

潜水艦模型と超小型ワイヤレスカメラを用いた 魚類の生息調査

FIELD SURVEY OF FISH HABITAT QUALITY USING MINIATURE SUBMARINE AND SMALL WIRELESS CAMERA

鬼東幸樹¹・秋山壽一郎²・小野篤志³・芹川泰介⁴

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Atsushi ONO and Taisuke SERIKAWA

¹正会員 博(工) 九州工業大学大学院准教授 建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 建設社会工学研究系

³学生員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻

⁴学生員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

There are some techniques which can search fish species or school location, such as scanning sonar, line camera, telemetry, electric shocker, cast net, minnow trap, underwater camera and so on. The scanning sonar and line camera can measure the location and its size of fish school, but it is difficult to distinguish the fish species. The method of telemetry, electric shocker, cast net, minnow trap and underwater camera can distinguish the fish species, but measuring in the wide area is not easy. Further, it is doubted that fish may escape from measuring devices when those are controlled by a human being near the measuring point. In this study, a new survey technique of fish habitat quality using model submarine and small wireless camera is suggested on the basis of indoor and field experiment.

Key Words : fish habitat quality, model submarine, small wireless camera, field survey

1. はじめに

漁師や釣人は水域に生息する各魚種の個体数や生息場所を把握することを望んでいる。魚種の個体数あるいは生息場所を把握する方法として、標識放流¹⁾、スキャニングソナー^{2,3)}、ラインカメラ⁴⁾、テレメトリー⁵⁻⁷⁾、光電管⁸⁾、電気伝導度⁹⁾、電気ショック¹⁰⁾、投網¹¹⁾、タモ¹¹⁾、セルビン¹²⁾、直接撮影¹³⁻¹⁹⁾などが挙げられる。

標識放流とは予め魚に目印を付けておき、水域に放流した後に再捕獲したときに、目印に基づいて魚を識別する方法である。アユの場合、鰭の一部をカットして目印とすることが多い¹⁾。この方法で任意の一尾の魚の挙動を追跡することは困難である。なぜなら、ある程度規模の大きな河川あるいは海洋で同じ魚を再捕獲することはほぼ不可能だからである。そのため、標識放流を用いる場合、複数の同魚種に同様な目印を付けることが一般的である。そのため、魚群の挙動の把握に適している。

スキャニングソナー^{2,3)}とは超音波を発信させ、魚群からの反射音の到達時間およびその強度に基づいて魚群の

位置および大きさを判定するものである。比較的大きな魚の場合は個体数の算出が可能であるが、小さな魚の群れの場合は困難である。また、魚種の判別も困難である²⁰⁾。

テレメトリー法とは電波発信機を魚に取り付け、そこから定期的に発信される電波を単一あるいは複数の受信機が受信し、魚の位置を算出する方法である。海洋における魚類追跡には古くから用いられてきたが⁵⁻⁷⁾、近年、湖沼あるいは河川でも用いられるようになった。東ら²¹⁾はウグイおよびサクラマスに電波発信機を取り付け、実河川での挙動調査に成功した。佐々木ら²²⁾はフナ、カワムツおよびカマツカを用いて同様な計測を行った。傳田ら²³⁻²⁴⁾は高精度で自動的に魚の位置を算出するATSを開発し、ゲンゴウロウブナの湖沼内における挙動を調査した。以上のように、テレメトリー法は水域における魚の挙動の把握に有効であるが、発信器を含む容器の空中重量が魚の体重の3%以下の必要²²⁾があり、小型魚への適用には発信器の小型化が必要である。

近年、DNA標識²⁵⁾や安定同位対比²⁶⁾を用いた魚類の追跡方法も開発されつつあるが、河川での魚類調査は主と



写真-1 超小型ワイヤレスカメラ

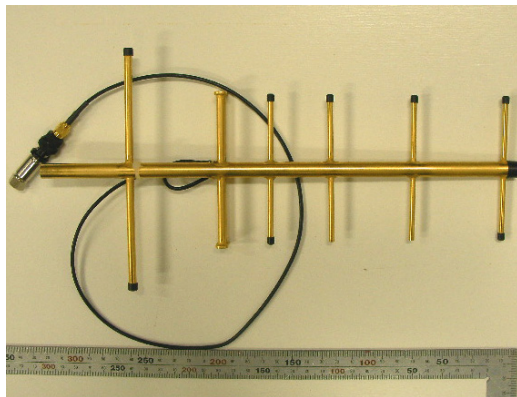


写真-2 指向性アンテナ

して電気ショッカー¹⁰⁾、投網¹¹⁾、タモ¹⁰⁾、セルビン¹²⁾を用いているのが現状である。これらの手法は経験が必要で、広範囲に計測を行うには多大な労力を要する。

一方で、カメラを用いた魚の挙動の直接撮影は安価である。この場合、カメラを水域外あるいは水域内に設置する2つの方法がある。透過性のある水路では前者の測定が可能であるが^{14,15,18)}、実河川で計測する場合は困難である。なぜなら、河川上方にカメラを設置することは可能であるが、上方から魚を撮影した場合、魚種の判別が困難だからである。したがって、水中にカメラを設置せざるを得ない。近年、超小型カメラが安価に販売されており、魚類の生息調査への適用が期待される。

本研究は、超小型ワイヤレスカメラと潜水艦模型を用いた魚類の生息調査の可能性を検討したものである。

2. 魚種の識別可能画素数の検討

(1) 実験器具

写真-1に超小型ワイヤレスカメラを示す。質量は17.7gで突起箇所を除くと幅2.6cm、高さ2.0cm、奥行き2.1cmであり、F値2.8、1/3インチCMOSによって水平解像度380本の25万画素のカラー画像を30Hzで取得できる。9V電池で駆動し、画像を1.2GHzの電波で送信する。空中での電波送信能力は30mであるが、水中では電波は急

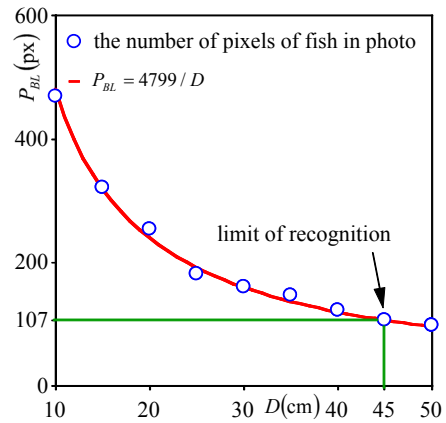


図-1 距離 D とピクセル数 P_{BL} との関係

速に減衰するため、写真-2に示す指向性アンテナを採用した。アンテナの方向を送信部に向けることでノイズの少ない電波が受信可能となる。

ワイヤレスカメラおよび9V電池を外形46mm、長さ93mmの透明な円筒形容器に入れた。ワイヤレスカメラから送信された電波は写真-2の指向性アンテナで受信され、RCA端子を有するノートPCにWMV形式で保存される。以後、円筒形容器に入れられたワイヤレスカメラ全体を水中カメラと呼称する。

(2) 実験条件

カメラで魚を撮影する場合、ある画素数以下の大きさになると魚種の判別が困難となる。そのため、魚種が判別できる最低の画素数を知る必要がある。そこで、直径2.1mの円形プールにおいて、カルキを抜いた水道水を水深0.3mで貯留し、水中カメラを半水深程度で静止させた。体長6.8cmのオイカワを1尾挿入し、水中カメラと魚の距離が様々な値となるようにタモで追いかけた。このとき、水中カメラの画像を約10分間ノートPCに保存すると共に、プール上方から30Hzで10分間ビデオ撮影した。

計測後、水中カメラから得られた魚の画像において魚種の判定が可能かどうかを確認すると共に、その時の水中カメラと魚との距離を上方カメラの画像から算出した。

(3) 実験結果および考察

図-1に水中カメラと魚との距離 D と、魚の体長に相当するピクセル数 P_{BL} を示す。距離 D の増加に伴い反比例的にピクセル数 P_{BL} は減少する。撮影された魚の画像を検討した結果、 P_{BL} が107ピクセル以下では魚種の判別が出来ないことが判明した。このときの距離 D は45cmであった。したがって、水中カメラから半径45cm以内を遊泳する魚の魚種は判定可能と判断される。ただし、この基準はカメラの種類、魚の体長、濁度などに依存するため普遍的な値ではない。特に、魚種の識別が可能な濁度の上限值に関しては今後の研究課題である。

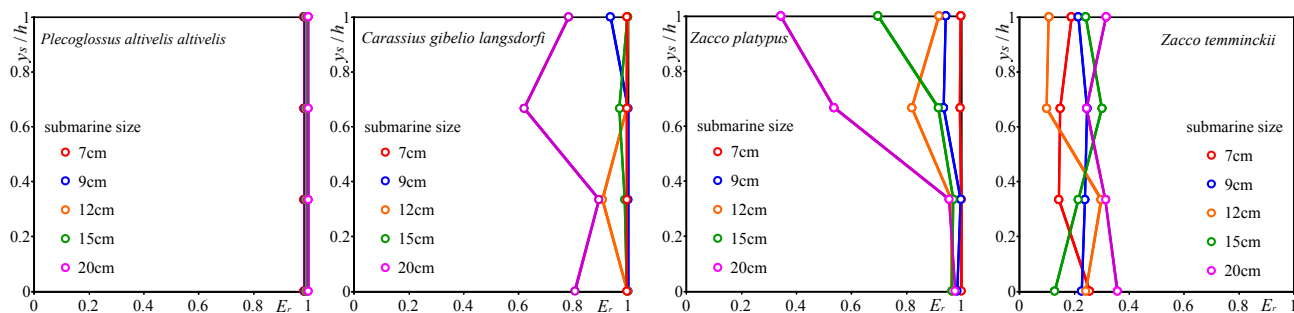
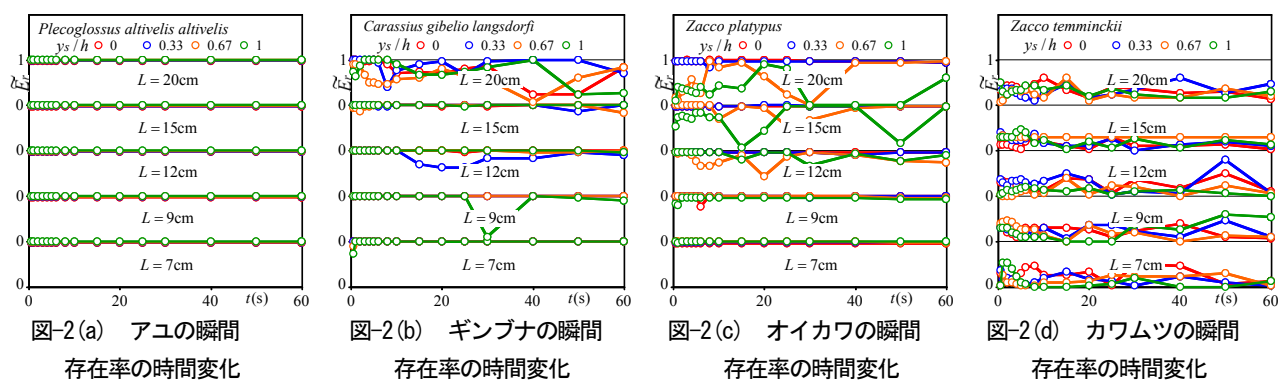


図-3(a) アユの平均存在率 図-3(b) ギンブナの平均存在率 図-3(c) オイカワの平均存在率 図-3(d) カワムツの平均存在率

3. 模擬潜水艦の大きさおよび鉛直位置が魚に及ぼす影響の検討

(1) 実験器具および実験条件

水中に物体が存在するとき、魚は視界に入る物体の大きさ、物体の鉛直方向の位置および周囲流速に応じて反応が変化すると仮定した。そこで、大きさの異なる5つの相似形な模擬潜水艦を用意した。基準とした形状は後に写真-3に示す潜水艦である。全長 L はそれぞれ7, 9, 12, 15, 20cmである。これらの模擬潜水艦はカワムツやフナなどの河川魚に類似した色であるダークグレー色に固定した。直径2.1mの円形プールにおいて水深 h を0.3mに設定し、漁具のテグスで模擬潜水艦を釣り上げ、潜水艦の位置 y_s を $y_s/h=0, 0.33, 0.67, 1$ でそれぞれ固定した。なお、 $y_s/h=0, 1$ はそれぞれ底面に設置した状態、模擬潜水艦の天端が水面に接する状態である。その後、20尾の同魚種を挿入し、魚が落ち着いた後にプール上方から30Hzで60s間ビデオ撮影した。用いた魚はアユ(*Plecoglossus altivelis altivelis*)、ギンブナ(*Carassius auratus*)、オイカワ(*Zacco platypus*)およびカワムツ(*Zacco temminckii*)の成魚である。

撮影後、全魚の模擬潜水艦からの距離を1sごとに算出した。

(2) 実験結果および考察

1~10sごとに動画をキャプチャーし、模擬潜水艦から半径45cm以内に遊泳している魚数をカウントした。こ



写真-3 実験に用いた潜水艦模型

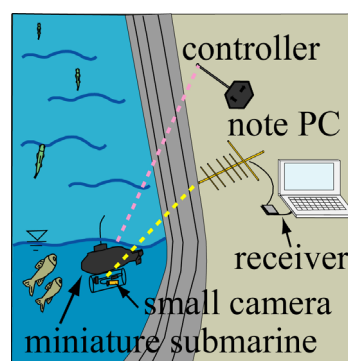


図-4 実験のシステムの概要図

の魚数をプール内の全魚数で除したものを瞬間存在率 $\tilde{E}_r$ と定義する。これは、前章で水中カメラから半径45cm以内を遊泳する魚の魚種が判別できることに基づく。図-2にアユ、ギンブナ、オイカワおよびカワムツの瞬間存在率 $\tilde{E}_r$ の時間変化を模擬潜水艦長 L および潜水

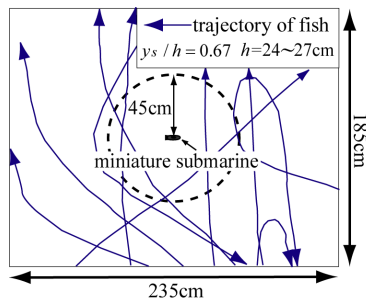


図-5(a) $h=24\sim27\text{cm}$ の場合の魚の軌跡 ($y_s/h=0.67$)

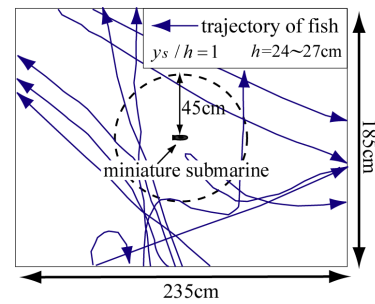


図-5(b) $h=24\sim27\text{cm}$ の場合の魚の軌跡 ($y_s/h=1$)

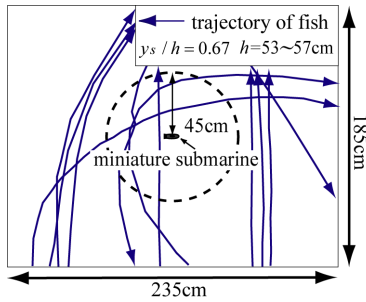


図-6(a) $h=53\sim57\text{cm}$ の場合の魚の軌跡 ($y_s/h=0.67$)

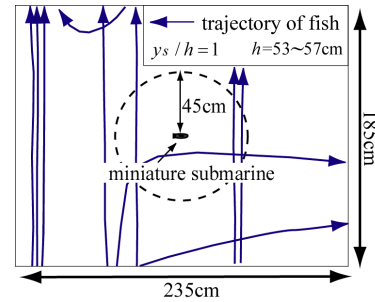


図-6(b) $h=53\sim57\text{cm}$ の場合の魚の軌跡 ($y_s/h=1$)

位置 y_s/h ごとに示した。この図の縦軸は模擬潜水艦長別に5段に分かれており、それぞれの最小値を0とし、最大値を1としている。アユはいずれのケースにおいても高い瞬間存在率 $\tilde{E}_r$ を示している。これはアユが群れを作る性質があるのに加え、模擬潜水艦から忌避していないことによる。フナは模擬潜水艦長 L が小さいときは忌避せず、 L が大きくなると忌避する傾向にある。また、 $L=9$ や 12cm において時折、瞬間存在率 $\tilde{E}_r$ が大幅に低下するのは群れで行動するためである。オイカワについても L に対する反応は同様で、 $L=7$ および 9cm では高い瞬間存在率 $\tilde{E}_r$ を示すが、それ以上の L では $\tilde{E}_r$ が低下傾向にある。カワムツについてはいずれの模擬潜水艦長 L および潜水位置 y_s/h についても瞬間存在率 $\tilde{E}_r$ は低い値を示している。これは、カワムツが群れを作らずにそれぞれ単独に行動するからである。目視の印象からは模擬潜水艦を忌避している様子はなかった。

瞬間存在率 $\tilde{E}_r$ について、ギンブナでは瞬間的な低下が見られたが、魚の忌避反応を定量的に検討するために時間平均の存在率 E_r を算出した。図-3に平均存在率 E_r と模擬潜水艦の位置 y_s/h との関係性を潜水艦長 L ごとに全魚種について示した。アユは y_s/h および L の大小に関わらず忌避反応を示さないことが確認される。ギンブナは L が 15cm 未満では模擬潜水艦の位置 y_s/h に関わらず忌避反応を示さないといえる。オイカワは模擬潜水艦が底面にあれば L が $7\sim20\text{cm}$ の全てで忌避反応を示さないが、半水深以上では L が 15cm 以上では忌避し、 12cm 以下では忌避しないと判断される。カワムツについてはいずれの条件においても低い忌避率しか示さないが、群れ

を作らずに各魚がプール内を均等に遊泳していたことから今回の条件内では忌避反応を示さないと判断した。

以上のことから、静止流体中の模擬潜水艦の位置が水面付近であれば模擬潜水艦長が 12cm 以下、底面付近であれば 15cm 以下の時に、アユ、ギンブナ、オイカワおよびカワムツの全てが模擬潜水艦から忌避しないこと、換言すれば模擬潜水艦長が 12cm 以下であれば模擬潜水艦がいかなる位置に潜水しても上記の魚種は忌避しないことが解明された。これらの魚類は物体が大きくなるに伴い警戒する傾向が強くなるが、全長 12cm の物体に対しては自らの体長に大差がないため、警戒を示さないと考えられる。なお、今回は物体の色に関する検証は行っていない。

4. 水深および潜水艦の旋回が魚に及ぼす影響に関する野外での検証

(1) 実験器具および実験条件

写真-3に示す長さ 12.2cm 、高さ 4.5cm 、幅 3.0cm で質量が 65.3g のダークグレー色の潜水艦模型を採用した。前節で得られた魚の忌避しない条件の 12cm を若干超えているが、大きな影響はないと考えた。リモコンにより左右の旋回および潜水・浮上が可能であり、最大潜水深は 0.6m 、最高速度は 0.5m/s である。潜水艦の底部に2.に示した水中カメラを装着した。このとき、両者を一体と見なしたときの比重が約 1.0 になるように、円筒容器内に漁具の鉛を入れた。図-4に実験システムを示す。潜水艦の最大潜水深が 0.6m であるため、計測可能な深度は 0.6m である。

北九州市を貫流する2級河川の板櫃川の河口から1.1km地点の右岸から左岸において水深 h の浅い箇所(24~27cm)および水深 h の深い箇所(53~57cm)の2カ所を対象とし、潜水艦を $y_s/h=0.67, 1.0$ の位置に潜水させ、潜水艦に水中カメラを装着した状態で、150s間流れに移流させた。両地点での流速はそれぞれ約0.10m/s, 0.07m/sであった。測定中、横断方向の流速差によって潜水艦が水平方向に回転しないようにリモコン操作した。これは、本計測を行う際に、水中カメラを常に右岸から左岸向きに固定することを想定した条件である。このとき板櫃川の河口から1.1km地点における愛宕橋の上にビデオカメラを設置し、潜水艦が画像の中央にくるようにビデオカメラの向きを徐々に変えながら30Hzで150s間撮影した。

撮影後、全魚の潜水艦からの距離を1sごとに算出した。従って、ここで得られる距離は対地距離ではなく潜水艦との相対距離である。

(2) 実験結果および考察

図-5に水深 h が24~27cmの場合に潜水艦位置 y_s/h を0.67および1.0に変化させたときの、潜水艦付近における魚の軌跡を示す。魚種の多くはオイカワまたはカワムツと考えられるが、明確には判別できなかった。潜水艦から45cm以内の領域に魚が近づいても忌避する様子は観察されない。

図-6に水深 h が53~57cmの場合の図-5と同様な図を示す。やはり、潜水艦から45cm以内の領域に魚が近づいても忌避する様子は観察されない。

以上のことから図-4に示した計測システムを河川で用いる場合、流速があっても、また、水深が変化しても魚を自然な状態で撮影できると判断される。ただし、今回の計測では系統的に流速および水深が変化した場所を選んでいないので、さらなる検証が必要である。

5. 野外での本計測

(1) 実験器具および実験条件

図-4に示したシステムを用いて板櫃川1.1km地点の右岸から約0.5m左岸よりの深さ0.1mに潜水艦を潜水させ、潜水艦に水中カメラのみを装着した状態で約15分間流れに移流させた。このとき、潜水艦が常に左岸方向を向くようリモコン操作した。移流距離は約70mであり、流速は約0.06~0.08m/sであった。また、右岸の岸沿いに巻き尺を添え、巻き尺と潜水艦との両者が写るようにビデオカメラを移動させながら撮影した。

計測後、水中ビデオに撮影された魚の魚種を判別した。また、陸上で撮影された画像から各時刻の潜水艦の流下方向位置が判別するため、それぞれ撮影された画像にお

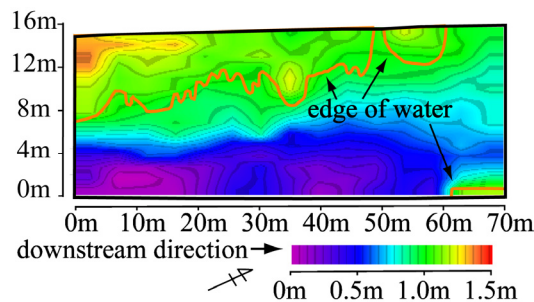


図-7 河床高のコンター図

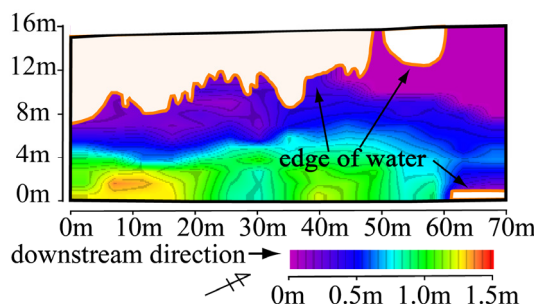


図-8 水深のコンター図

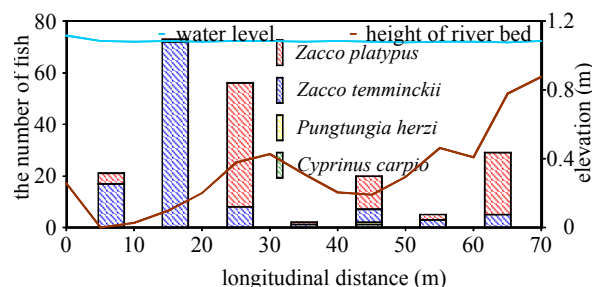


図-9 流下方向の魚種数のヒストグラム

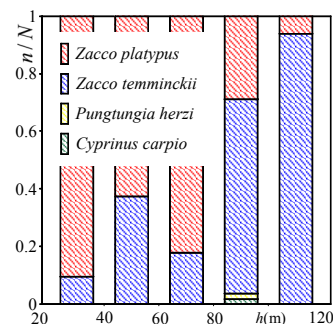


図-10 水深別の各魚種の割合のヒストグラム

ける各魚の流下方向位置が求められる。

また、レベルおよびスタッフを用いて潜水艦移動区間における流下方向の15点、横断方向の15点の合計225点の格子点において河床高および水位を計測した。計測後、各点の水位から河床高を引くことで水深を算出した。

(2) 実験結果および考察

図-7および図-8に河床高および水深を示す。右岸側の河床が洗掘されており、水深が高い状態となっている。

図-9に潜水艦が流下した流下断面の河床高および水位を示すと共に、各流下地点で確認された魚種数のヒスト

グラムを示す。確認された魚種はオイカワ、カワムツ、ムギツク(*Pungtungia herzi*)およびコイ(*Cyprinus carpio*)であった。比較的水深の深い上流域でカワムツが、水深の浅い下流域でオイカワが確認されている。そこで、水深を20cmごとに分類し、水深別に確認された各魚種の魚数 n をその水深における確認総魚数 N で除したヒストグラムを図-10に示す。水深の増加に伴いカワムツの割合が増加し、オイカワの割合が減少することが確認される。一般に、オイカワは瀬を好み、カワムツは淵を好むと指摘されているので、既往の研究傾向と一致する。

6. おわりに

本研究は、超小型ワイヤレスカメラと潜水艦模型を用いた魚類の生息調査の可能性を検討したものである。以下に結論を示す。

- (1) 今回用いたF値2.8, 1/3インチCMOS, 水平解像度380本の25万画素のワイヤレスカメラで水中撮影した場合、カメラから半径45cm以内であれば体長が6.8cm以上の魚の魚種が判別できる。ただし、この基準はカメラの種類、魚の体長、濁度等に依存するため普遍値ではない。
- (2) アユ、ギンブナ、オイカワおよびカワムツの成魚は潜水艦の長さが12cm以下であれば、潜水艦の位置に関わらず忌避しない。
- (3) 超小型ワイヤレスカメラおよび潜水艦模型を用いた魚類生息状況撮影システム(図-4)に提案し、その有効性を室内実験および野外計測で確認した。
- (4) 本計測システムでは魚の体長が計測できない、潜水艦から僅か45cm離れると魚種が判定できないなどの欠点があるため、今後改良を重ねたい。

参考文献

- 1) 渡辺仁, 後藤勇, 長崎均, 松田寛志: 多摩川に設置したハーフコーン型魚道における溯上効果, こうえいフォーラム, 第9号, pp.79-85, 2001.
- 2) Braithwaite, H.: *Journal of Fishery Biology*, Vol.3, pp.73-82, 1971.
- 3) 李遺元, 向井徹, 飯田浩二: スキャニングソナーを用いた船舶の接近に対する魚群行動の評価法, 日本水産学会誌, 第66巻, 5号, pp.825-832, 2000.
- 4) Terazono, K, Akao, T. and Matsuo, I.: *Proceedings of the International Symposium on Fishways '95 in Gifu*, pp.329-334, 1995.
- 5) Konagaya, T.: *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, Vol.48, No.11, pp.1545-1550, 1982.
- 6) 韓軍, 宮本佳則, 濱田悦之, 中村善彦: 魚の行動解析のための同期法超音波ピンガー追跡システム, 日本水産学会誌, 第63巻, 3号, pp.369-374, 1995.
- 7) Klimley, A.P., Beavers, S.C., Curtis, T.H. and Jorgensen, S.J.: *Environmental Biology of Fishes*, Vol.63, pp.117-135, 2002.
- 8) 武捨春雄: 魚類を用いた水質自動監視装置の検討, 日本河川水質年鑑, p.907-918, 1983.
- 9) Robert, B., Northrop et al.: *Northwest Bioeng., Conf.*, Vol.10, pp.245-248, 1982.
- 10) 小出水規行, 竹村武士, 奥島修二, 山本勝利, 蛭原周: 魚類の生息分布に影響を及ぼす農業排水路の環境要因, 河川技術に関する論文集, 第10巻, pp.339-344, 2004.
- 11) 庄司崇, 福井吉孝, 青木宗之: 河川中流部における魚類の生息分布とその評価法について~荒川水系小畔川を例にして~, 河川技術に関する論文集, 第10巻, pp.345-350, 2004.
- 12) 竹村武士, 小出水規行, 奥島修二, 山本勝利: 農業水路におけるドジョウの行動範囲に関する基礎研究, 河川技術に関する論文集, 第10巻, pp.351-356, 2004.
- 13) 兼廣春之, 鈴木誠, 松田皎: タイリクバラタナゴの群サイズによる行動特性, 日本水産学会誌, 第51巻, 2号, pp.1977-1982, 1985.
- 14) 高嶋信博, 中村俊六: 魚道内のアユの挙動に関する実験的研究, 第28回水理講演会論文集, pp.353-358, 1984.
- 15) 林田寿文, 本田隆秀, 萱場祐一, 島谷幸宏: 階段式魚道のプール内流況とウグイの遊泳行動, 水工学論文集, 第44巻, pp.1191-1196, 2000.
- 16) 二瓶泰雄, 福永健一, 小澤清治: 実際の魚体運動を反映した魚周辺の流動シミュレーション, 土木学会論文集, No.768/II-68, pp.55-66, 2004.
- 17) 高水克哉, 栗原朋之, 青木宗之, 内山文哉, 福井吉孝: 杭水制内外の流れと魚の挙動, 第52巻, pp.1273-1278, 2008.
- 18) 浪平篤, 後藤真宏, 小林宏康: 勾配1/5の階段式魚道における流況とウグイの遊泳行動, 水工学論文集, 第52巻, pp.1189-1194, 2008.
- 19) 安田陽一, 大津岩夫, 小出水親行: 既設の固定堰に設置する透過型簡易魚道の提案, 河川技術論文集, 第8巻, pp.349-354, 2002.
- 20) 飯田浩二: 魚群探知機を用いた水産資源量計測に関する基礎的研究, 日本水産学会誌, 第66巻, 4号, pp.619-622, 2000.
- 21) 東信行, 鴨下真吾, 佐原雄二, 関泰夫, 渡辺勝栄: 増水時における河川魚類の挙動と河川構造, 環境システム研究論文集, Vol.27, pp.793-798, 1999.
- 22) 佐々木丞, 関根雅彦, 後藤益慈, 浮田正夫, 今井剛: 多自然型川づくりに資するための魚の行動圏調査, 環境工学研究論文集, 第38巻, pp.13-19, 2001.
- 23) 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.
- 24) 傳田正利, 天野邦彦, 萱場祐一: 出水の水理特性が魚類行動に与える影響, 水工学論文集, 第49巻, pp.1465-1470, 2005.
- 25) 小出水親行, 竹村武士, 奥島修二, 森淳, 蛭原周: DNA標識を利用した農業水路系における魚類個体群の交流実態の検討, 河川技術に関する論文集, 第12巻, pp.365-370, 2006.
- 26) 対馬孝治, 傳田正利, 時岡利和, 天野邦彦: 安定同位体比を用いた河道周囲の止水域が魚類に提供する生態的機能の評価, 水工学論文集, 第50巻, pp.1243-1248, 2006.

(2008. 9. 30受付)