無線認識技術を用いたアユの行動特性実験 -周囲の明るさ変化に対する反応-

RFID TAGGING EXPERIMENT ON THE EFFECT OF DECREASING
LIGHT LEVELS ON THE BEHAVIOR OF AYU FISH

山本亮介¹・本田晴朗²
Ryosuke YAMAMOTO and Haruo HONDA

¹正会員 工博 (財)電力中央研究所 水域環境領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²非会員 農博 生物環境領域 (同上)

Automatic passing fish detection system using RFID (Radio Frequency IDentification) technology was developed to provide information on movement and behavior of Ayu fish (*plecoglossus altivelis*) within a fishway. In this study, movements of Ayu fish were deduced from detection signals of sensing antennas placed at each remote location to be monitored. To accomplish this, a newly application software which help controlling multiple RFID readers, determining fish locations and logging the detection status was developed. Using developed system, the effect of decreasing light levels on the behavior of Ayu fish within the fish tank was examined. It was found from the result that most of Ayu fish ascended or descended the channel response to the change of light levels and their location was associated with water velocity.

Key Words : RFID, *plecoglossus altivelis*, riverine environment, fishway, suitability criteria

1. はじめに

河川環境の保全では、生息する動植物の保護が重要となる。特に日本の河川では、アユやヤマメなどの魚類が保護の対象となる事が多く、河川の減水区間において、ダムからの放流量を季節別に調整したり、移動を阻害しないよう魚道を設置する等して、これら魚類への配慮を行っている事例が多い。保護対象となる魚類の中でも、アユは清流を代表する魚として親しまれており、また、内水面漁業や遊漁の対象としても重要な魚種であるため、地域住民や漁業関係者などの関心は高く、河川環境の保全を考える上で、特に重要な魚種となっている。

アユの生息・産卵環境の整備・保全を進める上で、重要となるのがその行動特性の把握である。瀬・淵の利用状況や短期的・長期的な河川内での移動特性、出水や周囲の明るさなど物理的環境の変動に対する応答特性、そして、選好する地点の水利特性等を詳細に把握できれば、河川環境の整備・保全を考える際に非常に有用なものとなる。アユは川と海を往来する回遊魚であり、遡上期・成長期・降下産卵期と季節によって異なる生活様式を示すことが知られている。そのため、詳細なアユの行動特性の把握には、長期間連続的に追跡・調査するための手

法が必要となる。このような技術は、魚道の利用状況の確認や、近年、適切な河川流量を評価するために活用される事例の多いPHABSIM¹⁾の適性基準モデルの構築にも資することができ、現在、その早期確立が望まれている。

魚の行動把握に関する試みとしては、ラジオテレメトリ技術を用いた研究が実施されている。これは魚体に電波発信器を付け、その信号を追跡することにより、河川内での魚の位置情報を取得しようというものである。これまでは、サケ・マス類のような比較的大型の魚種に対して適用される例が多かったが、最近ではアユのような小型魚に対して適用した報告例もある²⁾。ラジオテレメトリ技術は、比較的確立された技術である一方、位置精度が一般的に若干悪いこと、また、判別できる発信器の数に制限があること、そして、発信器側に電源を必要とするため、追跡できる時間が電池容量に依存すること等の制約がある。

一方、ラジオテレメトリ技術とは主用途が異なるが、非接触で情報をやり取りできる技術として、RFID (Radio Frequency IDentification, 無線周波数認識システム) がある。これは、小型のICタグに記録された情報を非接触で読み書きするシステムであり、タグ自体が小型で電源が必要でないこと、タグ自体が比較的安価である

こと等から、製造や流通、サービス分野等、多くの業種で幅広く導入されている。トレーサビリティ確保のため、牛などの生きた動物に装着して利用される例も多い。

幅広い分野で利用されているRFIDであるが、養殖場等において魚を管理するために利用される例はあるものの、魚の行動特性を把握するために本格的に利用した例は少ない。そこで、本研究では、アユの行動特性を個別に長期間自動的に把握する手法の確立を目指して、RFIDを利用した魚類の検知・追跡システムの構築を行った。そして、自動的にアユの行動を追跡できるという本システムの特徴を生かし、実河川の調査では把握する事が難しい、周囲の明るさが徐々に暗くなっていく環境下でのアユの行動特性を調べるための室内実験を実施し、アユの日周活動に関する生態把握に資する事とした。

2. RFIDを用いた魚類検知・追跡システム

(1) RFIDシステムの構築

RFIDは、電波を用い非接触でデータキャリアを自動で認識する技術で、メモリ機能のあるICチップおよび小型アンテナが埋め込まれたICタグとリーダ/ライタが無線で通信し、個々のIDの識別やデータの読み書きを非接触で行うことができる。RFIDには、複数の周波数帯が規格化されており、使用する電波の周波数帯で通信距離や耐ノイズ性、使用できるICタグの形状・大きさ等の特徴が異なる。本研究では、指向性が緩い、水の影響が少ない、無線基地局の申請手続きが不要で取り扱いが容易、既に日本に導入されてから20年近い実績のある等の理由から、低周波（135KHz以下）を使用するRFID製品を使用することとした。

本研究で構築した魚類検知システムの概要を図-1に示す。システムの基盤となるリーダ/ライタユニットは、米TEXAS INSTRUMENTS社製のRFモジュール（RFM-007B）とコントロールモジュール（RI-CTL-MB2B）を組み合わせ使用した。また、ICタグは同社製のガラス封入型タグ（RI-TRP-RR3P）を用いることとした。構築する検知システムには、これらに加え、リーダ/ライタの制御や検知したID情報を収集保存するためのPC用プログラムとアンテナが必要となる。特に、魚の移動を追跡するためには、複数のアンテナを同時に組み合わせて使用する必要があり、これは本来のRFIDの使用形態と異なることから、複数のリーダ/ライタを同時制御するためのWindows OS用ソフトウェアを新規に開発した。これは、複数のリーダ/ライタの制御の他、検知状況をPCの画面上でリアルタイムに確認・保存し、また、検知結果を解析してICタグのID別の出現頻度や時系列でのアンテナ別の出現状況をグラフで表示することができる機能も併せ持つ。また、アンテナについても、市販製品は数種類の特定サイズのみであることから、水中での長期使用が想定されていないことから、本研究では独自に耐水

仕様のカスタムアンテナを製作した。製作したアンテナは、アンテナ線にポリウレタン銅線を用い、これを耐衝撃性硬質ポリ塩化ビニル管で覆うことにより防水性を確保している。作製したアンテナ（650mm×600mm）のタグ検知性能を確認したところ、その最大検知距離はアンテナ面から約330mmであった。

(2) アユへのICタグ装着方法

本研究では、水中での使用を考慮して円筒状のガラス封入型ICタグ（長さ23.1mm、直径3.85mm、重さ約0.6g）を使用した。このICタグのアユ体外および体内への装着方法について、室内水槽においてアユへの装着実験を行い、問題点や魚への影響等を調べた。

まず、体外への装着は、予めタグピンにICタグを熱収縮チューブで固定しておき、これをタグガンで魚体に装着する方法を採用した。魚体の取り付け位置は、脊柱線上（背ビレの前方、背ビレと脂ビレの間）や神経間棘（体側背ビレ付近）、血管間棘（体側臀ビレ付近）へ装着する方法を試した。その結果、ICタグ装着の容易さ、装着によって魚体にできる傷、游泳能力への影響、タグの外れにくさの観点から総合的に判断すると、体側背ビレ付近の神経間棘が一番問題の少ない装着位置であることがあきらかになった（図-2）。この位置にタグを装着したアユは、水槽内で馴致後、装着しないアユと同様に摂餌活動を行い、また、なわばり行動を示すなど、基本的な游泳能力に影響が無いことを観察により確認した。なお、このタグ付きアユは、室内水槽飼育で3ヶ月以上問題なく生存した。

一方、これとは別に、アユの腹腔内へ挿入する方法についても検討を行った。これは、麻酔した魚体の腹側に7mm程度の切れ込みを入れ、ICタグを腹腔内に挿入し、傷口を外科手術用瞬間接着剤で塞ぐ方法である。腹腔内

図-1 システムの概要

図-2 ICタグの装着位置

へタグを挿入し、術後の予後経過を室内水槽で観察したところ、施術が成功した個体については、術後3ヶ月以上の生存を確認した。体内への装着は、若干施術に慣れが必要なため、体外への装着と比較する万人ができる作業ではないが、上手く施術できれば、魚体への傷も小さく、游泳能力への影響やタグ脱落が無い、効果的な方法であることが確認できた。

3. 周囲の明るさの変化に対するアユの応答実験

(1) 実験の概要

アユは、昼行性の魚で夜間はほとんど活動しない。強固ななわばりを持った一部のアユを除き、夜間は休息のため、流れの緩やかな淵や川岸近くに移動し、夜明けとともに流れの速い瀬に出て摂餌活動を開始するとされている^{3,4)}。アユの日周活動については、このような生態が一般的に知られているが、夜間暗中で調査や実験が難しいことから、その行動特性の詳細があきらかにされた例は少ない。本研究では、このようなアユの日周活動に関する生態把握に資するため、構築した魚類検知・追跡システムを用い、周囲の明るさの変化に伴うアユの行動特性に関する室内実験を実施した。

(2) 実験装置

本室内実験で使用した室内実験装置の概要を図-3に示す。FRP製回流型水槽（8m×2m、水路幅0.6m）内にICタグを検知するためのNo.0からNo.7までのアンテナ（高さ0.65m、幅0.6m）計8つを図の位置に配置した。そして、水中ポンプ（最大吐出量260L/min）を計6個設置することにより、水槽内に流れを発生させた。ポンプが水中に設置されており、また、水槽に曲がり部もあるため、これらが流れの抵抗となり、回流水槽内の流速は一定ではなく、流速分布を持つこととなる。また、水槽内の水温は冷却装置によって制御することが可能となっている。なお、回流水槽内は2枚のステンレス製網によって仕切られており、アユが進入できない区間が設けられている。

(3) 実験条件

実験中の水槽内の水深は0.4mで一定となるよう調整し、

また、水温は23℃に設定した。別水槽にて長期飼育していたアユ13尾（オス7尾、メス6尾、平均全長163.7mm）を回流水槽のNo.5アンテナ近傍より放し、5日間の訓致後に実験を開始した。なお、実験に使用したアユは、千葉県が生産した人工種苗を手賀沼漁業協同組合が自然日長下で養殖したものである。また、本実験では、取り付けの容易さを優先し、体側背ビレ付近の神経間棘にICタグの装着を行っている。

実験では、室内照明を全灯状態で約5時間保持した後、完全消灯状態まで一時間近くかけて段階的に消灯していくことにより、日没のように水槽周囲の明るさを変化させた。検知したタグ情報の記録は消灯開始30分前から実施し、完全消灯後3時間30分程度、計5時間行った。そして、これを約3日の間隔を空けながら、同条件で計4回繰り返し行った。実験期間中は、アユは回流水槽に放したままの状態とし、給餌は毎日一度、実験開始約5時間前に行った。

(4) 実験結果

a) 回流水槽内流速分布

回流水槽内の流速分布を測定した結果を図-4に示す。図は、電磁式流速計を用いて測定された各アンテナ設置断面および各アンテナ中間地点の平均流速である。図より、ポンプ群に近いNo.0からNo.2アンテナまでの区間は流速が速く、特にNo.0アンテナ付近は流速0.8m/s程度とアユが遊泳するには若干速い流速となっていること、また、No.2からNo.7のアンテナ間は流速約0.2m/s前後で一定となっていることが確認できる。本研究では、No.0からNo.2アンテナまでの区間を“流速の速い区間”、

図-4 回流水槽内の流速分布

図-3 実験装置の概要

No.2からNo.7アンテナまでの区間を“流速の遅い区間”と便宜的に呼ぶこととする。

b) 周囲が十分明るい環境での選好流速

全灯時（実験開始後30分間）に記録された個々のアユが検知された地点（アンテナ番号）の時系列データと前項で示した各アンテナ設置場所の平均流速から、周囲が明るい場合にアユが選好している流速を調べた。個々のアユが検知された地点の記録から、そのアユが全灯中に主に定位していた地点を特定し、その頻度をまとめた結果を図-5に示す。図より、周囲が明るい場合には、主にNo.1アンテナとNo.2アンテナの各設置地点付近で定位しており、その割合は7割弱（図中N1とN12、N2の合計）にあたることからわかる。

著者らは、過去に室内実験により、成長期と産卵期におけるアユの選好流速を調べ、アユの選好流速がアユの体長と比例関係にあることを明らかにしている⁵⁾。この既往の試験で得られた成長期のアユの選好流速 $y(\text{cm/s})$ と体長 $x(\text{cm})$ の関係式は次式で表される。

$$y = 5.403x - 44.846 \quad (1)$$

今回の実験より得られた個々のアユの全長とその主な定位地点の平均流速の関係を図-6に示す。図より、今回実験に使用したアユの約7割が上記(1)式から得られる選好流速 $\pm 0.1\text{m/s}$ の範囲の流速を定位位置としていたことが確認できる。

c) 明るさの変化に伴うアユの行動

構築した検知システムを用いて、明るさの変化に伴う個々のアユの回流水槽内の行動を追跡した。その結果を

図-5 周囲が明るい場合の選好位置

図-6 アユの体長と選好流速の関係

整理するため、ここでは、実験中のアユの行動をまず二つの様式に分類することとした。すなわち、明るさの変化にあきらかに無反応であった“A: 行動に変化無し”と“B: 消灯開始後、もしくは完全消灯後の行動が変化”の行動様式である。また、それぞれの行動様式においても、検出位置の流速に注目してさらに詳細に行動様式の分類を行った。分類に用いた詳細な行動様式を表-1に示す。ここで、表中の速い区間とは、前述のとおりNo.0からNo.2アンテナまでの区間、遅い区間とはNo.2からNo.7アンテナまでの区間を指している。なお、分類b1にある“速い区間から更に速い区間へ移動し定位”とは、No.0からNo.2アンテナの区間の速い流速場中で、No.1地点からNo.0地点のように明らかに更に速い地点へ移動し定位した行動様式を意味している。

この表に整理した行動様式に基づき、計4回実施した実験で得られた個々のアユの行動の記録を解析し、全てのアユの行動について分類を行った。実験で記録された行動様式のうち、典型的な例を図-7(a)～(e)に示す。図は、それぞれ、a0, a1, b0, b3, b5に分類されたアユの行動記録であり、対象のアユが実験中に検知された場所（アンテナ番号）である。

記録開始後30分までは全灯状態で周囲が明るい状態（照度161lux）、30分から1時間15分までは、段階的に消灯し徐々に暗くなっている状態（照度136lux→45lux→14lux）、1時間15分後以降は完全に消灯した暗中でアユの行動で記録ある。これらの図より、同一条件での実験中であっても、個々のアユによって周囲の明るさへの反応や定位する位置が大きく異なることが確認できる。なお、照明が全灯状態の記録は最初の30分間しかないが、実際には実験開始4時間程度前から全灯状態を保持している。

表-2に実験中の全てのアユの詳細な行動様式の分類結果を示す。ここで、表における性別mはオス、fはメスを表している。また、この結果を基に、周囲の明るさ変化に反応した個体、無反応だった個体のそれぞれの割合を

表-1 行動の分類

明るさの変化への反応	分類	行動の詳細
A: 行動に変化無し	a0	終始速い区間に定位
	a1	終始遅い区間に定位
	a2	速い区間・遅い区間の移動を繰り返す
B: 消灯開始後、もしくは完全消灯後の行動が変化	b0	速い区間から遅い区間に移動し定位
	b1	速い区間から更に速い区間へ移動し定位
	b2	遅い区間から速い区間に移動し定位
	b3	速い区間に定位から速い区間・遅い区間の移動を繰り返す
	b4	遅い区間に定位から速い区間・遅い区間の移動を繰り返す
	b5	速い区間・遅い区間の移動を繰り返すから速い区間に定位

図-8(a)に、また、明るさの変化に無反応であった個体群の詳細な行動パターンを各割合を図-8(b)に、さらに、明るさの変化に反応した個体群の詳細な行動パターンの

各割合を図-8(c)に示す。なお、実験4回目のタグNo.6とNo.8のアユについては、途中ICタグが脱落し、データに不備があったため、分類を行っていない。

(a) 終始速い区間に定位(分類a0)

(b) 終始遅い区間に定位(分類a1)

(c) 速い区間から遅い区間に移動して定位(分類b0)

(d) 速い区間に定位 から 速い区間・遅い区間の移動を繰り返す(分類b3)

(e) 速い区間・遅い区間の移動を繰り返す から 速い区間に定位(分類b5)

図-7 典型的な行動様式

表-2 個々のアユの行動様式分類結果

タグNo.	体長(mm)	性別	1回目	2回目	3回目	4回目
1	135	m	b3	b4	b1	b3
2	137	f	b3	b4	b4	a1
3	130	m	b5	b3	a0	b3
4	143	m	a0	a0	b1	b0
5	134	f	a0	a0	b5	b0
6	132	f	a0	a0	a0	-
7	142	m	a0	b1	b1	b2
8	138	m	a0	b1	a0	-
9	140	m	b0	b0	b0	b0
10	133	f	b1	b1	b1	b2
11	135	m	b1	a0	a0	b0
12	141	f	b0	b0	b0	b0
13	137	f	b0	b0	b0	b4

28	72
----	----

□ A (行動に変化無し)

■ B (消灯後、もしくは完全消灯後の行動が変化)

(a) 行動様式AとBの割合 (%)

92.9	7.1
------	-----

□ a0 (終始速い区間に定位)

□ a1 (終始遅い区間に定位)

(b) 行動様式Aの詳細割合 (%)

38.9	25	5.6	30.6
------	----	-----	------

□ b0 (速い区間から遅い区間に移動し定位)

□ b1 (速い区間から更に速い区間へ移動し定位)

■ b2 (遅い区間から速い区間に移動し定位)

■ その他 (b3+b4+b5, 速い区間・遅い区間の移動を繰り返す)

(c) 行動様式Bの詳細割合 (%)

図-8 各行動様式の割合

まず、表-2より、周囲の明るさ変化に対し行動に変化があった個体・無かった個体は、アユの大きさや性別に関係なくそれぞれ一定数存在しており、大きさ・性別の違いが実験中の行動様式に影響を及ぼしている可能性は低いことが確認できる。

次に、個々のアユの詳細な行動様式について着目すると、1回目の実験から4回目の実験を通じ、どの個体も最低2回は同じ行動様式をとっており、その中には全ての実験で全く同じ行動様式をとる個体が存在することも確認できる。このことから、その行動内容は異なるものの、各個体は周囲の明るさ変化に対し、同じような反応を示す傾向にあることが示唆される。

図-8(a)に示すとおり、周囲の明るさ変化に対して無反応で行動に変化がなかった個体の割合は3割弱、逆に何らかの反応を示した個体は7割強に上った。この結果は、一般的に知られているように、アユは日中と日没後で活動内容が異なることを示唆する結果となっている。そして、図-8(b)に示すとおり、周囲の明るさ変化に対し無反応であった個体群のうち、実験中終始速い区間に定位していた個体の割合は9割強であり、残り1割弱が終始遅い区間に定位していた。その一方、無反応であった

個体群には、速い区間から遅い区間まで頻繁に移動を繰り返す個体(分類a2)は存在しなかった。このことから、流速が大きく異なる場へ移動する行動は、周囲の明るさの変化に反応した結果の行動である可能性が示唆される。

周囲の明るさの変化に反応した個体群については、そのうち明るさの変化後に速い区間から遅い区間へ移動した個体の割合は約4割であった。また、遅い区間から速い区間に移動した個体の割合は、速い区間から更に速い区間へ移動した個体(b1)の数も含めると約3割、その他、速い区間・遅い区間の移動を伴う行動をとった個体が約3割となった(図-8(c))。アユの特性として、日没後は流れの緩やかな場所に移動し休息を行うことが知られていることから、実験では行動様式b0をとる個体が多くなると予想していた。そして、その予想どおりb0の行動様式をとる個体が一番多い結果となったが、流れの速い場所に移動した個体も少なからず存在する結果となっている。本実験水槽は、最も流速の速いアンテナNo.0付近より上流側へは流れを遡って移動できない構造となっており、遅い区間から速い区間へ移動した個体が、流れの速い場所を選好したのではなく、流れの緩やかな場所を探して上流へと移動する過程で行く手を遮られ、流れの速い場所に留まっていた可能性もある。この点については、今後更なる確認が必要である。

5. おわりに

本研究では、RFIDを利用した魚類の位置検知・追跡システムの構築を行い、これを室内実験に適用した。実験では、日没のように周囲の明るさが変化する中で個々のアユの行動を追跡し、得られた時系列データを基に、明るさの変化に伴うアユの定位場所の変化等に関して分析と考察を行った。今後は、構築したシステムを用いて、流量(流速)の変動に対するアユの行動特性や、アユやヤマメ等、河川保全上重要となる魚類の水理物理量に関する選好特性をあきらかにするため、本システムを用いた室内実験や現場試験を行う予定である。

参考文献

- 1) Stalnaker, c. et al. : The Instream Flow Incremental Methodology - A Primer for IFIM, Biological Report 29, U.S. Department of the Interior, National Biological Service, 1995.
- 2) 額田 渉 ほか：野生動物自動行動追跡システムを用いた降下期のアユ行動特性の把握，応用生態工学会第14回研究発表会講演集，pp.203-206，2010.
- 3) 宮地伝三郎：アユの話，岩波書店，1994.
- 4) 小山長雄：アユの生態，中公新書，1978.
- 5) 本田晴朗・山本亮介：成長期および産卵期における人工種苗アユの選好流速，水産増殖，54(4), pp.421-427，2006.

(2011. 9. 30受付)