位置特定可能であることが明らかになった。ATS で位置特定が不可能及び測定成功率が低かった固定点の特徴は、ATS の受信局と固定点の間に、堤防の法面等、地形の起伏がある地点が多かった。固定点から発信された電波は地形の起伏により直接伝搬する電波が遮断され電波受信がされないことが多く、位置特定が不可能であったと考えられる。ATS 受信局設置の際、このような状況の発生を防ぐため電波伝搬シミュレーションを活用した ATS 受信局設置の設計論の構築等が今後の課題になると考えられる。

ATS による位置特定精度は、概ね 25m 程度と考えられる。この精度は、魚類行動と河川内の景観（瀬、淵等）を結びつけるには十分な精度があると同時に、瀬、淵等の中でもどの部分を利用していたかを把握するにも十分な精度があると考えられる。電波発信機の小型化等により、ATS の対象魚類を拡大すれば、河川に生息する魚類にとって重要な物理環境条件、景観の明瞭な把握が可能になり、より有効な魚類の生息空間保全を可能になると考えられる。

2) ATS による魚類行動追跡結果

ATS による魚類行動追跡の結果、供試魚は 3 月~7 月の約 140 日間淵の中に留まった。



図-23 平水時の供試魚の行動追跡結果

調査期間中、供試魚は淵の中で生息し約 4000m² 四方の範囲を移動し、淵の中でも水深が深く流速が遅いところを多く利用していた (図-23)。

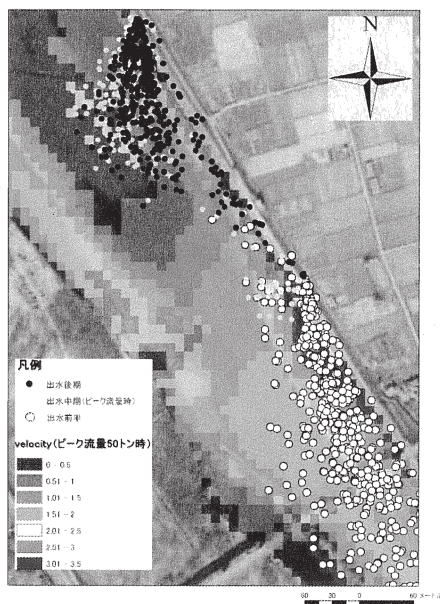


図-24 出水時の供試魚の行動追跡結果 (3月)

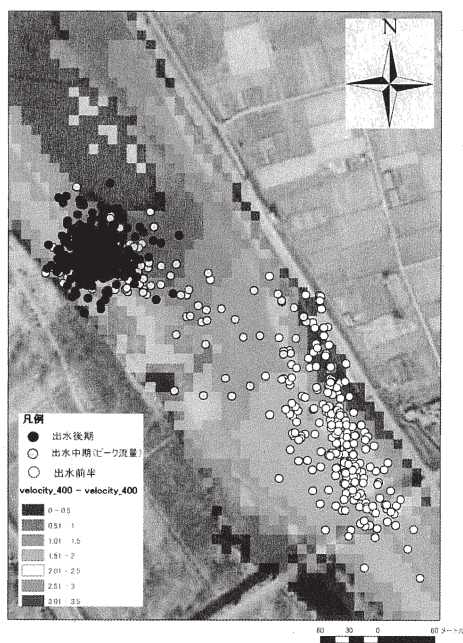


図-25 出水時の供試魚の行動追跡結果 (7月)

出水時の供試魚の行動と調査地の流速の関係を図-24に示す。調査地で3月17日～19日に小規模な出水が発生した。供試魚は流速の遅い空間を利用しながら下流へ流され下流側の淵を一時的に利用し、出水が終わり、しばらくしてから上流の淵へ移動した。

出水時の供試魚の行動と調査地の流速の関係を図-25に示す。調査地で7月4日～6日には中規模な出水が発生した。供試魚は、3月の出水と同様に流量の増加に伴い流速が遅い場所を利用し下流への流下を免れるが、7月出水は3月の出水と比較して流量が更に大きくなり流速が遅い区間がなくなると急激に下流へ流され通常は水域ではない高水敷上の流速が遅い空間を利用し流下を回避し、流量の減少と共に淵を利用した。

これらの結果から、供試魚は選好する空間 (流速が遅く、水深が深い空間) があり、平水時は、その空間を高頻度利用している。しかし、出水時には、変動する河川の流況 (水深、流速) に反応し流速の遅い空間を利用し下流への流下を回避していると考えられる。言い換えれば、この結果は、河川改修による河道内微地形の変化による河道内の流速・水深分布の変化 (以下、流況変化) は、平水時、出水時の魚類行動に大きな影響を与える可能性が高く、河川改修時には対象区間の流速・水深分布変化に代表される物理環境変がどのように変化するかを十分考慮した河川改修計画を策定する必要があることを示している。ATS は、流況変化と魚類行動との関連性を把握する上で、極めて有効なツールとなる可能性が高く、今後積極的な普及を図る必要があると考えられる。

4. まとめ

- 1) 野生生物の行動を自動追跡可能なマルチテレメトリシステム (以下、MTS) を開発した。MTS は①野生生物を複数個体同時に追跡可能、②野生生物の位置を誤差 10m 程度で特定できる機能が特徴である。また、五ヶ瀬川支川北川でタヌキの行動追跡を実現しその実用性を確認できた。しかし、MTS は MTS 専用発信機の小型化・長寿命化、システム導入コスト高い等の問題があった。
- 2) MTS の問題点を改良した ATS を開発した。ATS は、ATS 受信局の小型化、低コスト化、信頼性の向上等の改良に加え通常のテレメトリ調査で使用する発信機に対応した。この改良により ATS の追跡対象生物が拡大し魚類、小型哺乳類等の追跡が可能になった。信濃川水系千曲川ではニゴイの行動追跡等に成功した。
- 3) MTS、ATS を活用した野生生物調査手法として、MTS、ATS で取得した野生生物の行動データを

地理情報システム (GIS) を用いて物理環境情報と関係付ける手法を提案した。この手法により野生生物の行動と物理環境変化の関係性を把握できることが明らかになった。五ヶ瀬川水系北川では河川改修工事時の物理環境 (騒音・振動) 変化と野生生物の行動変化の因果関係、信濃川水系千曲川では出水時の魚類行動と流速分布の関係性が明らかになった。

- 4) MTS、ATS は野生動物の行動を定量的に取得ツールであることが明らかになり、GIS を用いて物理環境と結びつけることで野生生物の空間選好性等の把握がより定量的になることが明らかになった。MTS、ATS を用いることにより野生生物の生息空間保全がより有効になる可能性が示される結果となった。

参考文献

- 1) 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、pp215-222、2001
- 2) 傳田正利、島谷幸宏：生態系モニタリングのためのマルチテレメトリシステムの開発、土木技術資料、Vol. 43、No1、pp8-13、2001
- 3) E. クライツイグ著、北川源四郎、阿部寛治、田栗正章共訳：数値解析、培風館、1991
- 4) 福島晃夫：「情報理論」、コロナ社、1970
- 5) 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、pp459-464、2005
- 6) 傳田正利、尾澤卓思、岩本俊孝、久木田重蔵：新しい調査ツール、マルチテレメトリシステムを用いた野生動物研究、応用生態工学研究会、第 7 回研究発表会講演集、pp.49-52、2003.
- 7) 傳田正利、天野邦彦：新しい野生動物の研究技術—MTS と GIS の連携の可能性と今後の展開、土木技術資料、Vol. 46、No7、pp44-49、2004