

# 研究成果報告

# 浅水深域における魚類資源量調査システムの開発

吉川夏樹 客員研究員／新潟大学農学部 石村謙太・佐藤太郎／新潟大学農学部・大学院自然科学研究科

## 1. 緒論

### 1.1. はじめに

水田地帯の水辺環境は淡水魚類等の生息環境として重要な役割を果たしてきた(片野, 1998; 斉藤, 1988)。とりわけ、網の目状に張り巡らされた農業水路は、それ自体が魚類の生息場として機能するほか、魚類が他の水域間(水田、河川、ため池等)を移動する際のネットワークとしての役割を担ってきた(満尾ら, 2008; 守山ら, 2008; 斉藤, 1988)。

水路を介して広がる広大な生態系ネットワークの存在は、農村地域の生物多様性の保全に貢献しており、水田や農業水路に生息する魚類の個体数や種数は、水系ネットワークの本流である河川の生息状況を凌駕することがある(Hosoya, 1982)。

しかし、戦後、農業生産性の向上等を目的とした水路改修や暗渠排水等の基盤整備が急速に進んだことにより、水田・水路における魚類の生息環境が悪化したことが指摘されている(端, 1985)。用排水能力や維持管理性の向上を目的とした用排水路のコンクリート化は、流れや河床の均質化、植物群落の消失をもたらした(森ら, 2012)。また、地耐力の向上や水田の汎用化を目的とした暗渠排水の整備は、乾田化による湿性環境が喪失、水路-水田間の高低差の拡大による水域間の連続性の消失を引き起こした(端, 1987; Hata, 2002; 長利・奥島, 2003)。これらの水路環境に対する改変は、水路に生息する魚類の生息量や種多様性に大きな悪影響を及ぼした(Katano et al, 2003)。

環境省が公表した第4次レッドリストでは我が国に生息する汽水・淡水魚類のうち約42%が絶滅の危険に瀕する種として選定された(環境省, 2013)。また、その多くが成長段階において水田や水路、ため池等の二次的自然を主な生息環境とする淡水魚であることから、二次的自然環境を保全する対策の必要性が高まっている(淡水魚のための研究会, 2016)。

農村地域における自然環境の危機的な状況を踏まえ、2001年に土地改良法改正により、「環境との調和への配慮」が新たな事業要件として追加された。これを契機に、水路等に生息する魚類への保全対策が講じられるようになり、これまで、全国各地の農業水路において魚類の生息環境の保全を目的とした環境配慮工法の開発・整備が数多く進められてきた(例えば、魚巢樹(田谷, 2006)、瀬淵工法(向井ら, 2006)、空石積み護岸(神宮字ら, 1999)、玉石詰め河床水路(広瀬・小幡, 2003)等)。また、こうした施設の生態系配慮施設の効

果検証も進められており、二面張り水路区間と三面張り水路区間との比較により魚類相の保全に二面張り水路区間が一定の効果があることを明らかにした事例(佐藤・東, 2004)、魚巢ブロック水路や自然護岸水路が三面張り水路と比較して魚類等の生息状況が良好であることを明らかにした事例(堀野ら, (2008))等のほか、施設単独の生態系配慮効果を検証した事例は多い(平松ら, 2010; 堀野ら, 2008; 森ら, 2011; 渡部ら, 2015)。

一方、空間的な広がりをもつ水田水域におけるこれらの施設の適正な配置箇所や配置間隔等の検討が不十分であることが多いことが指摘されている(佐藤, 2014)。水田水域には、水路を介して様々な水域を利用し、その生活史を全うする魚類が多く、生態配慮を効果的に進めるには、個々の生態系配慮施設の有効性に加えて、水域内の生態系ネットワーク(以下、ネットワーク)確保の視点から生態系配慮対策を検討する必要がある(農林水産省農村振興局整備部整備課, 2011)。

ネットワーク形成に関わる研究は、ため池(満尾ら, 2008)、水路内魚道(守山ら, 2006)、水田魚道(佐藤ら, 2008)など、ネットワークの形成に対する局所的対策の効果を検討した事例が多く、農業水路系全域にわたるネットワークの形成状況の検討は、水域ネットワークにおける魚類の移動や分散状況を明らかにした研究(守山ら, 2008; 西田ら, 2006)に限られており、生態系配慮対策の実施によって形成されたネットワークの存在が水域全体にわたる魚類相の生息状況に及ぼす効果を検証した事例は極めて少ない。

この分野の研究が進まなかった背景として、ネットワークの形成状況等の解明に必要な水域全体における魚類資源量分布等を詳細に把握するための調査手法が整備されていないことが一因として挙げられる。現在、環境DNAを利用し広域的な魚類の生息状況を把握する手法の開発も進められてはいるものの(Koizumi et al, 2015; 福岡ら, 2016)、一般的に、長大な水路網内に調査地点を点的に配置し、手網や投網、電気ショッカー等の調査漁具を利用し魚類を捕獲する手法が主流である(満尾ら, 2008; 守山ら, 2008; 佐藤・東, 2004)。これらの手法によって、水路ネットワーク内の魚類資源量の分布を広域的かつ網羅的に把握するには、高い技術力や膨大な調査労力、大きな費用を要するなど課題が多い(渡部ら, 2015)。また、採捕時に生息環境の攪乱を伴うため、反復的に調査することが難しい。

こうした諸課題を解決した上で、水田水域の全域にわたる生物多様性ホットスポットなどの重要な生息環境の

分布状況やネットワークの形成状況の把握に必要な縦断的かつ連続的な魚類資源量調査を可能とする新たな調査手法が求められている。

## 1. 2. 研究目的

本研究は、水田地帯における効果的な生態系配慮施設の整備を実施するため、環境への負担を最小限としながら、水域全体の魚類資源量分布を網羅的かつ連続的に探索・評価をする新たな生物量調査手法として、超音波技術を応用した自律航行型の魚類資源量調査装置を開発することを目的とする。

## 1. 3. 研究の全体構成

第2章では、本研究で開発する魚類資源量調査装置および、その主要構成要素である自律航行装置と超音波装置の概要を述べる。第3章では、自律航行装置の航行性能を明らかにするために行った検証実験の概要と結果を示す。第4章では、2種類の超音波装置（医療用超音波診断装置および魚群探知機）について農業水路における魚類資源量調査への適用可能性を明らかにするために行った実験の概要と結果を示す。第5章では、自律航行装置と超音波装置を搭載した魚類資源量調査装置（試作機）の現場適用性を検証するために行った野外航行試験の概要と結果を示す。第6章では、これまでの各章で得られた結果を整理・検討し、今後の課題とその対応策について示す。

## 2. 魚類資源量調査装置の概要

### 2. 1. 魚類資源量調査装置

本研究で開発する魚類資源量調査装置は、事前に登録した経路をラジコンボートが航行する「自律航行技術」と魚類等の水生生物の水中探索を非破壊に行う超音波技術を統合したものである（図2.1）。本装置を活用し、水田水域の全域の魚類資源量の分布を網羅的かつ連続的に調査することによって、生物多様性ホットスポット等の重要な生息環境の分布状況やネットワークの形成状況を把握することを目指す。これによって、調査にかかる労力や作業時間の縮減が図られる。また、非接触・非破壊的手法であることから短期間の反復的な調査が可能となる上、大型のボートに適さないような狭小な水路も走査できるため、浅水域が多い水田水域での幅広い応用が期待できる。なお、現時点では、個体ごとに魚種、体長等を判別することは難しく、魚類等の総個体数あるいは生息密度の把握を目指している。

以下、装置の主要構成要素である自律航行装置と超音波装置について記述する。

## 2. 2. 自律航行装置

### 2. 2. 1. 自律航行装置の構成

自律航行装置は、汎用性やコスト性を考慮し、広く市販されている製品により構成した。①小型パソコン（Raspberry Pi II）、②ボートの姿勢やモーターの回転数制御を行う装置（NAVIO+）、③GPSアンテナ、④Wi-Fiアンテナの機器をRCエアボートに搭載した（図2.2）。

#### 2. 2. 1. 1. Raspberry Pi II

Raspberry Pi IIは英国のRaspberry財団によって開発された製品であり、ARM社製のプロセッサを搭載したシングルボードコンピュータである（図2.3）。センサーやアンテナからの情報を処理し、ラジコンボートを命令通りに制御するための指示を出す。寸法が85.6mm×56.5mmとコンパクトなため、多くのモバイル機器等に使用されている。

#### 2. 2. 1. 2. NAVIO+

NAVIO+はRaspberry Pi IIに対応するボードであり、ラジコンボートの姿勢制御やモーターの回転数制御を行う。フラッシュメモリーや気圧センサー、加速度センサー、ジャイロセンサーなどが搭載されている（図2.4）。

#### 2. 2. 1. 3. APM PLANNER2

事前に航路を登録し、航行中のラジコンボートの状態を監視・制御することによって、目的地までの自動操縦を行うためのソフトウェアである。ドローン、マルチコプター、ラジコン飛行機等の自動操縦ソフトウェアとして広く利用されている（図2.5）。

#### 2. 2. 1. 4. GPS アンテナ

人工衛星からの電波を受信し、現在位置や方位を特定する。これにより、自身の位置情報を得るとともに、APM PLANNER2で事前に登録された経路との誤差修正が可能となる（図2.6）。

#### 2. 2. 1. 5. Wi-Fi アンテナ

Wi-FiアンテナはRaspberry Pi IIとWi-Fi環境下にある他のパソコンとの間の無線通信を可能にする。他のパソコンで設定した経路をWi-Fiアンテナを介してRaspberry Pi IIに転送する（図2.7）。

## 2. 3. 超音波装置を用いた魚類計数装置

### 2. 3. 1. 超音波装置の原理

超音波は人間の可聴音（一般的に20Hz～20KHz）を超える高い振動数の弾性振動波（音波）である。超音波装置とは、水などの液体を媒体として超音波を固体物質へ伝播させ、内部から反射源となる気泡やクラックの

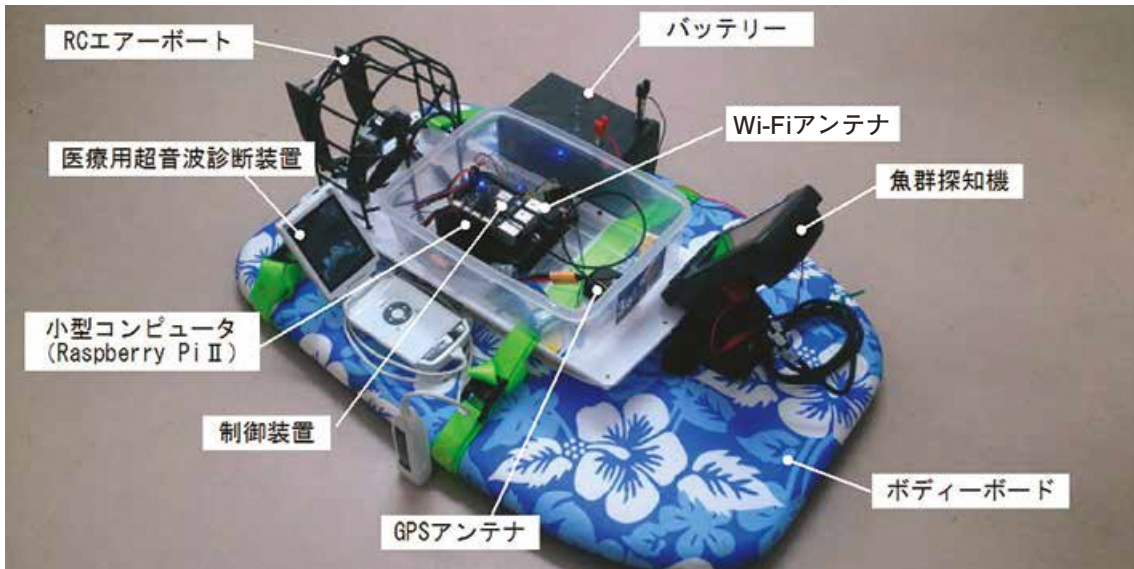


図 2.1 魚類資源量調査装置試作機

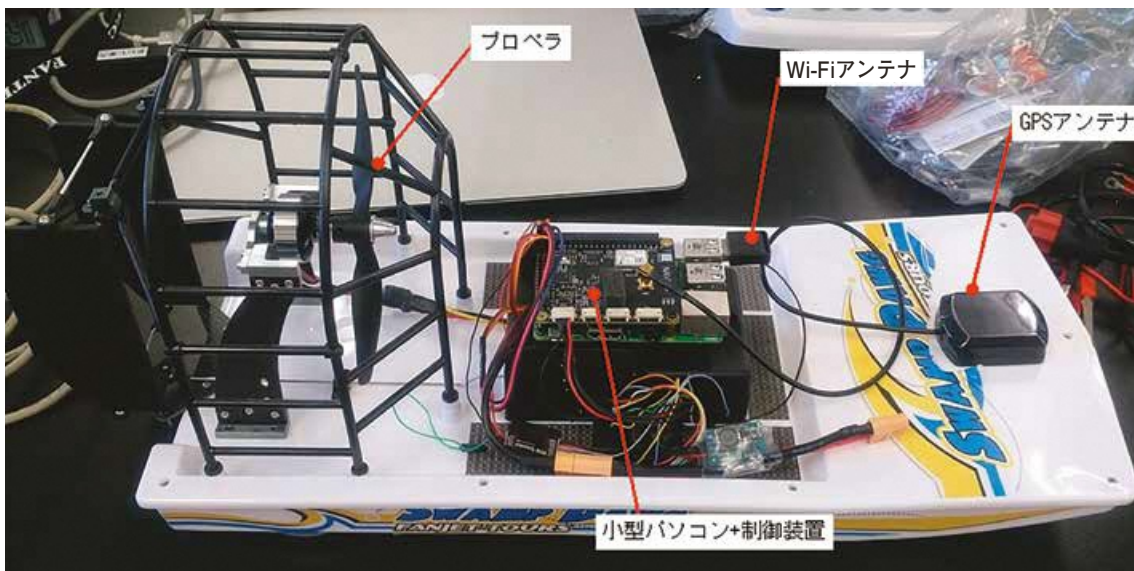


図 2.2 自律航行装置概要図

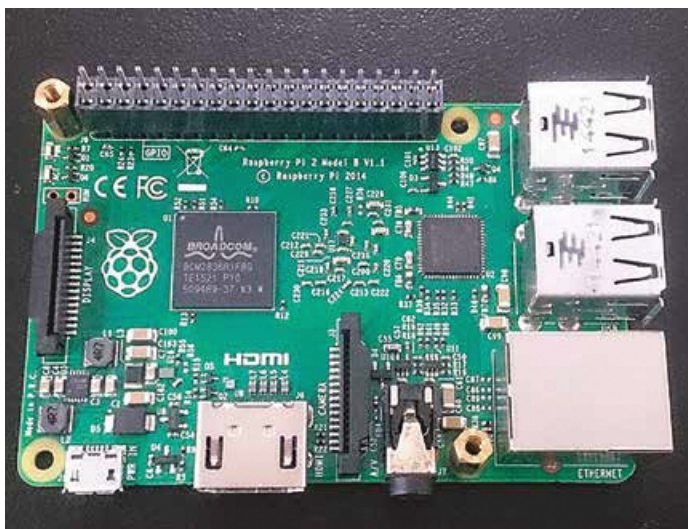


図 2.3 Raspberry Pi II

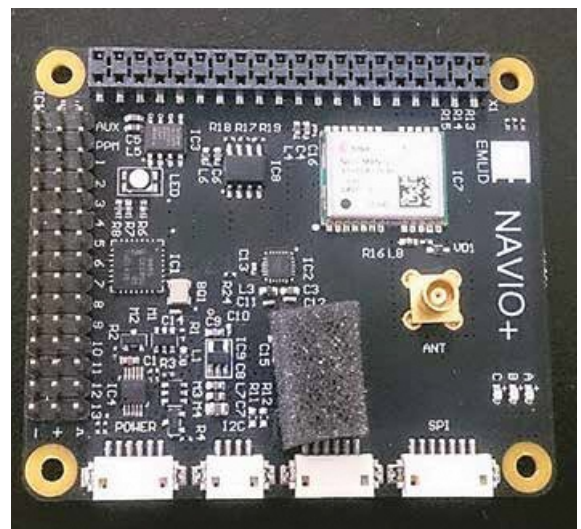


図 2.4 NAVIO+



図 2.5 APM PLANNER2 画面



図 2.6 GPS アンテナ



図 2.7 Wi-Fi アンテナ

欠陥、剥離などによる反射音（エコー）を計測する装置である。物体中に発信された音波は伝播過程で徐々に減衰するが、途中に材料特性（音響インピーダンス）が急激に変化する境界が存在すると、一部が反射して発信源方向へ伝播する。この反射音の有無や強弱を捉えて伝播経路途中の材料の境界や剥離などが検出される（図 2.8）。境界面での反射強度（反射率）は、入射側材料と透過側の音響インピーダンスの差によって決定される。対象物内の音響インピーダンスの差によって超音波の反射音が戻る時間が異なるため、反射音の時間から距離の計算、

対象物内部の状況を可視化できる。本研究ではこれらの超音波の特徴を利用し、魚類個体を可視化することによって水路における魚類資源量を把握することを目的とする（図 2.9）。

### 2.3.2. 開発に使用する超音波装置

本研究では、医療用超音波診断装置と魚群探知機の 2 種類の超音波装置を使用して魚類資源量調査装置の開発を進める（図 2.10）。以下、医療用超音波診断装置と魚群探知機の概要について記述する。

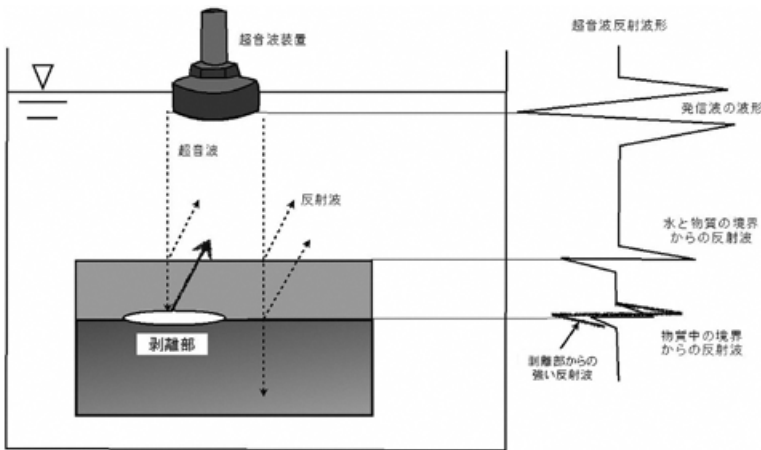


図2.8 超音波装置の概説

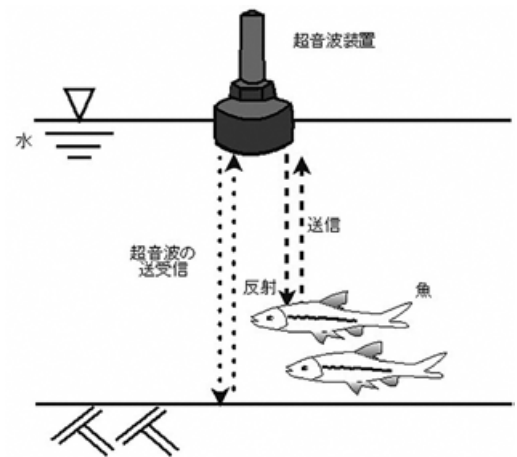


図2.9 水路内における魚類個体観測のイメージ



医療用超音波診断装置 (Vscan)



魚群探知機 (Elite-4X HDI LOWRANCE製)

図2.10 使用した超音波装置

### 2.3.3. 医療用超音波診断装置

医療用超音波診断装置は人体用に設計された超音波装置である。主に、患者の内臓や胎児の診察に使用される。

対象物に探触子（以下プローブ）を当て、超音波の送受信を行い、画像データとして処理する。一般的に使用される医療用超音波診断装置の超音波の周波数は2～10MHzの範囲である（橋本・鈴木，1984）。この周波数が高いほど、高分解能の画像を取得できるが、超音波の減衰が大きく、遠距離に超音波が到達しない。また、超音波は液体・固体中は透過しやすいが、気体中は透過し難い。そのため、臓器を映し出す能力は高いが、肺や消化管を映し出す能力は低いといった特徴がある。

超音波装置により投影された映像はプローブにより送受信された超音波によって切り出された任意の一面面である。そのため投影された魚類の映像は輪切り状の断面となる（図2.11右）。後述する魚群探知機が切り取った断面の映像を繋ぎ合わせることで水中を真横から見た映像を出力するのは異なる（図2.11左）。

#### 2.3.3.1. 医療用超音波診断装置の選定

検討した医療用超音波診断装置は以下の2種類で、市販されている製品の中で比較的軽量な、Vscan（GEヘルスケア・ジャパン株式会社）とUS-304（レキオ・パワー・テクノロジー株式会社）である。前者はセクタ型プローブで、プローブと本体が一体化している。後者はコンベックス型プローブで、プローブをUSBによってパソコンに接続して用いる（表2.2）。セクタ型プローブとコンベックス型プローブでは、接地面の大きさが異なり、後者の方が接地面は大きい。このため、コンベックス型プローブは、浅部から深部にかけて広範囲の観察を得意とし、主に腹部や臓器の観察に使用される。一方、セクタ型プローブは、浅部での視野は狭小だが、深部にかけて扇状に視野が広がる特徴があり、主に心臓領域に使用される（表2.3）。

#### 2.3.3.2. 医療用超音波診断装置の長所

医療用超音波診断装置は、周波数が15～200KHzである魚群探知機と比較し、周波数が大きいため分解能

が高く、妊婦体内の胎児の表情が認識できる程度までの映像取得が可能である。そのため、10cm 程度の魚類であれば、超音波画像上での識別が可能であると考えられる (図 2. 12)。

### 2. 3. 3. 3. 医療用超音波診断装置の短所

人体用に設計されており、可視化ソフトウェアの出力範囲が深さ約 20cm、幅約 15cm 程度に設定されている。このため、本研究で対象とする水深 1m ~ 1.5m、幅 2 ~ 5m 程度の農業用水路への適用には映像出力範囲が不足し、水深 20cm 以深の水域における魚類生息密度の推定には不十分と考えられる (図 2. 13)。しかし、現在、画像処理に関わるソースプログラムを開発会社から提供されており、今後ソフトウェア等の改良を行うことによって、映像出力範囲の拡張を試みる予定である。

### 2. 3. 4. 魚群探知機

魚群探知機は海洋や湖沼で魚群を探查することを目的とし、船舶に設置される装置である。水面から水底に向けて発信された超音波の反射音を受信し、魚影や地形を画像処理によって出力する。使用される超音波の周波数は目的によって多様であるが、一般的には 15 ~ 200KHz の周波数帯が利用されている (青木, 1990 上野, 1985)。魚群探知機の探知距離 (深度) は水中に発信する超音波の周波数に大きく左右される。高周波は波長が短いことから、水中を伝播する過程で大きな減衰が生じるため、分解能が高い映像を取得できるが探索範囲は小さい。一方、低周波は波長が長いことから、水中伝播上の減衰が少なく深い探索が可能であるが、取得映像の分解能は前者と比べて低い。今回の開発では、小型で持ち運びが容易な Elite-4X HDI (LOWRANCE 製) を使用した (図 2. 10 右)。

### 2. 3. 4. 1. 魚群探知機の長所

魚群探知機は医療用超音波診断装置と比較すると分解能が低いため魚群の把握に留まり、一部の計量魚群探知機を除き各個体の魚影を識別することは困難であるが、水深数 100m まで探查可能である。また、GPS 機能が付帯する製品を使用することにより、別途 GPS アンテナを搭載することなく航行した軌跡を座標情報として記録することができる点に特徴がある。

### 2. 3. 4. 2. 魚群探知機の短所

魚群探知機は、超音波の水面反射や水中に混入した空気、太陽からの紫外線等の影響で発生する発振線により水面から約 50cm 付近までの探索ができない (図 2. 14, 2. 15)。医療用超音波診断装置が 20cm 以深を探索できないのとは対照的に、魚群探知機は、50cm より浅い浅水深域の探索が困難である。

## 2. 4. 小 括

本章では魚類資源量調査装置の概要を示し、主要な構成要素である自律航行装置と超音波装置について概説した。自律航行装置は汎用性やコスト性を考慮し、広く市販されている製品により構成され、①小型パソコン、②ボートの姿勢やモーターの回転数の制御を行う装置、③GPS アンテナ、④ Wi-Fi アンテナの機器を RC エアボートに搭載した。超音波装置には医療用超音波診断装置と魚群探知機を採用し、この 2 種類の超音波装置を農業用水路における魚類資源量調査に利用するためには解決すべき課題があることが判明した。そのため、魚類資源量調査装置の開発に向けて、それらの機器特有の短所を補う工夫や改良を加える必要性が明らかとなった。

次章から、自律航行装置、超音波診断装置について、それらの実用性等の検証を目的として行った実験について記述する。

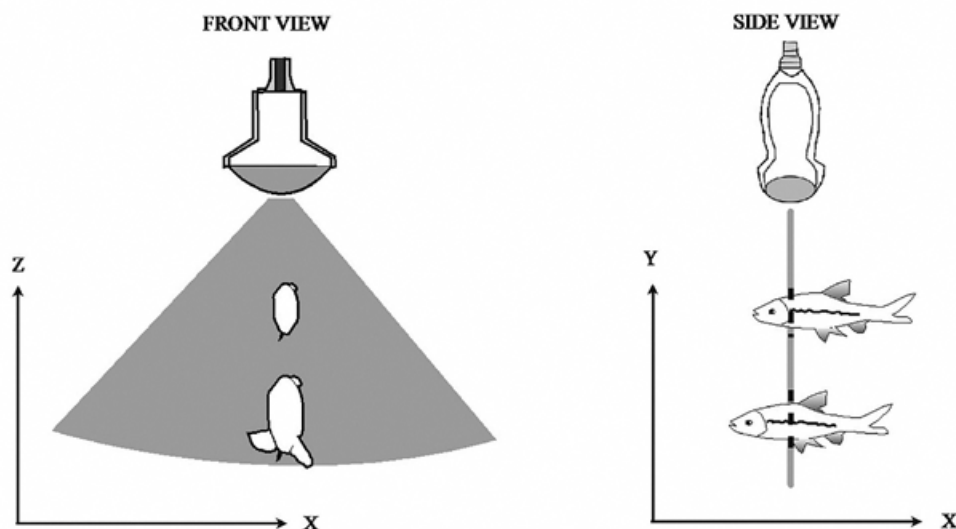


図2. 11 超音波装置の概要

表 2.2 2種の医療用超音波診断装置の差異

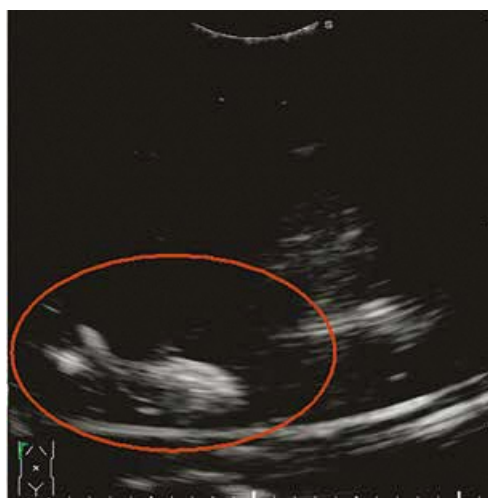
	Vscan	US-304
医療用 超音波 診断装置		
プローブ	セクタ型	コンベックス型
診察領域	心臓領域	腹部や臓器
画面接続	画面と一体型	画面と別々・USBタイプ

表2.3 セクタ型とコンベックス型のプローブの差異

	セクタ型	コンベックス型
プローブ		
出力画面の形	扇型	扇型
超音波の方向		
接触面	放射状 平面	放射状 放射状
探触子周波数	3~7MHz	2.5~12MHz



Vscan



US-304

図2.12 出力画像に写る魚類



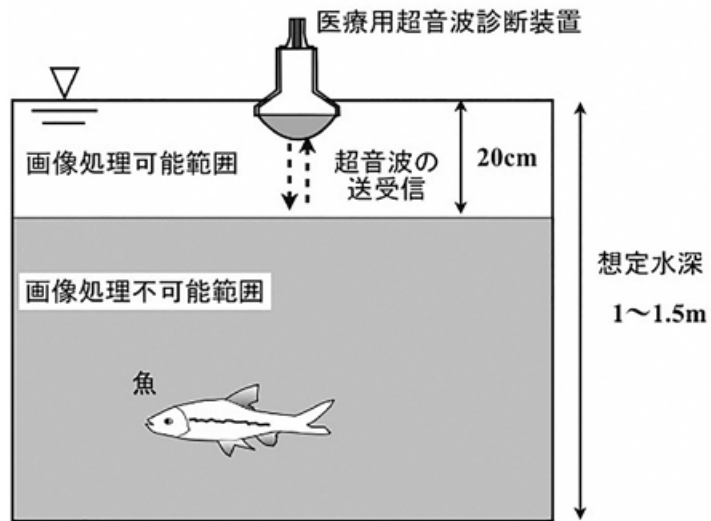


図2.13 エコーの計測可能範囲

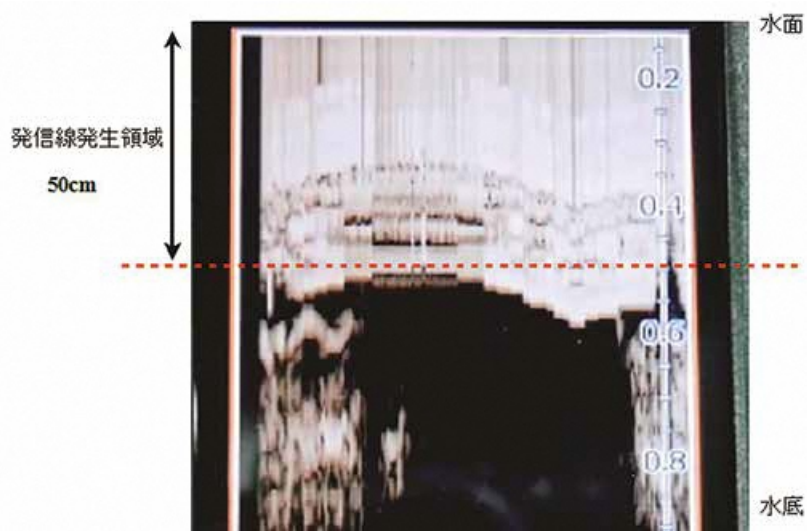


図2.14 魚群探知機の画面に出る発振線

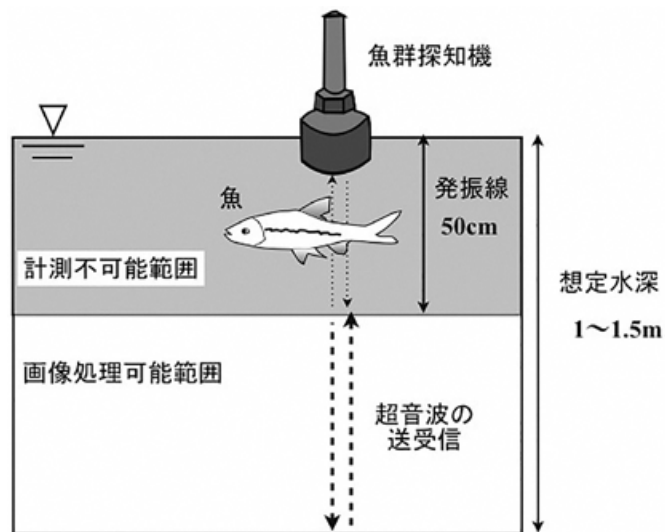


図2.15 魚群探知機の計測可能範囲

### 3. 自律航行装置の航行性能に関する検討

魚類資源量調査装置の構成要素である自律航行装置について航行性能を明らかにするため、ラジコンボート(水上)およびラジコンカー(陸上)を使って実験を行った。

#### 3.1. ラジコンボート制御に関する検証実験

新潟県長岡市山古志地区の養鯉池(図3.1, 2)においてラジコンボートの自律航行試験を行った。本養鯉池は比較的広い水面を有しており、想定する資源量調査水域程度の規模が確保できることから、試験地として選定した。また、本養鯉池には鯉の稚魚が飼育されており、概ねの体長(稚魚が主体)や数(約5千匹)が既知であったため、第4章で記す魚群探知機の試験(魚群の確認等)にも適していた。

##### 3.1.1. 実験方法

養鯉池上には長辺7.0m、短辺4.0mの長方形の経路をソフトウェア(APM PLANNER2)上で登録し、ラジコンカー上の小型コンピュータにWi-Fi経由で送信した。この経路に沿ってスタート(No.0)からNo.1、No.2、No.3を通過し、スタート地点に帰着した場合を制御成功と判断した(図3.3, 3.4)。

##### 3.1.2. 実験結果

実験の結果、ラジコンボートは目的地に到達できなかった。ラジコンボートは出発地点から直進した後、その場で回転を続けた。以下2点が原因と考えられる。

第1に、APM PLANNER2には、ラジコンボートに特化した制御モードがないため、ラジコンカー用の制御モードを使用した。経路に設定した通過点において一旦停止後に方向転換する必要があるが、ラジコンボートは慣性力により水面で急な方向転換が難しく、登録経路に戻ろうとする動作を繰り返したことが原因の一つと推測される。第2に、コンパスの精度が不十分であったことにより、ラジコンボートとパソコン上の進行方向が一致しなかったことである。

#### 3.2. ラジコンカーの制御に関する検証実験

以上のことから、ラジコンボートより制御しやすいラジコンカーを利用して、検証実験を行った。自律航行装置をラジコンカーに搭載し(図3.5)、新潟大学農学部棟の屋上で実験を行った(図3.6)。ラジコンカーによる実験を行った理由は、(1)APM PLANNER2による制御方法にはラジコンカーに特化した制御モードがあること、(2)水面に浮かぶラジコンボートは慣性力によって方向転換時の精密な制御の難易度が高いのに対し、ラジコンカーは車輪と地面の摩擦によって命令通りの制御が容易であること、(3)ラジコンボートと異なり、ラジコンカーは自律航行装置の防水対策が不要であること

である。操作方法は、ラジコンカー、ラジコンボートともに舵とアクセルの2チャンネルである。

##### 3.2.1. 実験方法

養鯉池の実験と同様、新潟大学農学部棟屋上の一角に長辺7.0m、短辺4.0mの長方形の経路をソフトウェア(APM PLANNER2)上で登録し、ラジコンカー上の小型コンピュータにWi-Fi経由で送信した。この経路に沿ってスタート(No.0)からNo.1、No.2、No.3を通過し、スタート地点に帰着した場合を成功と判断した(図3.7)。実験は2016年9月12日に実施し、同じ経路で3回試行した。

##### 3.2.2. 実験結果

自律走行を3回試行した結果、命令通りにスタート地点に帰着したのは1回のみであった。命令通りに走行しなかった原因は、以下のとおりである。

第1に、位置情報の取得および処理速度がラジコンカーの移動速度に追いつかず、事前に登録した経路から外れ、現在地を見失ったことが原因と考えられる。第2に、養鯉池での実験と同様、GPSのコンパス精度が不十分であったことにより、ラジコンカーとパソコン上の進行方向の不一致が生じたことである。

比較的制御が容易と考えられるラジコンカーでもこれらの問題の解決には、ソフトウェアによる制御機構、GPSのコンパス精度、小型コンピュータの処理速度の改良が必要と考えられる。

#### 3.3. 小括

本章では自律航行装置に関する実験とその結果を述べた。山古志村養鯉池、農学部棟屋上で行った実験により、自律航行システムを本格的に農業用水路に適用する上で速度制御とコンパス精度確保に課題があることが明らかとなった。

この課題の解決にはラジコンボートの航行速度を一定にすることや目的地で確実に静止させることが必要と考えられる。山上ら(2015)は、河川流速の自動計測用の自律移動浮体ロボットの試作開発を行っている。その際、ラジコンボートの水上での静止を可能とするため、静止に必要な推進力(スクリュウ回転数)を発生させる自律制御システムを開発している。また、自律制御システムでは、ラジコンボートの位置を正確に捉えるためにカメラ画像によるトラッキング技術を適用している。これは、ロボット投入地点と計測地点を写した画像からロボット位置をリアルタイム追跡し、位置情報をロボットに無線送信して制御することによって高精度の自動航行を実現させている。今後、本研究の自律航行システムについてもラジコンボートによる自律航行の精度を向上させるためには、自律航行装置本体の改良はもちろ



図3.1 新潟県山古志村の養鯉池



図3.2 養鯉池の様子



図3.3 養鯉池上の登録ルート



図3.4 自律航行の様子



図3.5 自律航行装置を搭載したラジコンカー

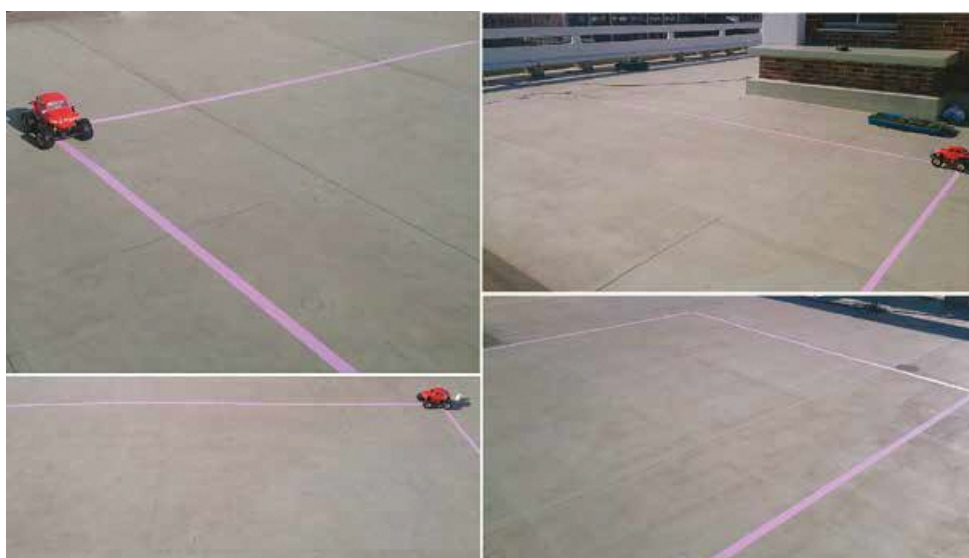


図3.6 農学部棟屋上での実験の様子

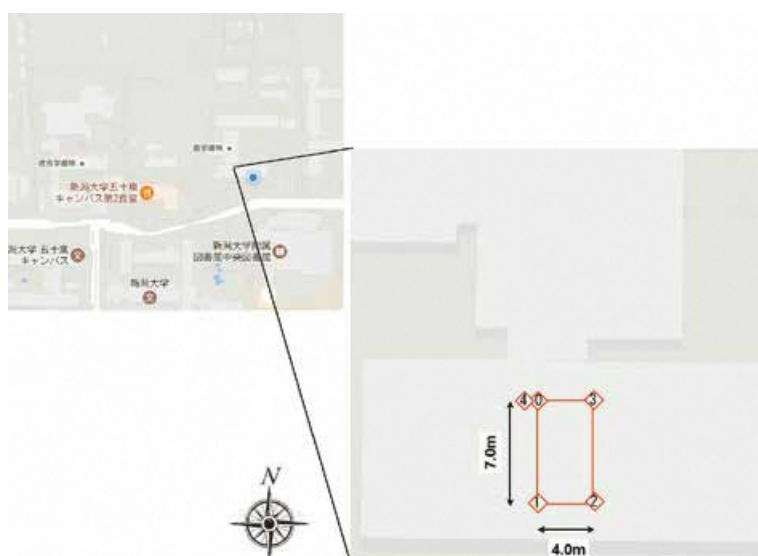


図3.7 農学部屋上の登録ルート

ん、航行制御系のソフトウェアの改良等を進めることが必要と考える。

#### 4. 超音波装置による魚類計数性能の検討

魚類資源量調査装置の構成要素である超音波装置の魚類計数性能の検討のために2種類の実験を行った。一つは医療用超音波診断装置の魚類計数性能の確認のための実験、二つ目は通常、深度のある水域で使用する魚群探知機について、浅水域における適用性（魚群探知性能等）の確認のための行った実験である。以下に実験の概要と結果について記述する。

##### 4.1. 医療用超音波診断装置を用いた屋内水路における魚類計数実験

新潟大学農学部の水理実験棟の実験水路において、①静止した物体（干物・魚肉ソーセージ）と②生きた淡水魚を対象に医療用超音波診断装置の魚類計数性能を検証した。実験にはレキオ・パワー・テクノロジー株式会社製の医療用超音波診断装置 US-304 を使用した。本装置の仕様を表 4.1 に示す。装置の使用に際しては、対象物との間の空気混入防止を目的としてジェル（LOGIQLEAN GEヘルスケア・ジャパン株式会社製）をプローブセンサー部分に塗布し、防水のため、透明なポリ袋で覆った。

超音波映像はパソコンにインストールした出力用ソフトウェア（ACSECHOV GEヘルスケア・ジャパン株式会社製）によってパソコン上へ出力した。出力映像の記録には、録画ソフトウェア（AGデスクトップレコーダー）を使用し、MP4形式の動画として保存した。

#### 4.2. 静止物体の観測

##### 4.2.1. 実験方法

実験水路内に長さ 200cm、幅 50cm の領域を設け、医療用超音波診断装置は実験水路上を滑走する台車に固定（図 4.1）。領域内の上流、中流、下流部に等間隔に竹串に刺した静止物体（干物・魚肉ソーセージ）を配置

し、レンガで固定した（図 4.2）。静止物体の固定方法については、物体を固定する高さや横断的位置、物体の向き、物体の重なりによる映像の変化を確認するため、以下の2パターンを設定した。パターンⅠは上流、中流、下流の3箇所です静止物体を竹串上部に固定し、パターンⅡでは静止物体を竹串の上部と下部の2段に重ねて固定した（図 4.3）。

実験には、事前に曝気した水道水を使用した。この水を上部の吸水タンクから給水し、下流部ゲート高の調整によって系内の水深を約 25cm に維持した（図 4.4）。流速をプロペラ式流速計（VRT-200-20N 株式会社ケネック製）を使用して測定したところ 3.2 cm/s であった。また、水路水温は 11.8 度であった。実験の様子を図 4.5 に示す。

医療用超音波診断装置による物体の観測は、以下に示す定点観測と移動観測の2通りの方法を試みた。

##### (1) 定点観測

台車に固定した医療用超音波診断装置を領域内の静止物体の真上に固定し観測した。記録時間は30秒間とした。

##### (2) 移動観測

実験領域 200cm を下流から上流にかけて約 10 秒で通過する速度で移動させながら静止物体を観測した。

なお、記録はそれぞれの観測方法および物体の固定パターンごとに3回ずつ行った。

#### 4.2.2. 実験結果

##### (1) 定点観測

水路側面のガラスの反射によるノイズの発生があったものの、対象の干物や魚肉ソーセージのみならずそれを支える竹串まで鮮明に記録することができ、高い識別性能をもつことが示された（図 4.6）。

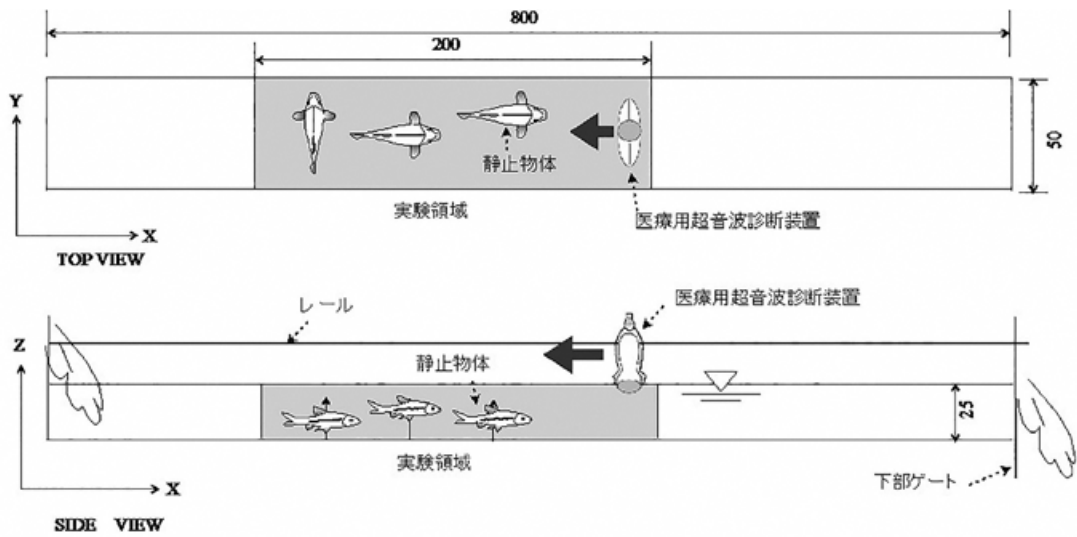
##### (2) 移動観測

静止物体を映像中で確認できたのは一瞬であったため、物体を瞬時に識別することは困難であった（図 4.7, 8）。移動速度の調整や画像診断技術を利用した計数アルゴリズムの開発が必要である。

表4.1 US-304の仕様

周波数	35MHz
チャンネル	64ch
重量	約220g
サイズ（外寸）	85mm×140mm×2m
電源電圧	5V
消費電力	500mA
音響安全性	1.9以下
表示ソフト対応OS	Windows7・Android





実験水路の模式図 (寸法単位はcm)



側面写真



平面写真

図4.1 実験領域の概要

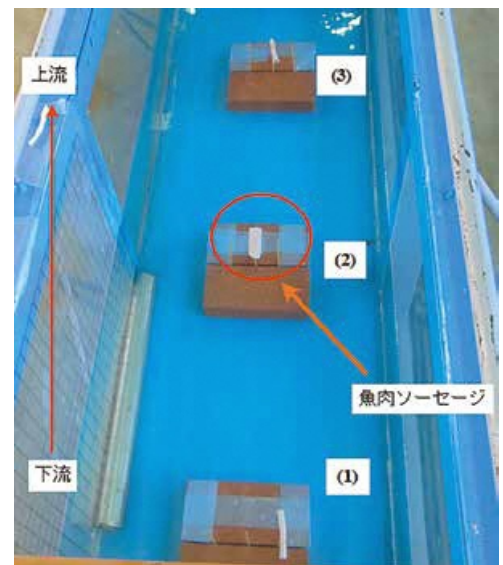
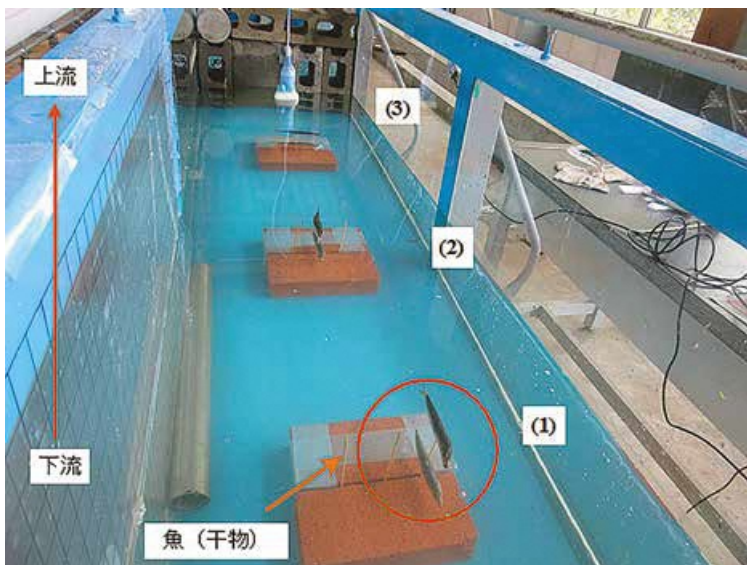
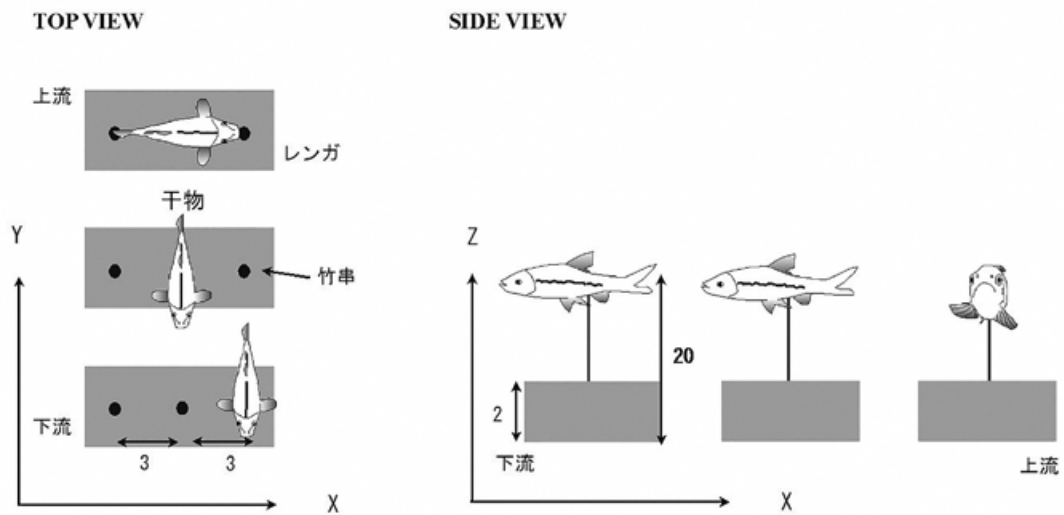
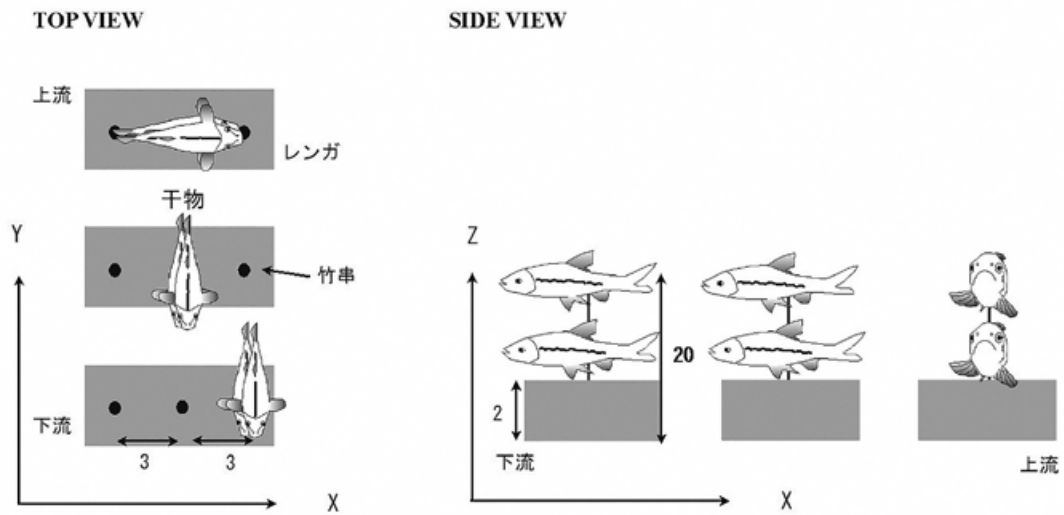


図4.2 干物および魚肉ソーセージの固定



静止物の固定パターン I (寸法単位はcm)



静止物の固定パターン II (寸法単位はcm)

図4.3 静止物の固定の方法

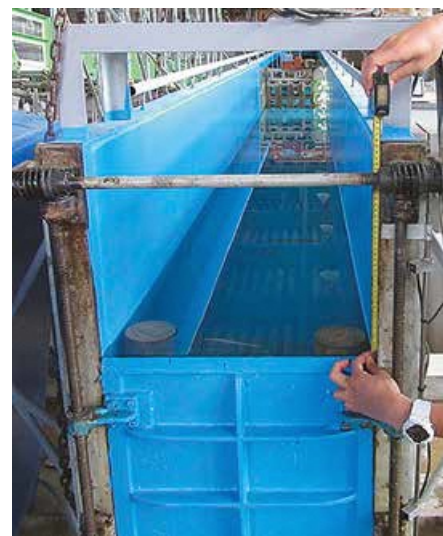
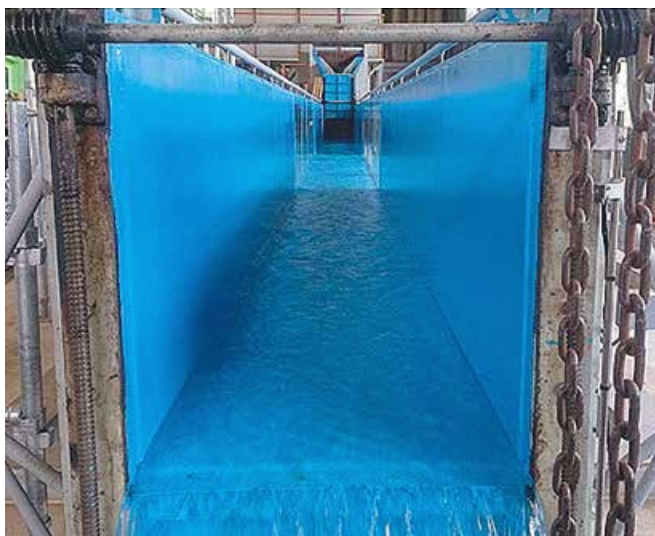


図4.4 下流部ゲート高の調整



観測とパソコンによる記録

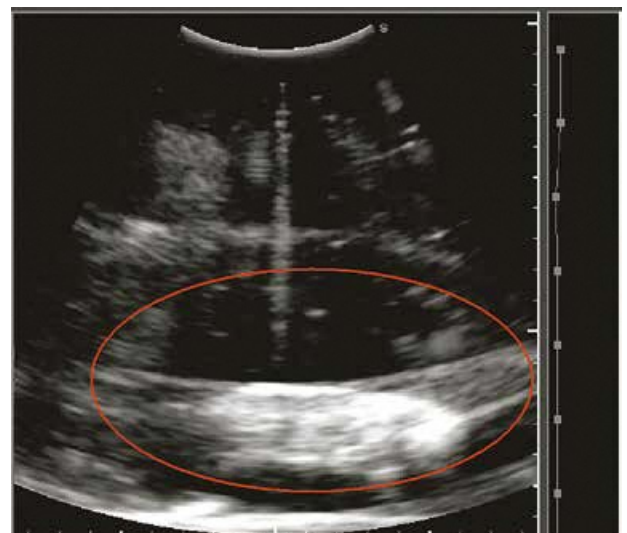


パソコン画面

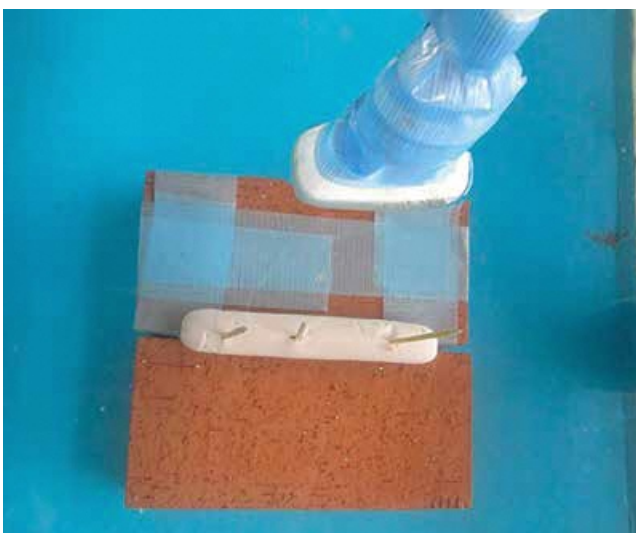
図4.5 実験の様子



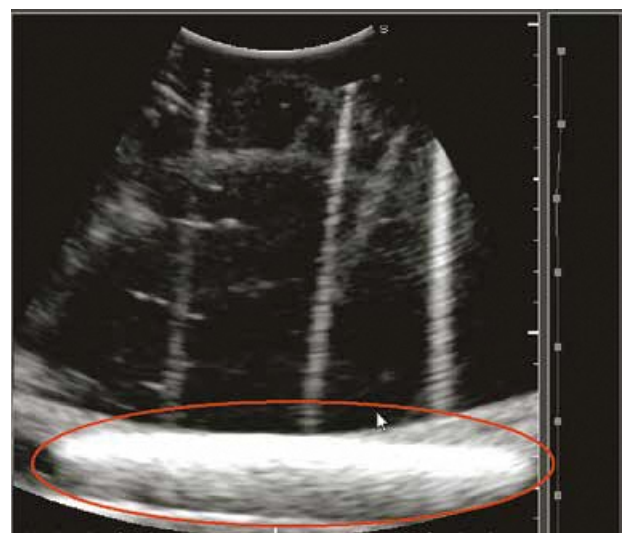
干物



干物の出力画像



魚肉ソーセージ

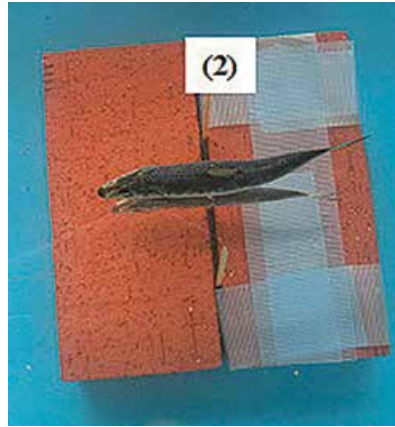
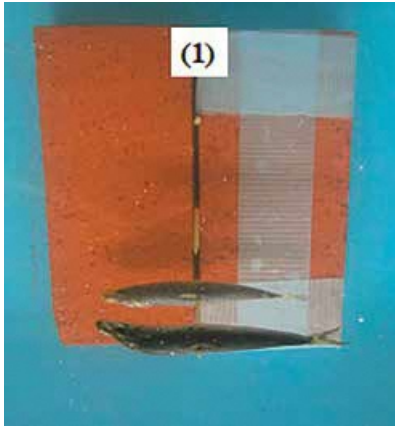


魚肉ソーセージの出力画像

図4.6 定点観測時の出力画像 (干物)



実物画像

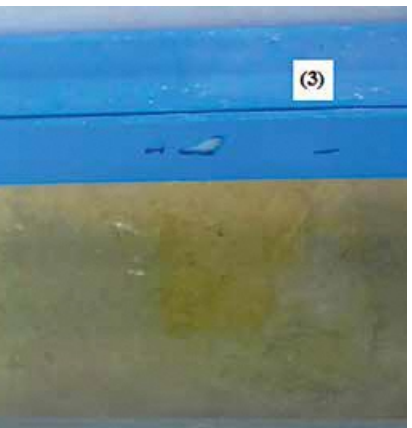
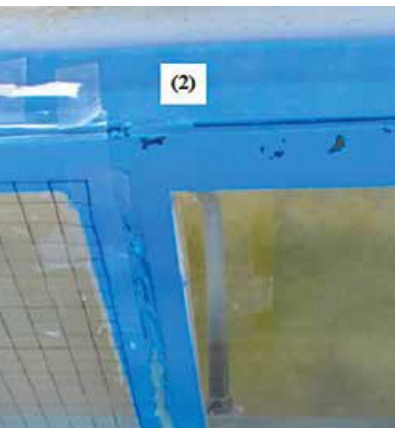
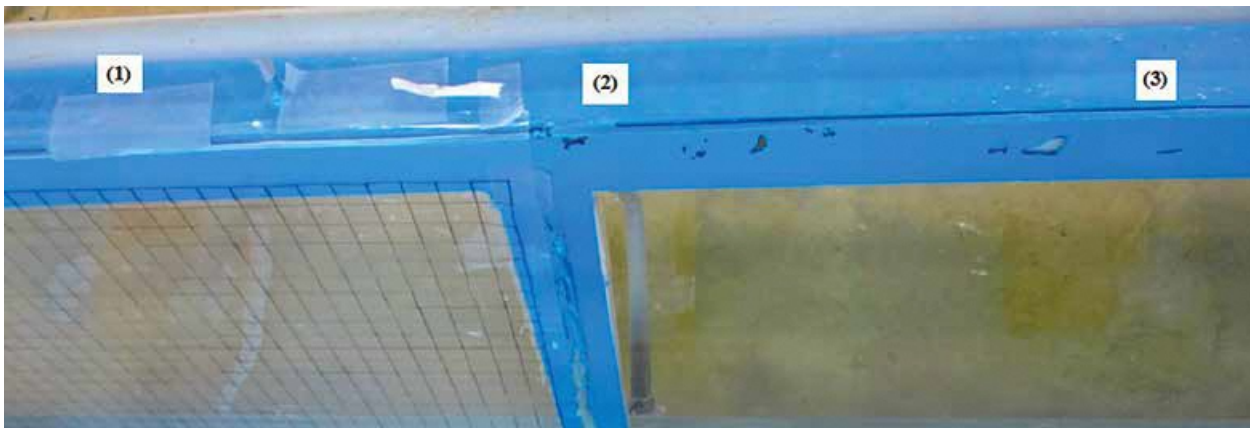


出力画像



図4.7 移動観測時の出力画像（干物）

実物画像



出力画像

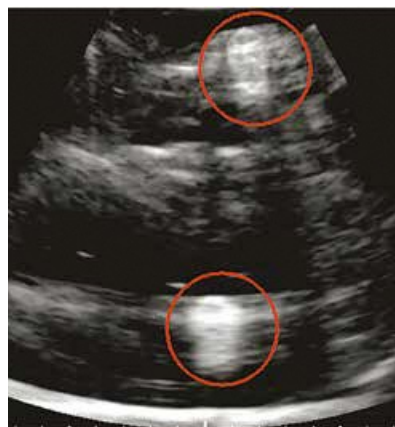


図4.8 移動観測時の出力画像（魚肉ソーセージ）

また、静止物体を設置する水深を変化させた場合では固定水深による出力映像の違いが認められた。これは、US-304によって出力される映像が扇型であることが原因であると考えられる。上流、中流、下流のレンガにそれぞれ固定した3本の竹串のうち左右の竹串上部に静止物体を固定すると、出力画像の一部が見切れている。一方、同じ超音波映像でも3本の竹串のうち左右の竹串下部に静止物体を固定すると出力画像は見切れず映り込んでいる(図4.7(1))。このことから医療用超音波診断装置は水面付近よりも遠距離の物体を判別し易いことが明らかとなった。

### 4.3. 淡水魚の観測

#### 4.3.1. 実験方法

実験水路内に長さ100cm、幅50cm、水深約20cmの領域を設けて実験を行った(図4.9~4.11)。通水はせず、漏水分のみを補給した。実験中は下流部ゲート高の調整によって系内の水深を約20cm程度に維持した。水路水温は8.5度であった。水路には淡水魚の生体を5~110尾まで5尾ずつ段階的(計22段階)に水路に投入し、段階ごとに3回ずつ観測した。

また、この実験ではデジタルカメラ(Pentax Optio w90 リコーイメージング株式会社製)で動画を撮影し、医療用超音波診断装置の下を通過した魚類を目視で確認できるようにした。デジタルカメラは医療用超音波診断装置の真上に設置し、医療用超音波診断装置の先端部から15.5cmの高さに固定した(図4.12)。

実験で使用した供試魚は新潟市亀田郷地域、西蒲原地域および阿賀野市久保地内の排水路で採取した、モツゴ(*Pseudorasbora parva*)、タモロコ(*Gnathopogon elongatus elongatus*)、ヤリタナゴ(*Tanakia lanceolata*)、ギンブナ(*Carassius auratus langsdorfii*)、アブラハヤ(*Phoxinus lagowskii steindachneri* Sauvage)、タイリクバラタナゴ(*Rhodeus ocellatus*)である。供試魚全個体の体長はN=110尾(L=63mm±12.7mm)であり、種ごとではモツゴ;N=9尾(L=61mm±3mm)、タモロコ;N=49尾(L=56mm±9mm)、ヤリタナゴ;N=2尾(L=58mm±3mm)、ギンブナ;N=23尾(L=77mm±15mm)、アブラハヤ;N=25尾(L=65mm±6mm)、タイリクバラタナゴ;N=2尾(L=44mm±2mm)であった。なお、採取から少なくとも一ヶ月以上室内の水槽で飼育した魚を使用した。また、実験開始5分前には供試魚を実験水路に放ち、実験環境に馴致させた。ただし、水路放流後に明らかに実験水路に順応していないと判断された個体や、放流した時点で弱っていると判断される個体はあらかじめ実験水路内から取り除いた(図4.13)。

医療用超音波診断装置による観測は4.2.1の静止物体の実験と同様、定点観測と移動観測の2つの方法を試

みた。具体的な方法は以下の通りである。

#### (1) 定点観測

領域中央部に医療用超音波診断装置がくるように台車を固定し、30秒間の映像を記録した。

#### (2) 移動観測

実験領域100cmを約10秒で通過する速度で下流から上流にかけて台車を移動させながら映像の記録を行った。

### 4.3.2. 分析方法

移動観測、定点観測それぞれで得られた映像から、各段階毎に目視で確認できた魚類を計数した。計数については、最初に医療用超音波診断装置の出力映像(以下、超音波映像)を確認し、引き続きデジタルカメラ映像(以下、カメラ映像)を確認した。超音波映像では、魚影の形状や動きから確実に魚類と判別できた個体のみを計数した(図4.14)。カメラ映像では、超音波映像による撮影範囲を正確に把握することが困難であったため、医療用超音波診断装置の真下を通過した個体のみ計数した(図4.15)。3回の観測で得られた魚数(尾)を平均し、これらを各段階の超音波映像およびカメラ映像の確認個体数(尾)の代表値とした。

なお、映像再生は、動画再生ソフト(VLCメディアプレーヤー Video LAN製)を使用し、より正確に計数を行うために動画再生速度を0.2倍速とした。

超音波映像およびカメラ映像から確認個体数を用いて、以下の分析を行った。

1) 医療用超音波診断装置の真下を通過した個体に関する超音波映像の視認性を検討するため、カメラ映像による確認個体数を従属変数、超音波映像による確認個体数を独立変数とした回帰分析を行った。2) 医療用超音波診断装置を利用した魚類の生息密度推定の可能性を検討するため、水路の実験領域内における魚類の個体数密度(尾/m<sup>2</sup>)を従属変数、超音波映像による確認個体数を独立変数とした回帰分析を行った。

### 4.3.3. 実験結果および考察

カメラ映像と超音波映像による確認個体数の間で回帰分析を行った結果、定点観測の場合で $y=0.91x$  ( $R^2=0.90$ ,  $P<0.01$ ,  $N=22$ )、移動観測の場合で $y=0.95x$  ( $R^2=0.96$ ,  $P<0.01$ ,  $N=22$ )の関係式が得られ、いずれも強い相関が認められた(図4.16)。また、回帰式の傾きは定点観測、移動観測ともに1に近く、超音波映像により医療用超音波診断装置の直下を通過した個体を高い精度で捕捉していることが示された。

続いて、実験領域内の魚類の個体数密度と超音波映像による確認個体数との間で回帰分析を行った結果、定点観測の場合で $y=19.1x$  ( $R^2=0.70$ ,  $P<0.01$ ,  $N=22$ )、移動観測の場合で $y=15.1x$  ( $R^2=0.71$ ,  $P<0.01$ ,

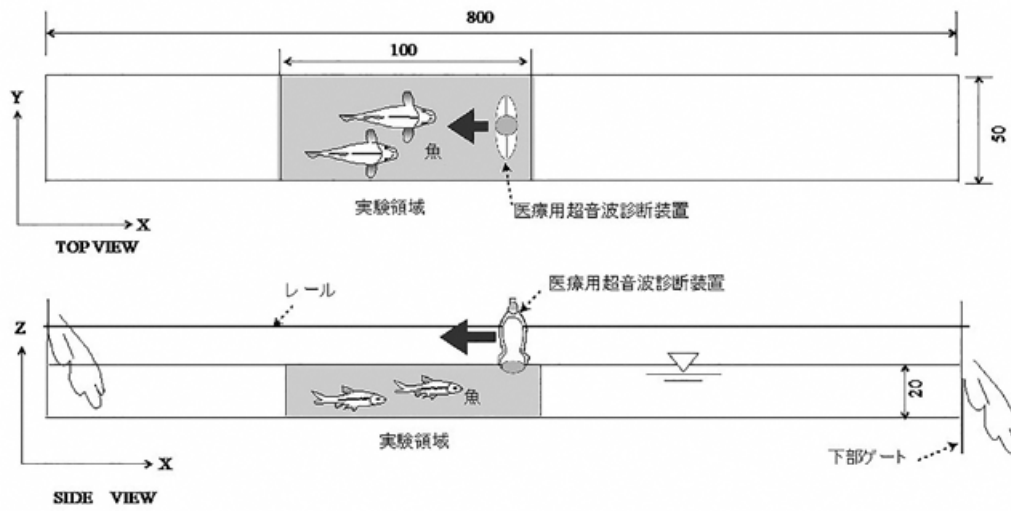


図4.9 実験水路の模式図 (寸法単位はcm)



図4.10 実験領域の側面写真



図4.11 領域の仕切り



図4.12 カメラの設置



図4.13 実験の様子 (110尾投入時)

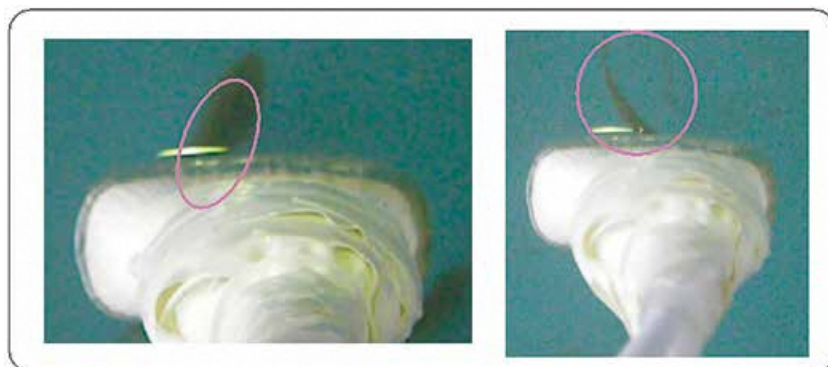


図4. 14 医療用超音波診断装置の出力映像での計数方法

計測幅



計数可能 ○



計数不可能 ×

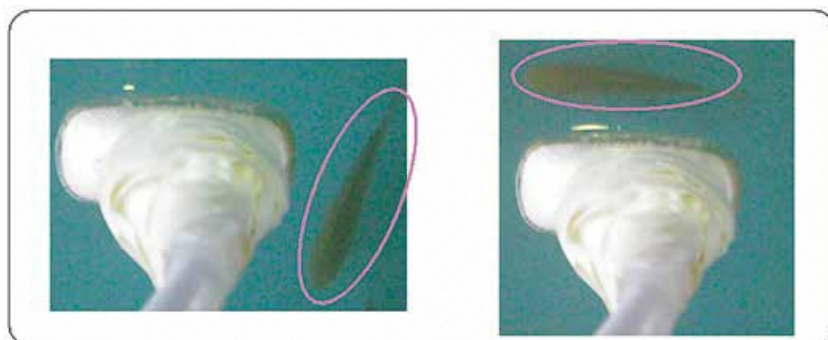


図4. 15 カメラ映像での魚数の計数方法

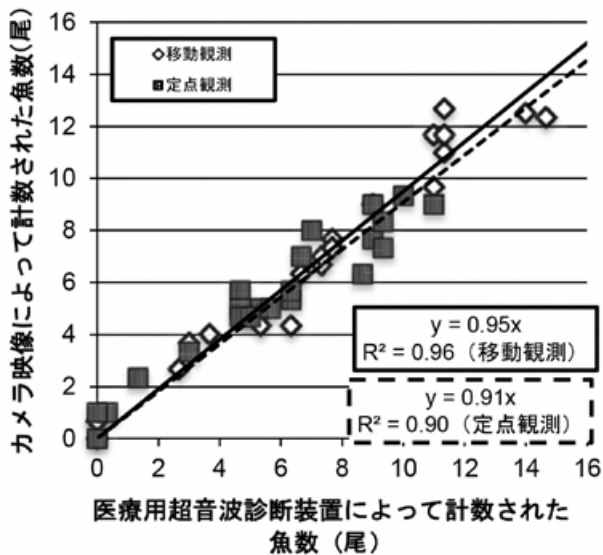


図4. 16 カメラ映像と医療用超音波診断装置の出力映像の魚数の関係

N=22) の関係式が得られ、いずれも一定の相関が認められた (図 4. 17)。このことは、医療用超音波診断装置により得られた映像から実験水路内における魚類の個体数密度をある程度、推定できることを示している。一方で、実験領域内における個体数密度の増加により、個体数密度と超音波映像による確認個体数との当てはまりが若干、悪くなることが示された。これは、高密度の条件下においては、瞬間的に超音波映像に複数の個体の魚影が同時に映り込むため、目視による計数作業の精度が低くなったことによると考えられる。この問題に対しては、画像解析技術の応用による自動計数手法の開発等による計数精度の向上など新たな対策を検討する必要があると考えられる。

#### 4. 4. 浅水域における魚群探知機の適用性試験 (発振線除去)

新潟県長岡市山古志地区の養鯉池において、浅水域における魚群探知機の魚群探知性能を検証した。特に浅水域における魚群探知機の適用性を考慮し、2.3 に示した水面から約 50cm 付近まで発生する発振線を除去するために考案した対策手法の効果検証を試みた。実験にはローランス社製の魚群探知機 (Elite-4X HDI) を使用した。本装置の仕様を表 4. 2 に示す。

##### 4. 4. 1. 実験方法

発振線対策として、超音波を池の水面より上方から発信することによって、水面以深に発生する発振線を除去する手法を構想し、その効果を検証した。具体的には、池の水面上に水深 20cm 程度となるように水を満たした水槽を浮かべ、超音波を水槽内から発信し (図 4. 18)、発振線除去の状況を確認した。実験は、超音波の送受信

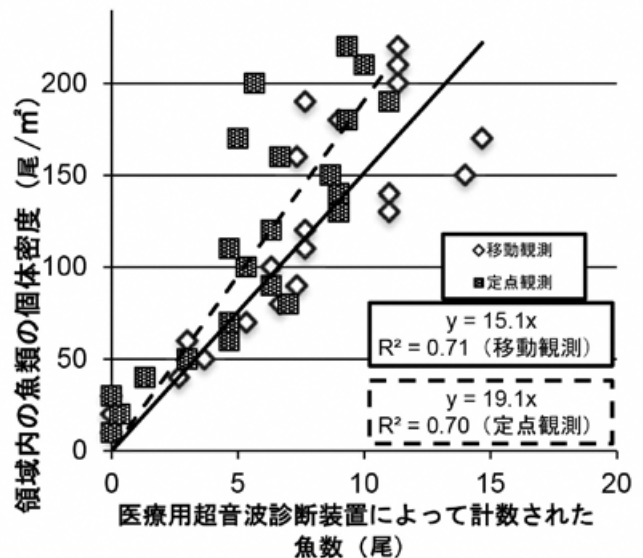


図4. 17 実験領域内の魚類密度と医療用超音波診断装置の出力映像の魚数の関係

を行う振動子を 1) 養鯉池に直接入れた場合、2) 池に浮かべた水槽の水深 10cm に入れた場合の 2 種類の方法により行い、得られた魚群探知機の画面映像から発振線の発生状況を比較した。なお、水槽内の水深を 20cm 程度としたのは、ラジコンボートへの発振線対策装置の搭載時の航行安定性を考慮して装置の軽量化を図るため、発振線を全て除去するのではなく、20cm 程度の除去に留めることと想定したためである。

#### 4. 4. 2. 実験結果

実験の結果、1) 池水面から直接超音波を発信した場合と同様に 2) 水槽内から発信した場合でも、養鯉池の底が明確に判別できた。このことは、水槽底による超音波の減衰は限定的であり、一部が養鯉池の底まで到達し距離を正しく計測していることを示す。

水槽水面から超音波を発信することで、発振線の発生位置が 10cm 程度上昇する現象が確認されたが、それと同時にノイズの増加も確認された (図 4. 19)。これは、水槽内で発信した超音波が、水槽の壁面によって乱反射したことが原因と考えられる。この問題に対しては、超音波の反射を抑制するための吸音材を水槽内部に設置する等、新たな対策を検討する必要がある。

#### 4. 5. 小 括

本章では超音波装置による魚類計量性能の検討を目的に、医療用超音波診断装置と魚群探知機を用いて実験をそれぞれ行った。

屋内水路において医療用超音波診断装置による静止物体を観測する水路実験では、本装置が水中の物体を明確に補足できることが明らかになった。淡水魚を対象とした場合、カメラ映像と医療用超音波診断装置で確認され

表4.2 Elite-4X HDI の仕様

送信周波数	83/200KHz
供給電力	12V DC
動作範囲	10V-17V
画面表示タイプ	TFT液晶ディスプレイ
表示色	16色
画面サイズ	4.3インチ

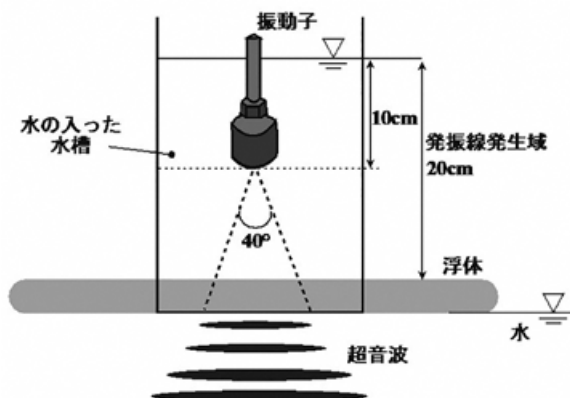
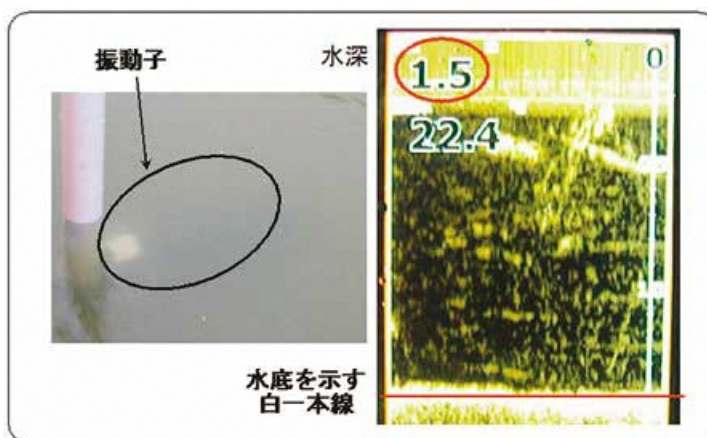


図4.18 発振線除去法の提案

池水面から直接  
超音波を発信



水槽水面から  
超音波を発信

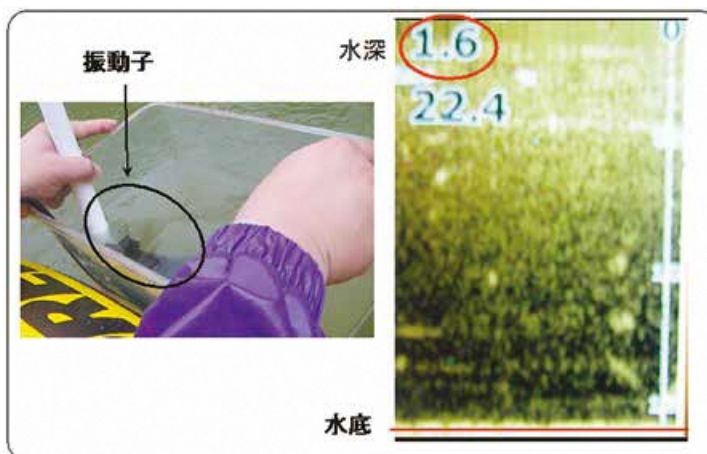


図4.26 発振線除去実験の結果

た魚数には定点観測、移動観測ともに強い相関 ( $R^2 > 0.9$ ) が認められ、回帰式の傾きが1に近い結果が得られた。このことから医療用超音波診断装置の直下を通過する淡水魚をほぼ全数を捕捉できたことが明らかとなった。また、実験領域内の魚類個体数密度と医療用超音波診断装置で確認できた魚数の関係は定点観測、移動観測ともに相関 ( $R^2 > 0.7$ ) が認められた。医療用超音波診断装置の映像から水域内の魚類の生息密度を推定できることが示唆された。

本装置の水中の魚の判別性能が高いことに加えて水域内の魚類の生息密度を推定できることから、探索範囲の問題さえ解決できれば、農業用水路における魚類の生息密度推定に有効な手段であると言える。

魚群探知機の発振線除去法については、養鯉池で行った実験の結果、超音波が水槽の底を透過して水底までの距離を正しく判別できるものの、魚群探知機画面上でのノイズの発生することが確認された。これは、水槽内からの超音波の発信が、水槽内における超音波の乱反射が原因と推測されるため、超音波の反射を抑制する吸音材を水槽内部に設置する等、新たな対策を検討する必要がある。

## 5. 自律航行魚類資源量調査装置（試作機）の実用性の検討

### 5.1. 野外航行結果

第3章で検討した自律航行装置と第4章で検討した超音波装置を統合し、ラジコンボートに搭載させること

によって、自律航行型魚類資源量調査装置の試作機を製作した。また、本試作機について走行性、魚類計測性のそれぞれの観点からその実用性を検証するため、新潟県新発田市荒町地内のファームポンドにおいて航行試験を行った（図5.1、図5.2）。試験は2016年11月19日に行った。なお、ラジコンボートの自律航行については、第3章の結果のとおり航行精度に課題があったため、航行時の船の操作は、RC用送信機（プロポ）を用いて行った。

#### 5.1.1. 実験方法

ラジコンボートは、医療用超音波診断装置（US-304）、魚群探知機（Elite-4X HDI）および映像記録用のノートパソコン（Let's note SX1 CF-SX1GDHYS Panasonic 株式会社製、CPU；Intel Core i5、メモリ；4GB）と防水カメラ（Pentax Optio w90 リコーイメージング株式会社製）を搭載し、ファームポンド内を航行しながら水面下の映像を撮影・記録した。医療用超音波診断装置の出力映像は記録用ソフトウェア（AG デスクトップレコーダー）でパソコンに記録した。魚群探知機は本体に映像を記録する機能がないため、ラジコンボートに固定した防水カメラによって出力画面の映像を撮影することによって記録した。ラジコンボートは、ファームポンドの堆積土砂搬出用のスロープ付近から水深が最大となる中央部まで任意の航路で航行させた。ファームポンド中央部において約10分間の映像を取得した後、ラジコンボートを回収し、映像を確認した。

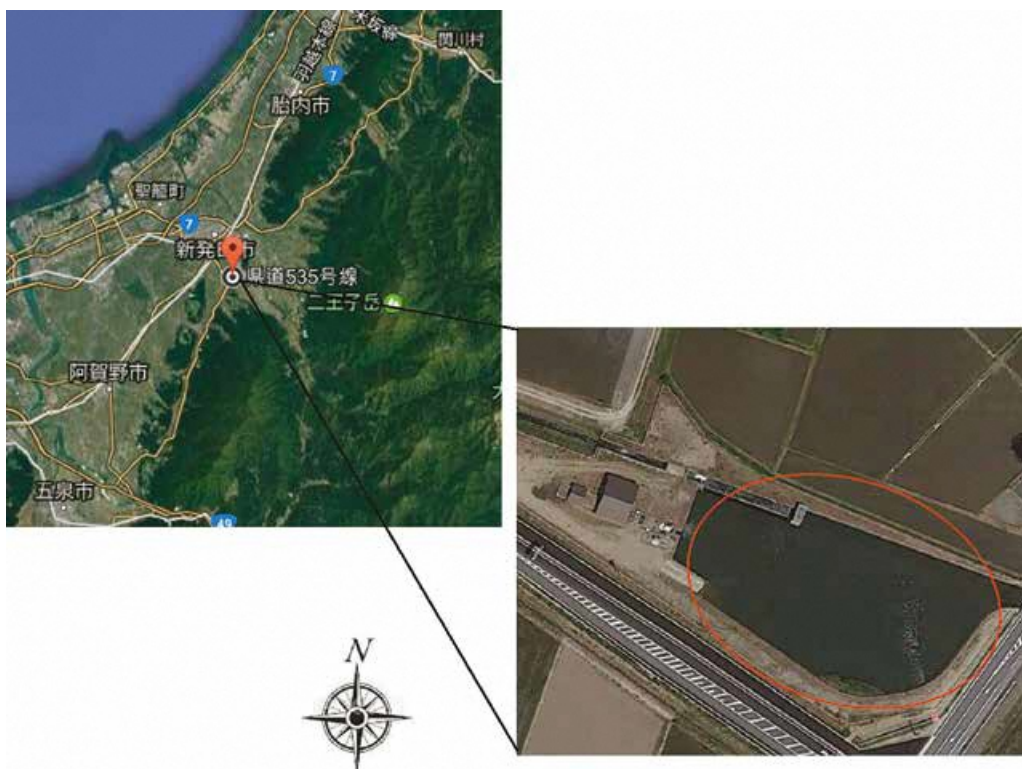


図5.1 新潟県新発田市荒町のファームポンド



図5.2 新発田市荒町のファームポンド

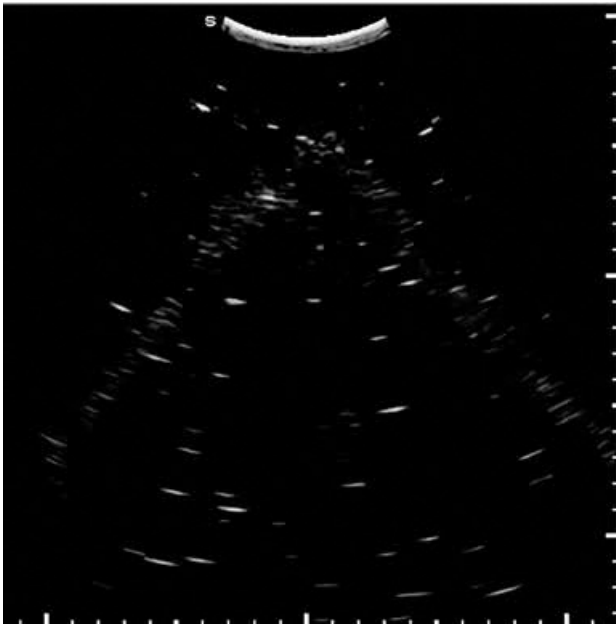


図5.3 魚類資源量調査装置試作機



図5.4 現地試験の様子





ファームポンドの中央部

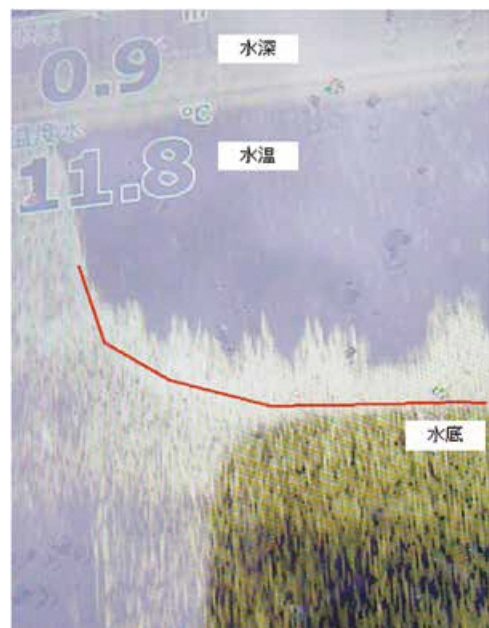


ファームポンドの岸辺付近

図5.5 医療用超音波診断装置の出力画像



ファームポンドの中央部



ファームポンドの岸辺付近

図5.6 魚群探知機画面  
「ファームポンド内の水深の変化が確認できる」

### 5.1.2. 実験結果

試験の結果、ラジコンボートに搭載した医療用超音波診断装置と魚群探知機からファームポンド航行時の記録映像を取得することができた（図 5.5）。しかし、映像を確認した結果、魚影等を確認することはできなかった。この原因は（1）実験時期が冬季であったために、遊泳している魚類の個体数が少なく遭遇がなかったことや（2）医療用超音波診断装置・魚群探知機の表示可能範囲不足の2点が原因と考えられる。そのため、魚類の遊泳が確認できる場所での再実験を行う必要がある。

一方、医療用超音波診断装置では第4章で行った実験水路で得られた映像と比較して、ファームポンドで得られた映像はノイズの発生が減少していた。これは、ファームポンド中央部では岸壁・水底までの距離が実験水路とは異なり、医療用超音波診断装置の表示可能範囲である約20cmよりも大きいため超音波の減衰が生じ、反射音が減少したことが原因と考えられる。一方、魚群探知機はファームポンド岸辺付近と中央部の地形の変化を表示できていた（図 5.6）。

### 5.2. 小括

本章ではラジコンボートに超音波装置を搭載した試作機のファームポンドにおける現地試験について述べた。その結果、現在開発中の機器が水中の超音波映像データを取得できることが明らかになった。しかし、今回の走査ではファームポンド内の魚類の存在を確認できなかった。この原因については以下の2点考えられる。

（1）冬季による魚類の遊泳不足、（2）医療用超音波診断装置・魚群探知機の表示可能範囲の不足。

超音波装置において魚類が確認できなかったことの解決には（1）、（2）の2点を踏まえ、水面下を魚類が確実に遊泳していると把握している場所における試験が今後必要だと思われる。

## 6. 総論

2001年の土地改良法改正によって環境への配慮が農業農村整備事業の要件として新たに追加された。その結果、農業用水路では多くの生物生息環境の維持・改善のための近自然工法や魚道等の構造物の開発・整備が進められている。一方で、建設された構造物の効果を科学的に検証した例は少なく、施設計画において最適設置位置・間隔等、特に生態系ネットワークの確保に関わる検討が不足していることが指摘されている。また、これまでの河川や潟等における生物種および資源量調査では、一般的に網を使用したコドラート内全数捕獲法や電気ショッカーを使用した捕獲法が用いられてきたが、こうした方法は生息環境に甚大な攪乱を与え継続的な反復調査を不可能にするといった課題があった。

本研究では、生物調査における生態系ネットワークの

把握と調査による環境攪乱の低減を可能にする調査手法の開発としてラジコンボートと超音波装置に着目した。これらの利用によってこれまで困難であった河川の連続的縦断的な走査や狭小な水路の走査が低コストで可能となり、かつ非接触での探索によって環境への攪乱が最小限に抑えられる。

### 6.1. 総括

#### 6.1.1. 自律航行装置の航行性能の検討

農学部棟屋上および山古志地区の養鯉池で行った実験の結果から、現在開発中の自律航行システムには（1）速度の制御（2）正確な方位の取得の2つが不足していることが考えられた。この2つの課題の解決には、実際に試作・運用が行われている自律航行ロボットの技術を取り入れることを今後、検討する必要があると思われる。

#### 6.1.2. 超音波装置による魚類計量性能の検討

医療用超音波診断装置と魚群探知機による実験をそれぞれ行った。医療用超音波診断装置による水路実験の結果、カメラ映像と出力映像で確認された魚数の関係には定点観測、移動観測ともに決定係数  $R^2 > 0.9$ 、有意確率  $P < 0.01$  と高い相関間が見られた。また、回帰式の傾きが定点観測、移動観測ともに1に近く、カメラ映像で確認された魚数を医療用超音波診断装置でほぼ全数捕捉できており、このことから、医療用超音波診断装置の魚類の判別性能が高いことが明らかとなった。また、実験領域内の魚類密度と超音波映像の魚数の関係には決定係数  $R^2 > 0.7$  有意確率  $P < 0.01$  という一定以上の相関関係があった。これより、超音波映像から水域内の魚類の生息密度の推定が可能であることが示唆された。一方、領域内への投入個体数の増加に伴い、確認魚数のバラツキの増加が確認された。この問題には画像解析技術を適用することで解決可能であると考えている。医療用超音波診断装置は魚類の高い判別性能と水域内の魚類の生息密度を推定できるという2点から魚類資源量の調査に有効な手段として使用可能であると言える。

魚群探知機の水面以下約50cmまでに発生する発振線の除去を試みる実験の結果、水を満たした水槽の水面から超音波を発信することによりノイズが生じるものの、表示可能範囲の拡張が確認された。また、超音波は水槽の底を透過し、水底までの距離を正しく表示することが明らかとなった。一方、ノイズの増加により魚群探知機から魚影を確認することができなかった。この原因として水槽内からの超音波の発信を行うため、池水面からの発信と比較して近距離での反射が強くなり過ぎたことが考えられる。そのため、今後は水槽内に吸音材を設置し、近距離における反射を弱める検討が必要である。

### 6.1.3. 自律航行型魚類資源量調査装置（試作機）の実用性の検討

新発田市のファームpondでの実験の結果から、現在開発中の機器を組み合わることによって実際に野外での適用可能性が示された。しかし、浮体の安定性やバッテリーの容量、超音波装置の表示可能範囲に不安が残った。これらの課題は船体の大きさや機器の配置場所の再検討および、超音波装置の改良を行うことが今後の課題である。

### 6.2. 今後の課題と展望

本研究では主として、屋内実験下においては医療用超音波診断装置が魚数量把握に有効な手段であることを示した。しかし、野外や透視度が低い場合の実験を行っていないため、今後はこれらの実験を重ね、多様な条件下での医療用超音波診断装置の適用可能性を検討していきたい。

また、魚群探知機については、メコン川で現地調査が行われており（亀山ら、2011）、この調査は水深や川幅が対象とする農業水路と異なるが、同じ超音波技術を使用している。そのため、メコン川で使用された技術の用排水路のような浅水域への応用を試みる事が今後の課題である。

自律航行に関しては、航行制御をGPS機能だけに頼るのではなくカメラ画像による位置確認や推進力（スクリュー回転数）から算出した流速データを使用するなど、複数の装置で航行する機能の検討が今後必要であると考えている。

### 引用文献

青木一郎（1990）音響による魚群探知と可視化，日本ビジュアルライゼーション学会誌，10:37  
福岡有紗・高原輝彦・松本宗弘・兵庫県立農業高校生物部・丑丸敦史・源利文（2016）在来希少種カワバタモロコシの環境DNAによる検出系の確立，日本生態学会誌，66:613-620  
橋本 健二郎・鈴木 洋（1984）超音波診断法の原理と基礎知識，動物の循環，17:2-12  
端憲二（1985）農業水路の魚類保護について，淡水魚11:64-72  
端憲二（1987）魚類の生息を考慮した水路の改良，農業土木学会誌，55:1067-1072  
Hata K（2002）Perspectives for fish protection in Japanese paddy field irrigation systems, Japan Agricultural Research Quarterly 36:211-218  
平松研・西村眞一・清水英良・佐藤成（2010）改修された農業排水路における小型魚の移動について，雨水資源化システム学会誌，15(2):53-59  
広瀬慎一・小幡康晴（2003）近自然水路工法と維持管

理の改善，農業土木学会誌，71(11):51-55  
堀野治彦・中桐貴生・荻野芳彦（2008）環境配慮型水路の魚介類生息および通水機能への影響評価，農業農村工学会論文集，254:77-83  
Hosoya K（1982）Freshwater fish fauna of the Yoshii River, Okayama Prefecture, Bull, Biogeogr, soc, Japan, 37:23-35  
神宮字寛・伊藤智弥・島山欣也・千賀裕太郎（1999）親水性水路に生息する底生無脊椎動物群集と施工方法の評価，農業土木学会誌，67(5):503-509  
亀山哲・野原精一・佐藤達明・藤井良昭（2011）メコン川の流域開発と魚類生息地評価，日本生態学会，58回全国大会  
金本泰洸ポール・山上路生（2015）自律制御AUVの開発とか河川流速計測の自動化に関する研究，京都大学防災研究所年報，58B:410-416  
環境省（編）（2013）改訂・絶滅のおそれのある野生生物—レッドデータブック—4，汽水・淡水魚類  
片野修（1998）水田・農業水路の魚類群集—水辺環境の保全—生物群集の視点から—，江崎保 男・田中哲夫（編），67-79，朝倉書店，東京  
Katano O, Hosoya K, Iguchi K, Yamaguchi M, Aonuma Y, Kitano O（2003）Species diversity and abundance of freshwater fishes in irrigation ditches around rice fields, Environmental Biology of Fishes, 78:37-55  
Koizumi K, Takahara T, Minamoto T, Doi H, Mori A, Watabe T, Takemura T（2015）Preliminary Experiment for Detection Method of Fish Inhabiting Agricultural Drainage Canals Using Environmental DNA. IDRE Journal, 83: IV 7-8  
満尾世志人・大平充・角田裕志・千賀裕太郎（2008）ため池内に生息する魚類の水域ネットワークの利用実態—岩手県のため池を事例として—，環境情報科学論文集，22:185-190  
森淳・渡部恵司・竹村武士・小出水規行・朴明沫（2011）環境配慮手法による農業排水路の底生動物相の違い，農村工学研究所技報，211:97-107  
森淳・渡部恵司・小出水規行・西田一也（2012）流速の多様化がもたらす食物連鎖の生産者の生物多様性，農村工学研究所技報，212:157-165  
森淳・渡部恵司・小出水規行・竹村武士（2016）農業水路に設置した粗石付き斜路式魚道の効果，農業農村工学会誌，84(9):787-790  
守山拓弥・藤咲雅明・水谷正一・後藤章（2006）新設された魚道における魚類の遡上が上流の農業用小河川の魚類相におよぼす影響，農業土木学会論文集，245:805-806  
守山拓弥・藤咲雅明・水谷正一・後藤章（2008）農業

- 用小河川，農業用水路における河川間に形成された水域ネットワークにおけるウグイの移動－栃木西鬼怒川地区における事例－，農業農村工学会論文集，254:1-10
- 向井章恵・田中良和・島武男・樽屋啓之・中達雄（2006）環境配慮型水路工法における水路床変動の実験，農村工学研究所技報，204:273-280
- 長利洋・奥島修二（2003）生態系に配慮した圃場整備技術研究の現状と展開方向，農業土木学会誌 71（11）:981-984
- 西田一也・藤井千晴・皆川明子・千賀裕太郎（2006）一時的水域で繁殖する魚類の移動・分散範囲に関する研究－東京都日野市の向島用水・国立市の府中用水を事例として－，農業土木学会論集，244:151-163
- 農林水産省農村振興局整備部設計課（2001）水田生態系の保全に視点を置いた整備技術の解説書
- 斉藤憲治・片野修・小泉顕雄（1988）淡水魚の水田周辺における一時的水域への侵入と産卵，日本生態学会誌，38:35-47
- 佐藤太郎・東淳樹（2004）農業用小河川における生態系に配慮した排水路改修が魚類相と生息環境に及ぼす影響，野生生物保護，9(1):63-76
- 佐藤太郎・佐藤学・稲垣雅則・佐藤武信・安実千恵・土田一也・三沢眞一（2008）コルゲート管を用いた水田魚道の設置条件および水田の水管理とドジョウの遡上との関係，農村計画学会誌，26(4):433-440
- 佐藤太郎（2014）アンケート調査による道府県営土地改良事業における生態系配慮の実態について，環境情報科学学術研究論文集，28:131-136
- 田谷哲也（2006）生態系に配慮した農業水路用「魚巢柵」の開発，農業土木学会誌，74(10): 927-928
- 淡水魚保全のための検討会（2016）“二次的自然を主な生息環境とする淡水魚保全のための提言－みんなでまもり，つくり，ささえ，恵を得る～人と淡水魚がにぎわう豊かな環境－”，環境省．[www.env.go.jp/nature/kisho/proposal/tansuigyo\\_honbun.pdf](http://www.env.go.jp/nature/kisho/proposal/tansuigyo_honbun.pdf)，2016年12月24日参照
- 上野正司（1985）漁業に利用されている水中音響機器，騒音制御，9(2):25-32
- 渡部恵司・森淳・小出水規行・竹村武士（2015）農業水路の生態配慮施設における魚類相の多様性評価，農村工学研究所技報，217:29-37
- 山上路生・金本泰洸ポール・戸田圭一（2015）河川流速の自動計測を目標とする自律移動浮体ロボットの試作開発，水工学論文集，71(4):841-846