

魚類行動自動追跡システムの開発と実用性の検証

DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF APPLICABILITY OF AUTOMATIC FISH POSITIONING SYSTEM

傳田正利¹・天野邦彦²・辻本哲郎³

Masatoshi DENDA, Kunihiro AMANO and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 独立行政法人土木研究所水循環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 工博 独立行政法人土木研究所水循環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 工博 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)

An automatic fish positioning system with transmitter was developed. The system, ATS (Advanced Telemetry system), can locate a transmitter in water with an average error of 11.86m. We carried out an experiment and succeeded in tracking fish behavior every 210 seconds during twelve days. The fish behavior data was analyzed and it showed that home range of the fish was 1,000m² in average, and the fish moved actively after sunrise and after sunset. This suggests that ATS is a useful tool for researching fish behavior and its preference.

Key Words: Telemetry, automatic fish positioning system, ethological pattern, home range

1. はじめに

魚類の生息環境の定量的評価手法の代表に IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) があり, その一部である PHABSIM (Physical Habitat Simulation) が多用されている¹⁾. 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, 魚種やその成長段階によって摂餌, 休息, 逃避, 産卵等の異なる行動状態を持つことが知られており²⁾, 更に魚類の生態に踏み込んだ考え方をする場合, 生息環境もそれに応じて時々刻々と変化するため, 様々な行動の側面について総合的に評価する必要がある³⁾.

楊ら⁴⁾は, この異なる行動状態に着目し, 「行動モード」と定義付け遊泳魚 (*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⁵⁾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.

既往研究に共通する概念は, (1)魚種, 成長段階, 行

動状態により魚類の行動は異なること, (2)魚類行動の変化が物理指標の選好性を変化させること, (3)生息環境評価を行う場合, 魚類が選好する空間が連結している必要性を指摘している点である. これらの概念は, PHABSIMのような手法を, より魚類生態を考慮した手法に発展させる上で非常に重要であり, 今後, こうした方向で積極的な研究を行うことが期待される.

しかし上記の概念を導入し実際の調査・研究を実施していくのには大きな問題がある. それは魚類行動データの取得である. 物理指標のデータについては, 既存技術で多くのデータを取得することが可能であるのに対し, 魚類行動データは, その取得が難しい. 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) があるが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・高機能化するマルチテレメトリシステム (Multi telemetry system, 以下, MTS) を開発し中型陸上哺乳

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。また実際の魚類行動を追う実証実験でも連続12日間の魚類行動追跡に成功した。本研究では、①開発したATSと機能検証の結果の概要、②実際の魚類の行動をATSを用いて追跡した実証実験の結果、③ATSによる魚類行動追跡実験結果を用いた行動生態学的解析を通してATSを魚類行動の解析に利用する利点についての検討、以上の3点の報告を行い、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を議論することを目的とする。

(1) MTSを魚類行動追跡に利用する場合の問題点

③各受信局は、指向性アンテナを回転させてアンテナの回転角度と受信電界強度（電波の強さ）の相関図を作成し電波到来角（電波発信機のある角度）を算定。NTS発信機は、アンテナが回転する間電波を連続発信する。

受信局

②ID信号付き電波発信命令

送信局

①無線LANネットワークを介してNTS発信機へ制御命令を送信

NTS発信機

③ID信号付き電波発信命令を判別し自身のID番号の時だけ電波発信を行う。

遠隔地

制御局

インターネット

④制御局は、各受信局からのデータを用いて三角測量の原理から電波発信機の位置特定を行う。

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、魚類への装着が不可能であった。また、水中への電波発信命令の送信、MTS発信機の判読は、技術的に実現が難しい。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河川に生息する魚類に適応することを難しくしていた。魚類にMTSを適応する場合には、水中への電波発信命令の送信を省略すること、

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⁷⁾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）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⁸⁾、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-2)。

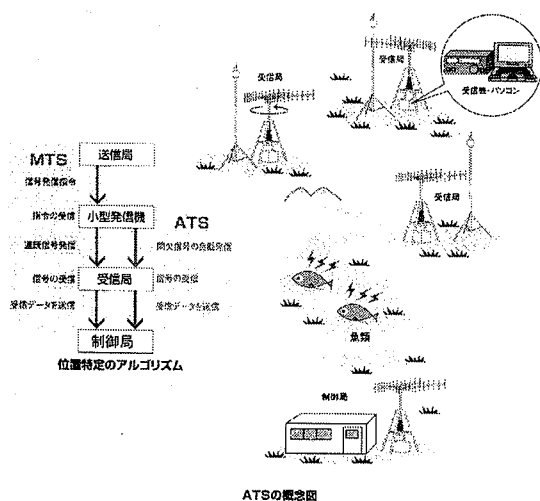


図-2 ATSの概要

3. ATSの実証実験

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、魚類行動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の機能を検証する魚類行動追跡の実証実験を行った。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。

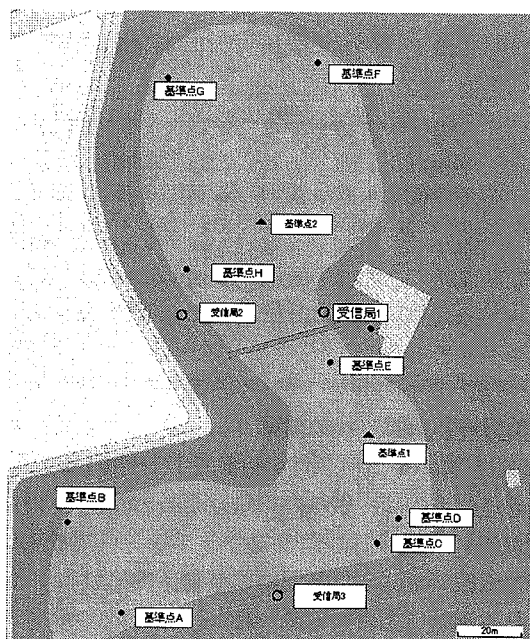


図-3 調査地とATS実証実験の概要

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、平均水深約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。実験池内には、主にエビモ（*Potamogeton crispus*）等の水草が繁茂し大きな植物群落（以下、水草群落）を形成している。実験池の魚類群集は、コイ（*Cyprinus carpio*）、ギンブナ（*Carassius auratus langsdorfii*）、オオクチバス（*Micropterus salmoides*）、ブルーギル（*Lepomis macrochirus*）で構成され、ブラックバス、ブルーギルが優占する魚類群集である。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。

(2) 現地調査の方法

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。

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-2）。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。

表-1 水中の発信機位置特定精度検証の実験概要

Case	基準点		水深(m)	
	1	2	0.5	1
1		○	○	
2		○		○
3	○		○	
4	○			○

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（図-4参照）。供試魚への装着方法は、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、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に保った。供試魚の行動が安定したことを確認後、供試魚を実験池内に放流しATSを用いて行動追

跡した。



図-4 供試魚と装着した従来型発信機の概要

(3) データ解析

a) ATSによる位置特定精度の検証

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。

b) ATSによる魚類行動データの分析

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⁹⁾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。また、行動圏面積に顕著な変化が生じた場合、気象（降水量、気温、日照時間等）との関係を定性的に分析した。活動サイクルの分析は供試魚の移動を1時間毎の移動距離の総和（以下、移動距離）として算出し、移動距離の時系列変化からその周期性（活動周期）を検証した。また、算出した活動周期と既往知見との整合度を評価しその妥当性を検証した。

3. 結果

(1) ATSによる水中の電波発信機位置特定機能の検証

a) 水中にある従来型発信機からの電波受信の可能性

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。

b) 各復元方法による電波到来角推定精度の比較と電波到来角推定精度の検証

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-2）。

表-2 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

c) 水中の電波発信機位置特定精度の検証

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11.87 mであった。場所を変化させて位置特定誤差を検証した結果、水深の深さに関わらず観測点1の方が良い結果となった。また、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-3）。

表-3 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

（単位：m）

(2) 魚類行動追跡実験でのATSの実用性の検証

a) 魚類行動追跡実験の結果

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2100 m²（10月22日）程度であった。行動範囲は観測日より大きく異なり、10月16日～19日までは400 m²から980 m²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37m²～62m²の範囲を移動している（図-4）。

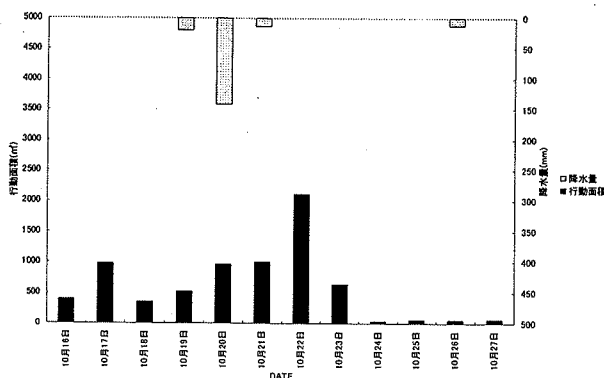


図-5 供試魚の1日当たりの移動量の変化と降水量の関係

気象と魚類行動の関係で特徴的なのは、台風による降雨と魚類行動の関係である。10月20日～22日までにかけ台風23号が実験池付近を通過している。10月20日～21日にかけて激しい雨となり、このため3日間の累積雨量で175mmを記録し調査地の水位は0.7m程度上昇し2m程度となった。供試魚は台風通過後、活発に活動し通常の2倍程度活動した(図-5)。

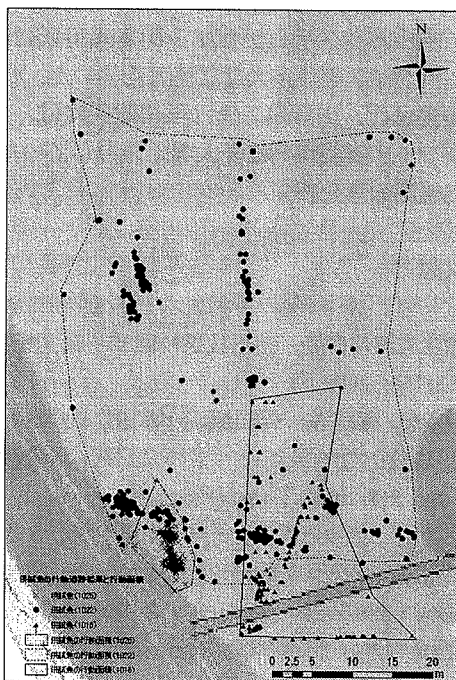


図-6 ATSで推定した供試魚の1日あたりの行動範囲

b) 魚類の一日の活動サイクル分析

実験期間中の供試魚の一日の活動サイクルを示す(図-6)。移動距離は時刻により大きく異なった。0時～4時までは移動距離は少ないが、5時～6時、8時～9時は移動距離が大きい。その後、14時～15時、18時～20時まで他の時間よりも平均移動距離が大きくなっている。日により移動距離に変動があるが、供試魚の行動に一定の周期性が認められる結果となっている。

4. 考察

(1) ATSの水中の電波発信機位置特定機能の検証

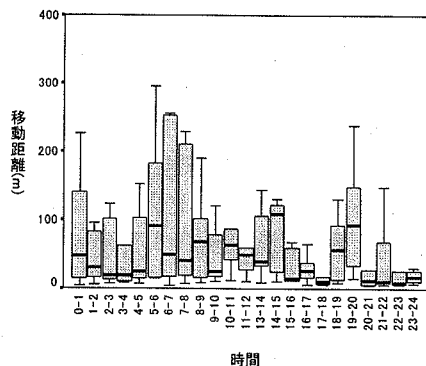


図-7 供試魚の行動サイクル

水中に電波発信機を固定しATSで位置特定をした全ての実験ケースで、ATSは水中の電波発信機の位置特定が可能であった。この実験結果は調査地規模のフィールドでATSは水中の電波発信機の位置特定が可能であることを示している。また、補間方法により電波到来角の推定が向上した結果、電波到来角推定精度は約4度、位置特定は誤差11.86m程度で水中の発信機の位置特定をすることが出来るようになった。この結果は、電波発信機を装着した魚類が急激な移動を行わない場合、今回のATS配置では水中の魚類を11.86m程度で特定可能であることを示している(表-3)。

ATSはテレメトリ法と比較して誤差特性が明確で均質なデータを取得できる特徴がある。ATSを利用した魚類行動調査を行うことで魚類行動追跡データの質・量を事前に計画することが出来、定性的な調査になる傾向が大きかった魚類行動データを向上させる可能を有している。魚類行動データの誤差特性が明確となることは、これと共に解析される物理指標(水深、流速、底質等)の取得空間スケールの決定を合理的に行う上でも有利である。PHABSIMでは魚類行動データと同時に物理指標のデータ取得をする必要があるが、その場合、空間を解析メッシュで分割し物理指標(水深、流速、底質等)の属性情報を収集する必要がある。解析メッシュの設定は既往文献等を参考に経験的に決められることが多いがATSをPHABSIM調査に利用することにより魚類行動調査に合わせ解析メッシュを計画的に決めることが出来る利点があると考えられる。

実際の河川・湖沼を対象とする場合、実験池と比較して広範囲なエリア対象とし実験池と同じ機能を保つには受信局を増設する必要がある。実際にフィールドに適応する場合受信局を最適に配置する方法の検討が必要である。またATSの電波到来角推定精度では、誤差は受信局から200m離れた地点では50m程度と位置特定精度は悪化する。今後は電波到来角推定精度を改善し位置特定精度を向上する必要がある。

(2) ATSによる多量の行動データ収集、時空間的連続性がある行動データの利点

実証実験の結果、ATSはテレメトリ法と比較して魚類

行動データを一定間隔で多量に取得出来ることが明らかになった。時間的に連続したデータを取得出来る。この特性は魚類行動解析に2つの利点を提供する。

一つの利点は、魚類行動データの増加による行動データの解析精度向上である。今までのテレメトリ法では魚類行動データの取得は物理的に制限されていた。しかし、ATSにより多量の行動データの取得が可能になり行動データの数、時間間隔に依存するデータの信頼性が向上すると考えられる。例えば行動圏の推定のように時間間隔が一定で行動データ数が多く取得する必要がある解析の精度向上が期待される(図—5)。空間選好特性、利用頻度が高い空間同士の距離計測等も同様に精度向上が期待されると考えられる。

二つ目の利点は、時間的に連続した行動データが取得できることである。ATSは高頻度にはば欠測がなく行動データを取得している。この特性は短期では魚類の行動周期の解析に寄与し(図—6)、長期の時間スケールでは、行動モード、成長段階に応じた空間選好性変化の把握に大きく貢献すると考えられる。

短期スケールの特徴としては、ATSにより供試魚が日の出後約1時間、日没後約1時間に活発に活動することが把握できた(図—6)。この特性は、釣り人の間で魚類がよく活動しているとされる経験則と概ね一致する。ATSを用いることにより既往の知見をより定量的に捕らえなおす可能性を示唆している。

長期スケールについては、魚類の行動モード変化による行動特性の変化、成長段階に応じた空間利用特性の変化を把握できる可能性を示唆している。図—4に示すように、台風通過に伴う激しい降雨の後、供試魚はその行動範囲を大きくし平常時の行動とは異なる行動をとっている。この結果は、魚類が外部の物理的環境に敏感に対応し行動モードを変化させる可能性を示唆するものである。ATSでは1年以上の発信期間がある従来型発信機を追跡できる。ATSを用いて長期間魚類行動追跡を行うことが可能になれば、行動モード、成長段階に応じた空間選好性の変化等新たな情報を提供することが可能と考えられる。

しかし、ATSを始めテレメトリ法にも問題がある。電波発信機の体内への埋め込みは供試魚の行動に何らかの影響を与えた可能性があり、データ分析時、影響を考慮する必要がある。テレメトリ法は万能ではなく、現段階では、電波発信機の小型化・長寿命化は一定の限界がある。そのため発信機を装着する魚種、個体、調査期間は限定される面がある。例えば発信機装着可能な個体は35g以上の重量が必要等の制約がある。今後、このような制約をなくしていくためにより一層の技術開発・改良が求められると考えられる。

5. 結論

(1) 魚類に既存の電波テレメトリ手法で用いられる電波

発信機を装着し魚類行動を自動追跡できるATSを開発した。

- (2) ATSは水中にある電波発信機のある方向を誤差平均4.5°で推定し、今回の調査における受信局配置では、誤差平均11.86mで位置特定することが可能であった。
- (3) 実際の魚類行動をATSで追跡した結果、3分30秒に1回の割合で位置特定が可能になり12日間行動追跡に成功した。
- (4) ATSで取得した魚類行動データを用いて、行動生態学的解析を行った。その結果、魚類行動範囲は1日約1000m²を移動し、日の出日の入り直後活発に活動することが明らかになった。
- (5) ATSを用いることにより、PHABSIMに代表される物理環境を通した空間評価手法の高度化に貢献する可能性が示唆された。

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。㈱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多大なご協力を頂いた。㈱アイナスの池田勝彦氏、内藤慎二氏、早川聡氏には、ATSのシステムソフトの実装作業に多大なご協力していただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 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, pp155-160, 2000
- 2) 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、No. Pt2, pp83.1-10, 1996
- 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、河川技術論文集、Vol. 10, pp43-48, 2004
- 4) 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、No636/VII-13, pp35-45, 1999
- 5) 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, pp167-172, 2000
- 6) 傳田正利・島谷幸宏・尾澤卓思・岩本敏孝・久木田重蔵：野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
- 7) E. クライツィグ著・北川源四郎・阿部寛治・田栗正章共訳：数値解析、培風館、1991
- 8) 福島晃夫：「情報理論」、コロナ社、1970
- 9) 巖佐庸・松本忠夫・菊沢喜八郎・日本生態学会編著：生態学辞典、共立出版、pp462, 2003

(2005. 4. 7 受付)