

低コストで高精度な魚数自動計数を行う
魚カウンターの研究

近藤 康行

目次

第1編 序論.....	1
第1章 魚カウンターが日本で必要とされる背景	1
第1節 日本における従来の遡上量調査手法の問題点	1
第2節 欧米で開発された魚カウンター	5
第3節 魚カウンターを日本で使用するあたっての課題	10
第2章 本論文の構成.....	13
第2編 魚カウンターの製作と日本の魚道や小河川での利用へ向けたセンサー部の形状、計測条件の検討.....	15
第1章 魚カウンターのセンサー部の設計・製作	15
第2章 日本の魚道や小河川などの小型水路での計数に向けたセンサー部の形状、計測条件の検討	18
第1節 実験目的	18
第2節 実験方法	18
(1) センサー部の作成，データ記録方法と静水実験	19
(2) 流水状態での計測.....	21
第3節 結果と考察.....	22
(1) 静水状態での実験.....	22
a) 各電極に共通する傾向について	22
b) 電極の形状により異なる傾向について	22
c) 半周期，電極間隔，遊泳速度の関係について	25
(2) 流水状態での計測.....	25
(3) センサー部電極の形状，計数条件と通過魚の計数性能の関係について.....	27
第4節 まとめ.....	28
第3編 大型魚の計数を目的とした魚カウンターの開発.....	30
第1章 既設魚道での大型魚の計数試験	30
第1節 実験目的	30
第2節 実験方法	31
(1) 調査地と調査期間.....	31
(2) センサー部の構築.....	31
(3) データの解析方法について	36
第3節 結果.....	37
(1) 計測データについて	37
(2) 魚種・体長と振幅の関係について	45
(3) センサー部の流況，センサー上での魚の挙動について	45
第4節 考察.....	46
(1) 計数精度について.....	46
(2) 計数精度を低下させた要因，低下させる可能性のある要因とそれらの対策につい	

て.....	48
a) サケの飛び越え遡上について.....	48
b) サケの通過によるパルス波の定義について.....	48
c) 不定期に発生するノイズについて.....	49
(3) センサー部の構築方法について.....	50
(4) トラップ調査, ビデオカメラ(目視)調査と魚カウンターを用いた調査の調査コ ストの比較.....	51
第5節 まとめ.....	51
第2章 小河川での計数試験.....	54
第1節 実験目的.....	54
第2節 実験方法.....	55
(1)調査地, 調査期間, 調査方法.....	55
(2)プラットフォームの作成・設置とデータ取得方法.....	57
第3節 結果と考察.....	63
(1)魚の通過形態と記録されたパルス波の波形について.....	63
(2)計数精度について.....	66
(3)センサー部の諸元が計数精度に与える影響.....	68
(4)計数精度を上げるための対策.....	70
(5)魚カウンターセンサー部プラットフォームの設置方法.....	75
第4節 まとめ.....	77
第4編 小型魚の計数を目的とした魚カウンターの開発.....	79
第1章 室内実験による小型魚用魚カウンターセンサー部の検討.....	79
第1節 実験目的.....	79
第2節 実験の概要および結果.....	81
(1)供試体にソーセージを用いた場合とワカサギを用いた場合のパルス波の振幅の比 較.....	81
(2)ユニット型魚カウンターのユニットを構成するカバーの長さや電極の素材の検討	84
(a)カバー(延長分)の長さの検討.....	84
(b)電極の材質の違いが相当S/N比に与える影響.....	84
(3)小型魚を計数可能なユニット型センサーの諸元の検討.....	85
第3節 まとめ.....	88
第2章 既設魚道での小型魚の計数試験.....	89
第1節 実験目的.....	89
第2節 実験方法.....	89
(1)実験1 実験場所と実験日時.....	89
(2)センサー部の設置にあたり工夫した事項.....	90
(3)データの解析方法について.....	94
第3節 結果と考察.....	97
(1)計測データについて.....	97

(2)カウント率 CR_{PM} について	98
(3) ノイズ A 発生時とノイズ B 発生時のカウント率 CR_{PM} の比較.....	100
(4)不定期に発生するノイズについて	102
a)魚の通常後に見られた波形の乱れについて	102
b)不定期に現れる波形の乱れについて	102
c)魚の非通過時に現れる波形の乱れについて	103
d)魚の非通過時に現れるパルス波のような波形について.....	103
e)波形が乱れる原因について.....	105
(5)補正式を用いたカウント率向上の検証.....	105
第 4 節 まとめ.....	108
第 3 章 小型魚計数用魚カウンターのデータ処理方法の開発	110
第 1 節 実験目的	110
第 2 節 実験に使用するデータ	110
第 3 節 フィルター処理による S/N 比の向上.....	111
(1)フィルターの設計	111
(2)フィルターの効果の検証	112
第 4 節 微分処理後の波形からパルス波を計数する方法の検討	115
(1) 微分係数算出の際の Δt と下に凸な波形を検出する閾値が CA に及ぼす影響..	117
(2) 微分波形からパルス波を計数する方法と従来の方法の計数精度の比較.....	120
第 5 節 微分波形からパルス波を計数する方法の課題.....	121
第 6 節 まとめ.....	122
第 5 編 結論.....	124
第 1 章 各編で得られた成果.....	124
第 2 章 今後の課題	128
引用文献	132
謝辞	138

第1編 序論

第1章 魚カウンターが日本で必要とされる背景

第1節 日本における従来の遡上量調査手法の問題点

砂防堰堤や頭首工のように河川を横断する人工構造物は河川を分断し、魚類などの移動を阻害するため、河川生態系に悪影響を及ぼすといわれている（近藤・権田，2008）。しかし、砂防堰堤や頭首工等は、治水や利水、土砂災害防止などを目的に設置されており、魚類の移動を阻害しないようにするという理由のみでこれらの施設を取り除くのは困難である。そのため、近年、砂防堰堤や頭首工には、魚類の遡上・降下を補助する手段として魚道が設置されるようになった。

魚道は、魚類が支障なく往来できる状態にあることが理想であり、魚道設置後には遡上数・降下数の調査等の利用実態調査を継続的に実施し、魚道の機能を検証する必要がある。また近年、アユやサケなどの水産的価値の高い魚類については、魚道を遡上した数が、水産業の水産資源の指標や環境教育の一環として用いられており、これらの魚種の遡上数を計数し公表することには、社会的な意義がある（例えば、水資源機構利根導水管理所，2015；水資源機構長良川河口堰管理所，2015）。

例えば長良川河口堰では、河口堰に設置された各種魚道の機能の検証及び、河口堰の運用に伴う回遊性魚類等への影響を把握することを目的として、魚道部で1995～99年の間の5年間、各年4～5月を中心に概ね3日ごとにトラップを用いた生物採捕調査が行われている（延べ91回，年平均18回）。その結果、右岸側のせせらぎ魚道は、他の魚道よりも多くの魚類に利用され、魚類全般に有効であることが統計的に示されている（小出水，2008）。また、遡上量調査を効率化するために、長良川中下流における稚鮎の遡上特性と遡上量調査の効率化に関して考察が行われ、観測時間による遡上数の推定精度や遡上量調査の代表

魚道の選定について検討が行われている（笹ら，2005）．これらの調査以外にもアユや様々な魚類等への遡上量調査が実施されている（和田ら，2003；和田ら，2004；竹門，2000；新村，2000）．

利根大堰では，魚道の機能の検証とサケ，アユの遡上量把握を目的に，1983年からトラップを用いたサケの遡上量調査が，1990年から目視によるアユの遡上量調査が行われている（森口，1990；森口，1991；近藤・権田，2012）．サケ，アユともに調査期間はそれぞれの遡上時期を網羅できるように設定されており，調査より得られた経年遡上数の変化などは管理機関のホームページで公表されている（水資源機構利根導水管理所，2015）．例えば利根大堰3号魚道では，魚道入口が堰から下流に突出しているために魚が入り口を見つけにくい構造であり，魚道に入れない魚が堰直下流で滞留していることが多かったことが確認されていた．そのため，1995~1997年にかけて改修工事が行われ，下流部に突出している魚道の入り口を可能な限り堰に近づける構造に改修すると同時に呼び水路を設置し，入り口を見つけやすくした．また，魚道内部についても水面変動が生じにくい形式に改良された（羽田野，2012）．

長良川河口堰や利根大堰の魚道以外にも，魚道の機能検証やモニタリング，利用実態調査等が行われている例はあるが（安田ら，2001；安田ら，2003；安田ら，2005a；安田ら，2005b；安田ら，2006；泉ら，2000；泉ら，2003；神野ら，2004；柳瀬，2005），長良川河口堰や利根大堰等の一部の魚道を除いては，調査は数日から数週間など短期間で行われているケースが多い．調査が短期間の場合，調査期間中に魚道が魚類にとって良好な状態であったとしても，その魚道が長期的に良好な状態に保たれていることが保証されるわけではない．そのため，これまでに実施された魚道の利用実態調査は，データの蓄積が不十分で対象とした魚道の問題が十分に把握されていない可能性があると思われる（高橋ら，

2000 ; 森, 1998 ; 高崎ら, 1999). 上述の問題を解決するためには, 魚道の利用実態を長期間調査することが必要だと言える.

これまで長期間の調査があまり実行されなかった理由は, 従来の利用実態調査法には以下に述べるような調査コストの問題があるためと思われる.

従来, 国内で実施される魚道の利用実態調査には主に魚類捕獲用トラップ, 目視による調査法, 及びビデオカメラを用いた調査法が用いられてきた (ダム水源地環境整備センター, 1998). それぞれの調査法における利点, 問題点を表 1-1-1 に示す. この表より, トラップ, ビデオカメラ, 目視による調査のいずれの調査法も, 魚数の計数は人に頼っており, 調査コストに占める人件費の割合が大きいことがわかる.

表 1-1-1 各調査方法の利点と問題点

	トラップ	ビデオカメラ	目視
利点	魚類を直接捕獲するため, 精度が高い. 魚種の判定が可能である.	魚類の遡上の妨げにならない. 魚種の判別ができる. 最近では作業員のコストダウンのために自動で画像解析を行う技術も開発されている(岩見, 2000; 吉川, 2005).	魚類の遡上の妨げにならない. 調査結果を即時集計できる.
問題点	トラップに入った魚類に肉体的なストレスを与える. 人力でトラップを点検するため, 調査コストに占める人件費の割合が大きく, 長期調査の場合には作業員のコストが大きくかかる.	魚影を計数するのに映像の撮影時間と同程度の時間がかかるため, 長期調査の場合には作業員のコストが大きくかかる. 自動解析の場合でも, 夜間や濁水時の調査には向いておらず, 水面の乱反射により誤計測を引き起こす場合もあるなど, 計測精度に課題がある.	落葉期や濁水時に不向き. 魚種の判定が難しい. 調査時には常に調査員が魚道に張り付く必要があるため, 調査コストに占める人件費の割合が大きく, 長期調査の場合には作業員のコストが大きくかかる.

最近では, 魚の動態を把握するために, 魚体に小型の電波発信機や超音波発信機を装着し行動を追尾するバイオテレメトリーという方法が用いられる場合がある (上田, 2004 ; 傳田ら, 2005 ; 國宗, 2008 ; 牧口ら, 2008). バイオテレメトリーを用いた方法では, 個体

識別や対象魚の行動が記録できるメリットがあり、主にサケ科魚類の回遊経路の調査や、産卵行動の追跡調査などに用いられている例が多い。しかし、発信機を装着させるため魚体を一度捕獲する必要があり、手間がかかるだけでなく、発信機の値段が高価なため、一般的な魚道の利用実態調査法として用いるのは難しい。

北米で良く行われている方法に、PIT-tag を用いた方法がある（佐藤ら，2006）。PIT-tag を用いた方法には、個体識別が可能というメリットがあり、長期間河川で生活し、移動する魚の行動生態などを明らかにする用途に用いられている。近年日本でも、PIT-tag を用いて魚道の利用実態調査が実施されている（例えば、林田ら，2014）。しかし、この方法により魚の行動生態を明らかにするためには、大量の魚に PIT-tag を装着して放流する必要があり手間がかかること、移動を記録するためにいくつかの場所に検知器を設置する必要があること、Tag の装着されていない魚はカウントされないため、移動の絶対数を把握するためには Tag 装着魚の混入率を調べる必要があることなど、この方法にもデメリットがある。

この他に超音波を用いた調査方法（ダム水源地環境整備センター，1998）も提案されているが、まだ実用段階には至っていない。

以上のように、日本では魚道を長期間にわたって低コストで調査を行うのに適した手法がないのが現状である。

第2節 欧米で開発された魚カウンター

サケは河川で孵化した後海へ下り生育し、数年後産卵のためにまた河川に遡上する遡河性魚類である。往来、欧州でサケは重要な水産資源であり、水力発電施設などの河川構造物が建設され始めると、河川構造物のサケの遡上への影響や遡上数について調査・研究されてきた。欧米でのサケの遡上数調査は目視や捕獲など人力に頼るコストの高い方法で行われていたが、計数コスト削減を目的に、サケがセンサー上を通過する際に発生する河川水の電気抵抗の変化からサケの遡上数を自動で計数する electrical resistivity fish counter（以下電気抵抗の変化から魚を計数する装置の総称を魚カウンターとする）が開発された（Lethlean, 1953）。

魚カウンターの本体は、魚を感知するセンサー部と、データを記録・解析し魚数をカウントする解析部からなる。魚カウンターのセンサー部の基本回路は、等しい抵抗値を持つ2つの抵抗(R1,R2)と等間隔に水中に沈めた三本の電極(D1,D2,D3)で構成される。電極 D1 と D2 の間,D2 と D3 の間の河川水の抵抗を R3, R4 とすると、この回路は R1~R4 の4つの抵抗で構成される Wheatstone Bridge(以下ブリッジ回路とする)と見なすことができる(図 1-1-1)。この回路の C-D 間に電圧をかけ、A-B 間の電位差を計測する。電極間に魚が存在しない場合、 $R3=R4$ であり、 $R1/R3=R2/R4$ となるため A-B 間の電位差は 0 である。しかし、魚が電極間に入ると、魚体の電気抵抗は河川水に比べて小さいため、電極間の抵抗が変化し、A-B 間の電位差が変化する。魚が図 1-1-1 のように $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e$ と移動した時、A-B 間の電位差は図 1-1-2 のようにパルス波状に変化する(以下パルス波とする)。一方、魚が $e \rightarrow d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ と逆方向に移動した場合にはパルス波が左右反転した形状で出力される。回路から出力されるパルス波の個数を波形別に計数することで、魚の通過方向別の通過数を求めるのがこの魚カウンターの仕組みである。魚カウンターセンサー部の電極の形状には、

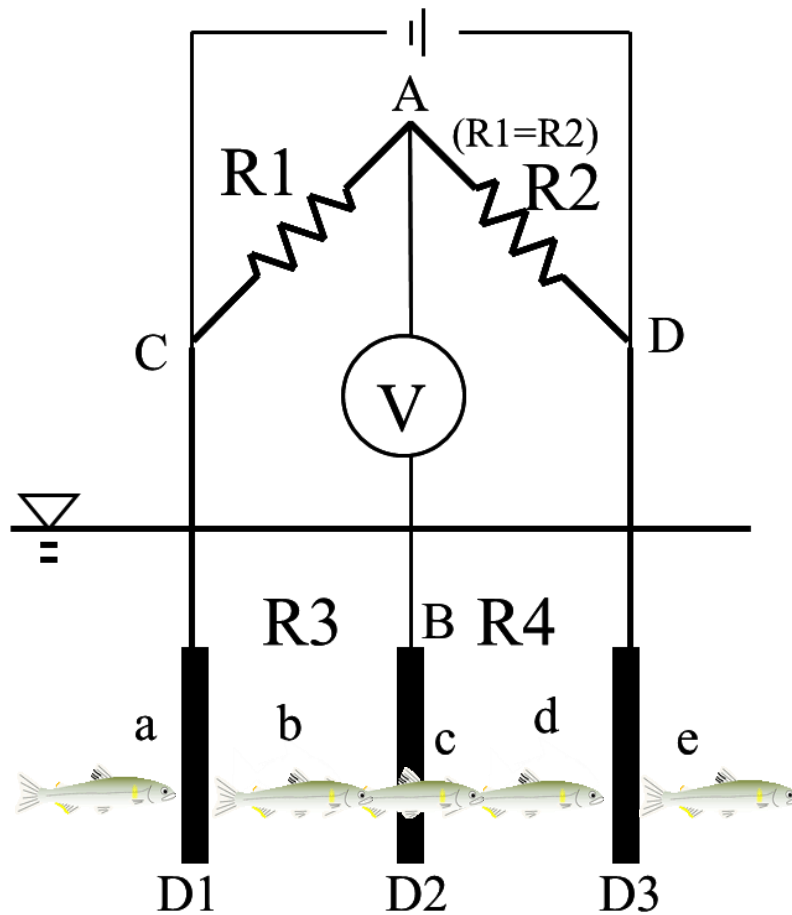


図 1-1-1 魚カウンターのセンサー回路の主要部の Wheatstone bridge 回路

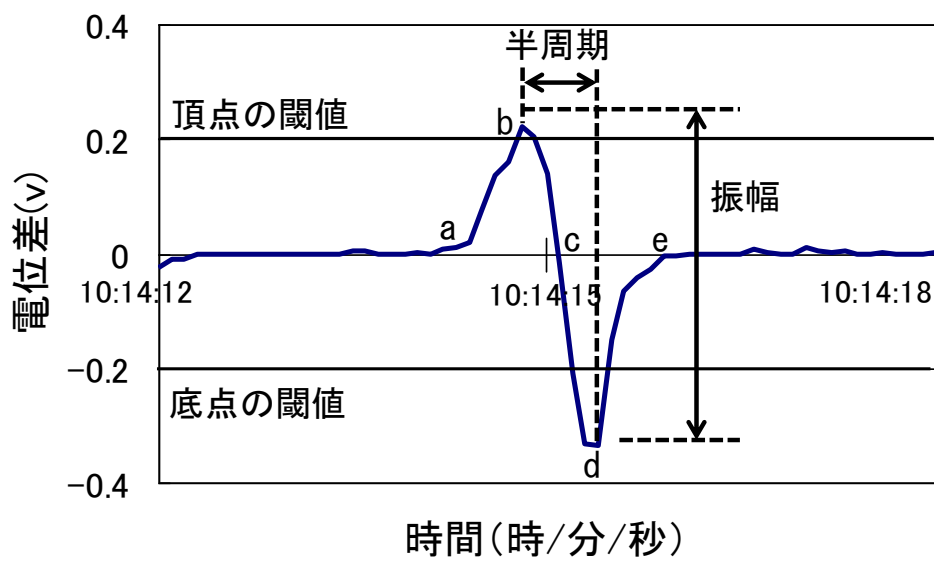


図 1-1-2 魚が通過した際に回路から出力されるパルス波形

平棒型，コの字型，枠型の 3 種類がある（図 1-1-3）。

現在，魚カウンターは欧米で Atlantic salmon の現存量や遡上数を計数する目的で，主に堰などの通水部や開水路に一体構造物として組み込まれるように構築されている（Simpson, 1978 ; Beaumont et al., 1986 ; 図 1-1-4, 図 1-1-5）. 遡上魚については 90%以上，降下魚については 60%以上という高い計数精度の実績を持つ（Simpson, 1978 ; Smith et al., 1986）. 計測データはロガーに記録されるため，メンテナンス，データ回収以外に現場へ出向く必要が無い. また記録されたデータを自動解析するソフトウェアを利用することにより，計数に掛かる時間と労力を短縮化できる. そのため，魚カウンターを魚数調査に用いた場合，調査コストを低く抑えることができるという特徴がある.

既往の欧米での研究成果により明らかにされている魚カウンターの設置箇所や設置方法，対象魚，計数精度に関わる知見を表 1-1-2 に示す.

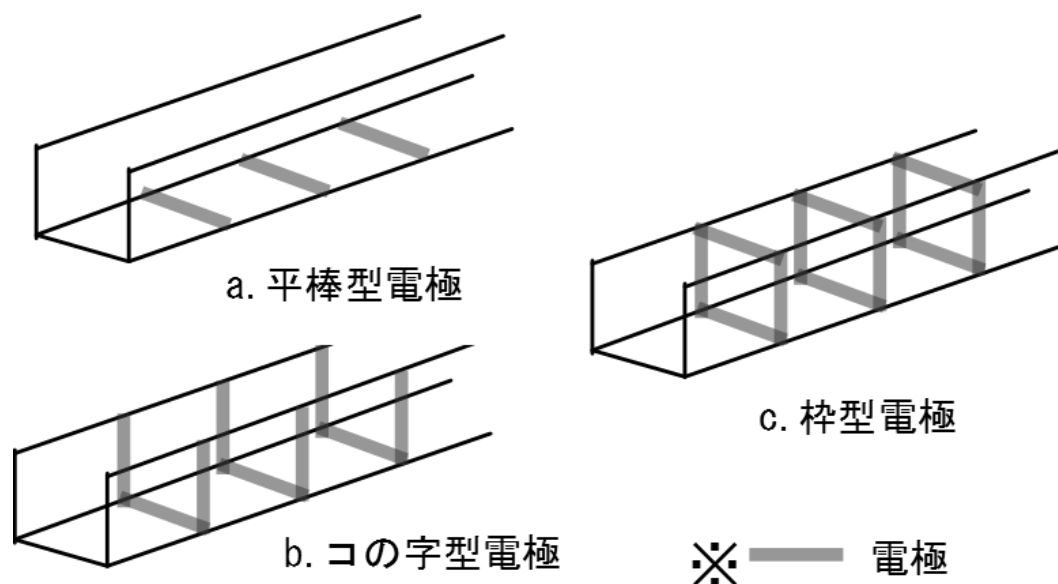


図 1-1-3 魚カウンターセンサー部の電極の形状



図 1-1-4 イギリスでの魚カウンター設置事例

(白いパネルが魚カウンターセンサー部. 各パネルに3本の電極が設置されている)



図 1-1-5 カナダでの魚カウンター設置事例

(魚カウンターのセンサー部上を魚が通過している)

表 1-1-2 魚カウンターに関する従来の見

(Lethlean, 1953 ; Smith et al., 1996 ; McGrath, 1975 ; Bussell, 1972 ; Dunkley, 1989)

対象魚について	<ul style="list-style-type: none"> ・対象魚:体長50cm以上のサケ(Atlantic salmon) ・魚の体長が大きい方ほど計測精度が高くなる.
センサー部に関して	<ul style="list-style-type: none"> ・センサー部は主に幅数m以上の堰や開水路の通水部に一体構造物として組み込まれている. 既設構造物に後付けで設置されている例もあるが, 設置方法についての情報が著しく不足している. ・魚体が電極に近くなるほど精度が高くなる. ・遡上に関しては計測精度90%, 降下に関しては計測精度60%と報告されている. 遡上魚は流速の速くなっている堰通水部やクランプウィアーに設置されているセンサー部表面を一気に駆け上るように遡上するため遊泳高度が低くなることで魚体と電極の距離が近くなり精度が高くなるが, 降下の際には堰表面から水面付近など幅広い水深帯を降下していくことで遊泳高度が高くなり, その結果, 電極と魚体の距離が大きくなることで精度が落ちる ・センサー上の水深が大きくなると精度が低下する. ・水路幅(センサーの幅)が小さいほど振幅が大きくなる. ・電圧が大きくなるとパルス波の振幅が大きくなる. ・流速は速い方が良い.
精度・計測データに関して	<ul style="list-style-type: none"> ・空気の混入はデータを乱す可能性がある. ・河川の水溶性物質は計測データに微々たる影響を与えるが, 魚の計数精度に大きな影響は及ぼさない. ・誤カウントの他の原因としては, 水草や雪など魚と異なるものが流れてくることで発生することが報告されている. ・サケが個々に遡上・降下を行うと計数精度は高くなるが, 複数魚が同時に遡上・降下をすると誤カウントが発生し, 精度が低下する.
魚道以外の計測事例	<ul style="list-style-type: none"> ・小河川の河床の上に電極を設置したプラスチック版の土台で作成されたセンサー部を設置した計測で, 遡上魚90%程度, 降下魚60%程度の計測精度であったとの計測事例がある.

第3節 魚カウンターを日本で使用するあたっの課題

第2節で紹介した魚カウンターは、従来の調査方法よりも低コストで、魚類への負荷の小さな魚道の利用実態調査を可能にする方法であると考えられる。また従来、サケやアユなどの水産資源としての価値の高い内水面の魚類の生息数や河川内の移動調査等についても、魚道の利用実態調査と同様に主に人力に頼った調査方法により行われおり（田子，2000；今井ら，2005；横山，2010；宮腰ら，2007；久保田ら，2001；岸野，2004；中村ら，2004；山本ら，2001；酒井，2010；石崎ら，2010），魚カウンターは、内水面における魚類の移動を定量的に把握する方法としても有用であると考えられる。

この魚カウンターを日本で利用する場合、以下に述べる4つの課題を解決する必要がある。

課題1 魚カウンターの設計・製作および日本の魚道等での使用を想定した場合の魚カウンターの基本的な性能の把握

魚カウンターは日本では使用されておらず、国内では販売されていない。また、欧米で使用されている魚カウンターについては、計数原理は公開されているものの、センサー部回路の設計方法等についての詳細な情報は入手が困難である。そのため、魚カウンターを日本で使用する場合、センサー回路やセンサー電極といった魚カウンターの主要パーツを自作する必要がある。また、自作したパーツを組み合わせて構築した魚カウンターを用いて計測をおこなった場合に、センサー部の構造や計数条件が計測結果に与える影響など、魚カウンターの基本的な特性について把握する必要がある。

欧米で魚カウンターのセンサー部が設置されている箇所は幅数 m 以上の堰や開水路の通水部である。一方、日本で魚カウンターを設置する箇所としては、既設の魚道や自然河床が候補に挙げられるが、日本の一般的な階段式魚道は越流部が幅 $50\text{cm}\sim 1\text{m}$ と欧米と比較し

て小さい。さらに、欧米では体長 50cm 以上のサケが計数対象になっているのに対し、日本ではサケ以外にも体長 20cm 程度のイワナやヤマメ、ウグイ等や、体長 10cm 程度のアユなども計数の対象となり、対象とする魚の大きさが大きく異なる。このように、欧米と日本ではセンサー部を設置する箇所大きさと対象とする魚の大きさが大きく異なり、欧米で用いられている魚カウンターのセンサー部の構造や印加電圧等の計測条件が日本の魚道等で、筆者が自作したカウンターを用いて計測する際に適しているかどうか不明である。

以上のことから、魚カウンターを用いて、日本の魚道での魚数計数を行う場合には、魚カウンターのセンサー回路とセンサー部を製作し、日本での対象魚が計数出来るセンサー部の構造や印加電圧等の計測条件について製作したカウンターを用いて検討する必要がある。

課題 2 魚カウンターセンサー部の構築方法の研究

欧米ではセンサー部が比較的流れが一定で単調な堰や開水路の通水部に一体構造物として組み込まれて設置されている事例（図 1-1-4, 図 1-1-5）が多いのに対し、日本ではセンサー部を既設の魚道に後付で構築する必要がある。さらに、欧米での魚カウンターの設置場所は比較的流れが一定で単調であるのに対し、日本の魚道の設置場所の候補として想定されている階段式魚道は、越流部とプール部が連続していて、構造と流れが複雑である。階段式魚道のような魚道に、十分な計数精度を保ち、かつ魚道の機能を損なわない形状でセンサー部を後付で構築するような技術的情報や研究事例はない。

つまり、魚カウンターを用いて、日本の魚道・河川での魚数計数を行う場合には、十分な計数精度を保ち、かつ魚道の機能を損なわない形状での魚カウンターの設置方法について、一から研究開発する必要がある。

課題3 欧米では研究事例の無い、小型魚計数に適したセンサー部の研究開発

日本の魚道を利用する魚には、体長 50cm 以上のサケ、マス等の大型魚の他に体長 20cm 程度のイワナ、ヤマメ、体長 10cm 程度のアユ等の小型魚などもある。しかし、欧米では小型魚の計数に関する魚カウンターの研究事例がない。体長が 50cm を超えるサケ類などの大型魚のみを対象に開発されてきた魚カウンターでは、課題 1 を解決したとしても体長が 10cm 程度の小型魚は計数出来ない可能性が高い。小型魚を計数するためには、小型魚が計数可能なセンサー部と、既設の魚道への設置方法について、一から研究開発を行う必要がある。

課題4 小型魚自動計数のためのデータ処理方法の開発

魚カウンターを用いた魚数の自動計数のためには、データを自動的に解析するプログラムが必要である。課題3を解決しても解析が自動化されないと大幅なコストダウンにはつながらない。小型魚の場合、大型魚と比べて魚の通過により発生するパルス波の振幅が小さく、パルス波が計測ノイズに埋もれてしまう可能性があるため、大型魚用の計数の場合と同様なデータ処理を行っても、魚数を計数できない可能性が高い。解析プログラムによりパルス波を自動計数できるようにするためには、ノイズに対してパルス波を相対的に大きくすると同時に、計数精度が向上するパルス波の検出方法及びデータ処理方法を開発する必要がある。

第2章 本論文の構成

本論文は、魚カウンターを日本の魚道・河川で実用化するために第1章第3節で述べた4つの課題について解決を試みるとともに、実用化するための総合的検討を行うことを目的とする。本論文の構成を図1-2-1に示す。

課題1の解決を目的に、第2編では、魚カウンターのセンサー部を製作する。日本の砂防堰堤や頭首工に設置される魚道のように、欧米でサケの計数が行われている水路よりも小型の水路を想定し、小型の魚を計数対象とした室内実験を実施し、製作した魚カウンターの動作確認を行うとともに、小型の水路で魚カウンターを使用するためのセンサー部の電極の形状、電極間隔、印加電圧等の計測条件を検討する。

課題2の解決を目的に、第2編の結果を受けて第3編第1章では、既設の魚道にセンサー部を後付けで構築し、産卵期に魚道を遡上する大型魚（サケ）を計数し、計数精度やセンサー部の設置方法の検証、調査コストについて考察する。さらに第3編第2章では、小河川の一般の河川区間の河床や、実河川の河床形を模倣した多自然型魚道の河床に魚カウンターを設置し、河川を移動（遡上または降下）するサケやサクラマス等の計数を行う。

課題3の解決を目的に、第2編の結果を受けて第4編第1章では、体長10cm程度の魚を計数することを目的としたセンサー部の電極の形状、電極間隔等の条件を明らかにして小型魚計数用のセンサーユニットを開発する。さらに第4編第2章では、開発されたセンサーユニットを設置可能なプラットフォームを考案し、既設の魚道に後付けで構築し魚道を遡上する小型魚（アユ）を計数し、計数精度やセンサーユニットの設置方法の検証を行う。

課題4の解決を目的に、第4編第3章では、第2章で得られたデータを用いて、計測ノイズと小型魚の通過によるパルス波の違いを解析し、ノイズに対してパルス波を相対的に

大きくすると同時に、計数精度が向上するパルス波の検出方法及びデータ処理方法を検討する。

第5編では、第2編から第4編の結果を整理し、今後の課題について述べる。

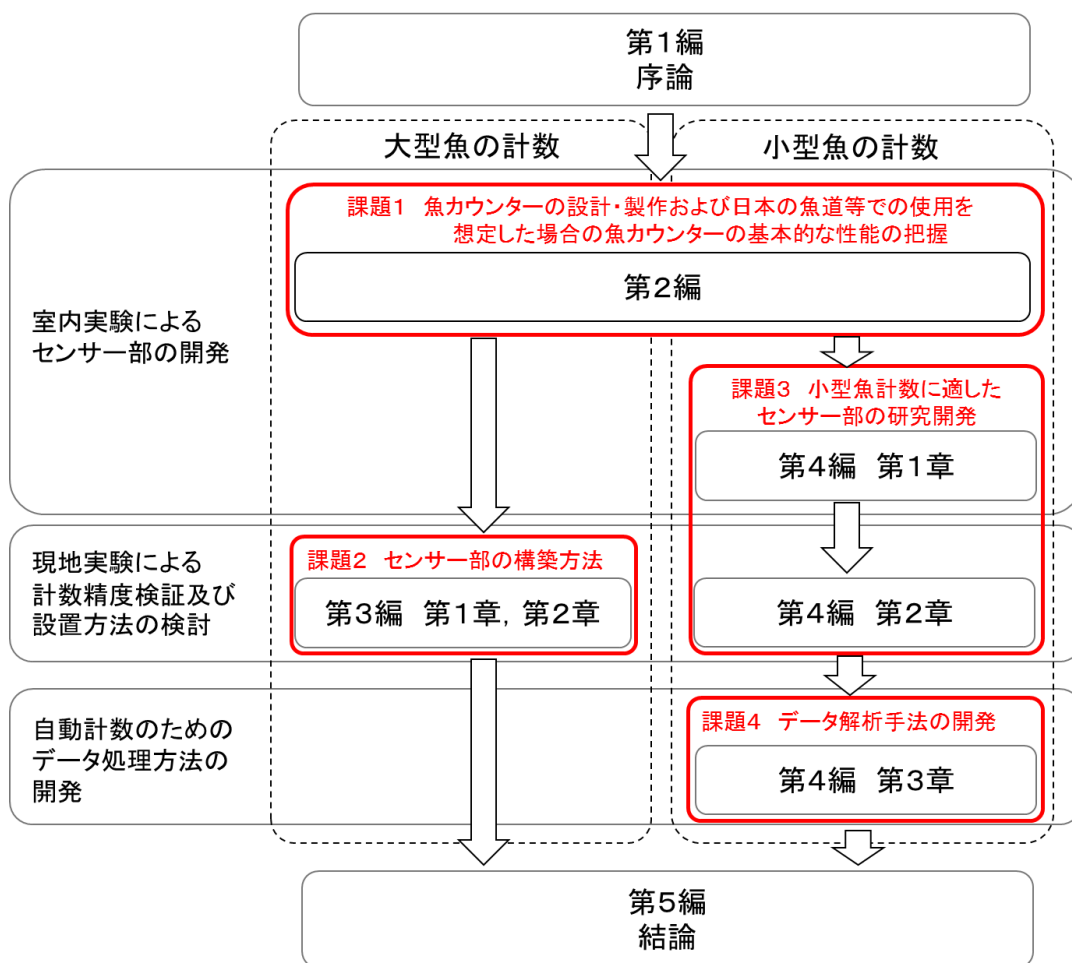


図 1-2-1 論文の構成

第2編 魚カウンターの製作と日本の魚道や小河川での利用へ向けたセンサー部の形状，計測条件の検討

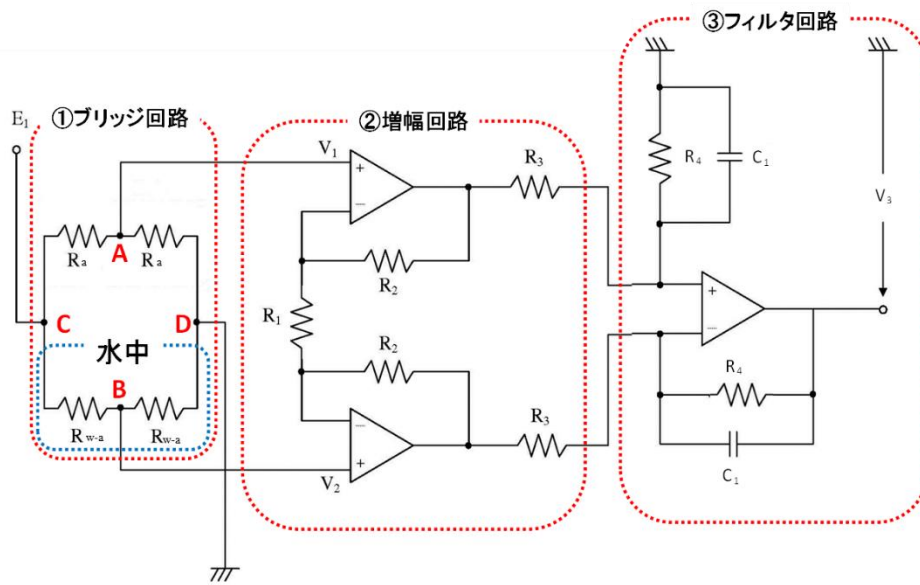
第1章 魚カウンターのセンサー部の設計・製作

Lethlean (1953) の論文を参考に，魚カウンターのセンサー部のセンサー回路を設計・作成した．魚カウンターのセンサー部は，①ブリッジ回路，②増幅回路，③フィルター回路で構成される (図 2-1-1)．

ブリッジ回路は，河床に等間隔に設置する3本の電極 D1,D2,D3 と2つの電気抵抗 R1,R2 からなる．電極 D1,D2,D3 は回路の C,B,D にリード線で接続される．電極 D1 と D2 の間の河川水が抵抗 R3，D2 と D3 の間の河川水が抵抗 R4 として機能する．回路の CD 間に電池又は安定化電源 (株式会社エー・アンド・ディ社製：直流安定化電源 AD-8735A) により印圧する．増幅回路は AB 間の電位差を増幅する．増幅率は2~7倍の間で可変とした．フィルター回路は，増幅された AB 間の電位差に含まれるノイズの高周波成分を除去する．カットオフ周波数は約 180Hz とした．

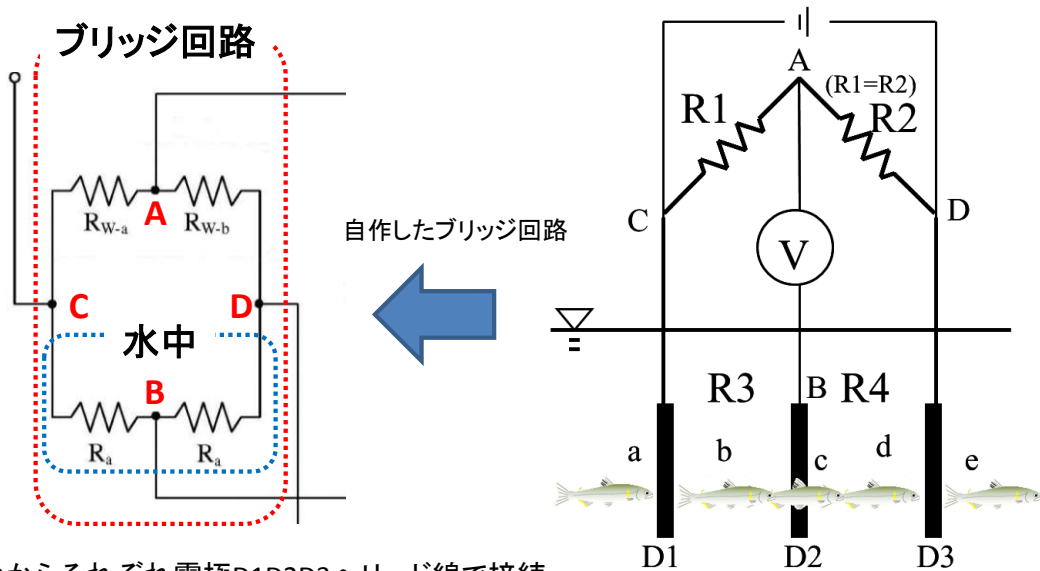
センサー回路から出力されるアナログ電圧信号を AD 変換器によりデジタル化し，PC に取得・記録するようにした．AD 変換器には，PICO Technology 社製オシロスコープ PICOSCOPE2202 (垂直軸分解能 8 bits) を，サンプリングレート 0.1sec，入力レンジ-5V~+5V に設定して使用した (図 2-1-2)．

AD 変換器の出力するデータを PC に取得する際には，PICO Technology 社製 PicoLog Data logging software を利用した．記録したデータは CSV 形式のファイルにエクスポートし，Excel 等のグラフ機能を用いて図化し，目視により計測データを確認した．魚カウンターの全体の構成を図 2-1-2 に示す．



ブリッジ回路からの出力電圧	$(V_1 - V_2) = \left(\frac{R_{w-b}}{R_{w-a} + R_{w-b}} \right) E_1 - \frac{1}{2} E_1$
差動増幅部での増幅率	$V_3 = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (V_2 - V_1)$
フィルタ部でのカットオフ周波数	$f_c \approx \frac{1}{2\pi C_1 R_4}$
参考定数 (倍率設定: $\times 2 \sim 7$)	R1=1~6kΩ 可変 Ra=3k R2=3k R3=9k R4=9k C1=0.1μF

図名	F S カウンター回路 (試作 Btype)
作成	2008年3月
備考	ブリッジ・差動増幅・フィルタ



- A, C, D からそれぞれ電極 D1, D2, D3 へリード線で接続
- CD 間に印圧
- AB 間の電位差を計測

(図1-1-1)

図 2-1-1 製作した魚カウンターのセンサー回路

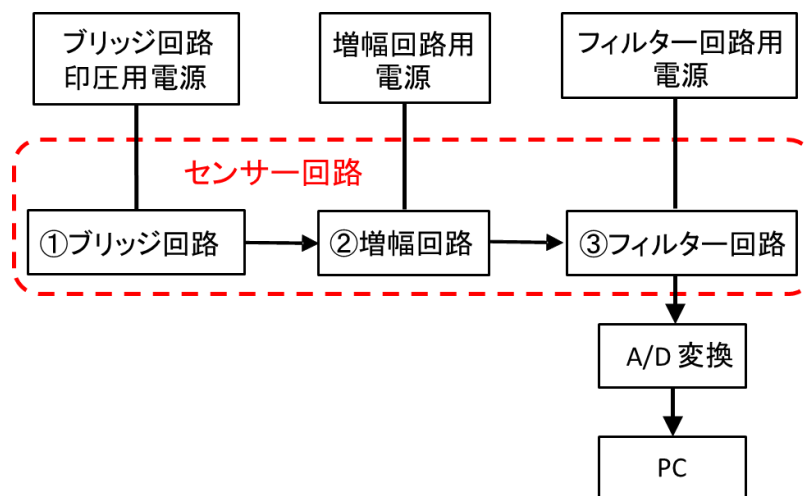


図 2-1-2 魚カウンター構成図

第2章 日本の魚道や小河川などの小型水路での計数に向けたセンサー部の形状，計測条件の検討

第1節 実験目的

第1編で述べたとおり，欧米で計数対象となっている Atlantic salmon は体長が 50cm 以上と大型であるのに対し，日本の魚道で計数対象となる魚類は体長 50cm 以上のサケなどの大型魚以外にも体長 20cm 程度のイワナ・ヤマメ・ウグイ，10cm 程度のアユ等と小型の魚種が多い。また，欧米では魚カウンターが主に設置されている堰は幅が数メートルであるのに対し，日本の魚道の多くは，隔壁越流部の幅が 50cm~1m 程度と小型である。さらに，魚カウンターの日本での知名度は低く，魚カウンターについての情報が著しく不足している。このため，第1章で製作した魚カウンターが日本の魚道のような小型の施設における小型魚類の計数に適しているかどうか分かっていない。そこで本章では，欧米でサケの計数が行われている水路よりも小型の水路を想定した室内実験を実施し，今回製作した魚カウンターの特性を把握し，小型水路で魚カウンターを使用するためのセンサー部の電極の形状，電極間隔等の条件を明らかにする。

第2節 実験方法

本章では，模型水路を用いた2つの実験により，魚カウンターのセンサー部の形状や計測条件とパルス波の振幅の関係および，水の流れの状態がパルス波の振幅に与える影響について検討し，それらの結果をもとに，魚カウンターの計数性能について考察した。実験の詳細について以下に述べる。

(1) センサー部の作成, データ記録方法と静水実験

幅 2cm, 厚さ 0.3cm のアルミ製平棒を用い, 平棒型電極, コの字型電極, 枠型電極の 3 種の電極 (図 1-1-3) を製作した. 電極を等間隔に耐水ラワンベニヤ板 (コンクリートパネル, 以下コンパネ) を敷いた実験水路に固定した. 実験水路を静水状態にした. 各電極リード線でセンサー回路 (ブリッジ回路) へ繋いだ. 両端の電極に 1.5V, 5V の場合は電池から, 12V の場合は安定化電源 (株式会社エー・アンド・ディ社製: 直流安定化電源 AD-8735A) から印圧した. 魚カウンターの電位の計測には AD 変換器として PICO Technology 社製オシロスコープ PICOSCOPE2202 (垂直軸分解能 8 bits) を, サンプルングレート 0.1sec, 入力レンジ -5V ~ +5V に設定して使用した.

電極上を魚の死体 (アジ) を釣り糸で牽引し (図 2-1-3), 深度・壁面からの距離が一定の位置を一定速度で遊泳させた. AD 変換器の出力するデータを PICO Technology 社製 PicoLog Data logging software を利用して PC に取得し記録した. 記録したデータを CSV にエクスポートして図化し, 目視によりパルス波の振幅と半周期 (図 1-1-2) を計測した.

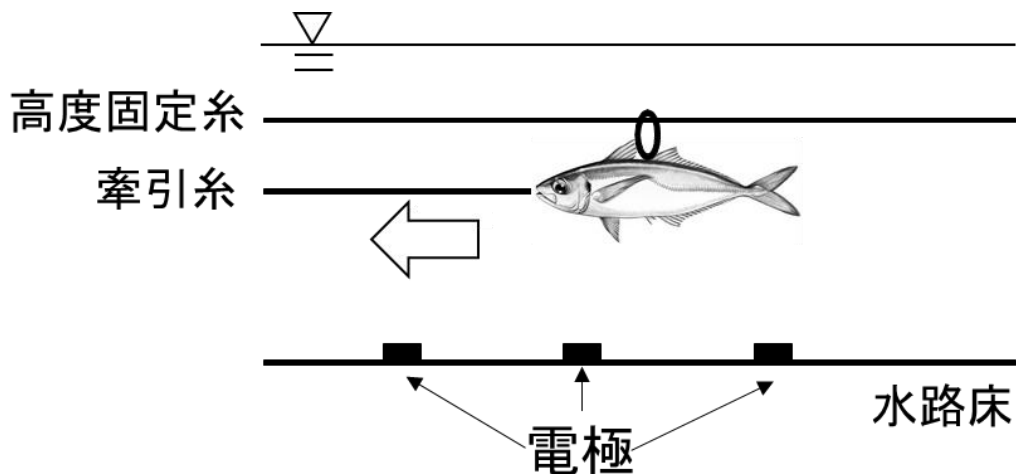


図 2-1-3 魚の牽引方法

日本で一般的な階段式魚道の隔壁越流部に魚カウンターを設置することを想定して、電極の形状、水路幅、全水深、電圧、電極間隔、遊泳高度、遊泳位置、遊泳速度、魚の体長をそれぞれ変化させ、表 2-1-1 のすべての実験条件の組み合わせで計測を行った。

表 2-1-1 静水状態での実験条件

電極の形状	平棒型電極, コの字型電極, 枠型電極
水路幅	20, 50, 100 ※枠型電極の場合20のみ
全水深(cm)	10, 20 ※枠型電極の場合20のみ
電圧(V)	1.5, 5, 12
電極間隔(cm)	5, 10, 20, 40
遊泳高度(cm)	0, 10, 15, 20
	※水路床を基準(0cm)とした高度
遊泳位置	水路中央部～水路壁面部
遊泳速度(m/s)	0.1, 0.5, 1
魚の体長(cm)	10, 20

なお、魚道の設計指針（例えばダム水源地環境整備センター，1998）を参考に、実験条件を決めた根拠を下記する。

・水路幅について

日本の魚道の一般的な階段式魚道の越流幅と同程度以下の 20, 50, 100cm とした。

・魚の体長

体長 50cm を超えるような大型魚については欧米での計数事例により、計数可能性が高いと推定されることから、本章での実験では砂防堰堤や頭首工を利用する代表種のアユを想定し体長 10cm, イワナ, ヤマメ, ウグイを想定し体長 20cm とした。

・水深について

魚道の設計指針（例えば ダム水源地環境整備センター，1998）を参考に、水深を対象魚

(本章ではアユ, イワナ, ヤマメ, ウグイなど) の体高の2倍以上となるように 10, 20cm とした.

・電極間隔について

欧米での既往の研究 (Simpson, 1978) により, 電極間隔は対象魚と同程度が良いとされている. 本章では対象魚の体長を 10, 20cm としているため, 電極間隔を 5, 10, 20, 40cm とした.

(2) 流水状態での計測

現地計数を想定し, 静水状態での実験で用いた実験水路を流水状態 (流速 1m/s) にして, 静水状態での実験と同一の方法で魚を遊泳させた. 電極の形状, 水路幅, 全水深, 電圧, 電極間隔, 遊泳高度, 魚の体長, 流速, 遊泳速度など, 表 2-1-2 の各条件を組み合わせた条件で計測を行い, 結果を静水状態と比較した. なお, 流速は対象魚で最も遊泳能力の小さい体長 10cm の魚の巡航速度である約 0.2m/s 以上, 突進速度である 1m/s 未満 (例えばダム水源地環境整備センター, 1998) になるように流速 1m/s とした.

表 2-1-2 流水状態での実験条件

電極の形状	平棒型電極
水路幅(cm)	50
全水深(cm)	20
電圧(V)	12
電極間隔(cm)	5, 30
遊泳高度(cm)	0, 10, 20
	※水路床を基準(0cm)とした高度
魚の体長(cm)	10, 20
流速(m/s)	0.1, 1
遊泳速度(m/s)	遡上0.1, 降下0.1, 0.5, 1
※体長10cmの魚	※水路床に対する速度
遊泳速度(m/s)	遡上・降下ともに0.1, 0.5, 1
※体長20cmの魚	※水路床に対する速度

第3節 結果と考察

(1) 静水状態での実験

a) 各電極に共通する傾向について

水路幅、魚の体長と振幅の関係を図 2-1-4 に、電圧の大きさ、全水深と振幅の関係を図 2-1-5 に示す。水路幅が小さくなるほど、魚の体長が大きくなるほど、振幅は大きくなる傾向がある（図 2-1-4）。また、電極に加える電圧が大きくなるほど、全水深が小さくなるほど、振幅は大きくなる傾向がある（図 2-1-5）。

b) 電極の形状により異なる傾向について

平棒型電極の実験ケースでの電極間隔、遊泳高度と振幅の関係を図 2-1-6 に示す。平棒型電極では、遊泳高度が低くなり水路床の電極に近づくほど、振幅は大きくなる傾向がある（図 2-1-6）。また遊泳高度が低く電極に近い位置では、電極間隔が魚の体長～体長の 1/2 程度で振幅は極大となる傾向がある。これに対し水面付近では、電極間隔が大きくなるほど振幅が大きくなる傾向がある。

コの字型電極の遊泳位置、遊泳高度と振幅の関係を表 2-1-3 に、枠型電極の遊泳位置、遊泳高度と振幅の関係を表 2-1-4 に示す。コの字型電極では平棒型電極と同様に、遊泳高度が低くなるほど振幅は大きくなる傾向があるが、壁面にも電極が存在するため、同一高度でも壁面に近くなるほど振幅は大きくなる傾向がある（表 2-1-3）。枠型電極では、水路床・側面・上面の電極に近づくほど振幅が大きくなる傾向がある（表 2-1-4）。

コの字型・枠型電極は、平棒型電極と比較して電極のある壁面、上面付近のに魚を遊泳させた場合に振幅が大きくなることがわかった。

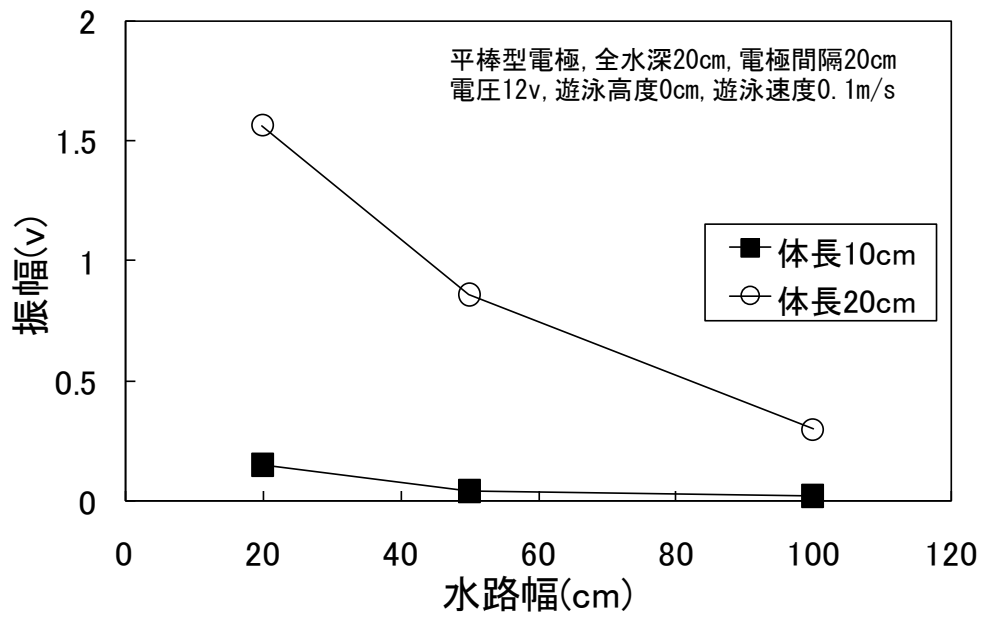


図 2-1-4 水路幅・魚の体長と振幅の関係

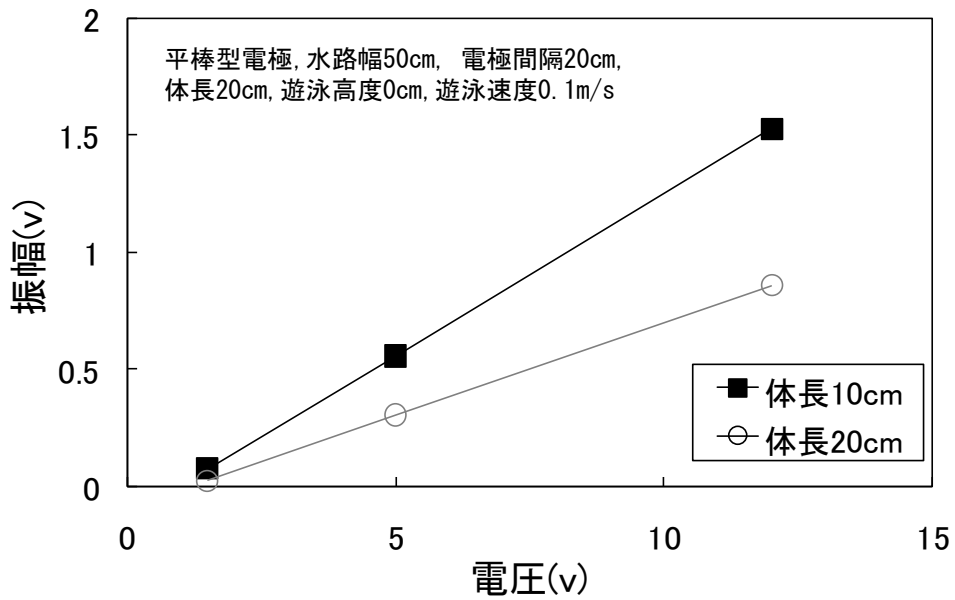


図 2-1-5 全水深・電圧と振幅の関係

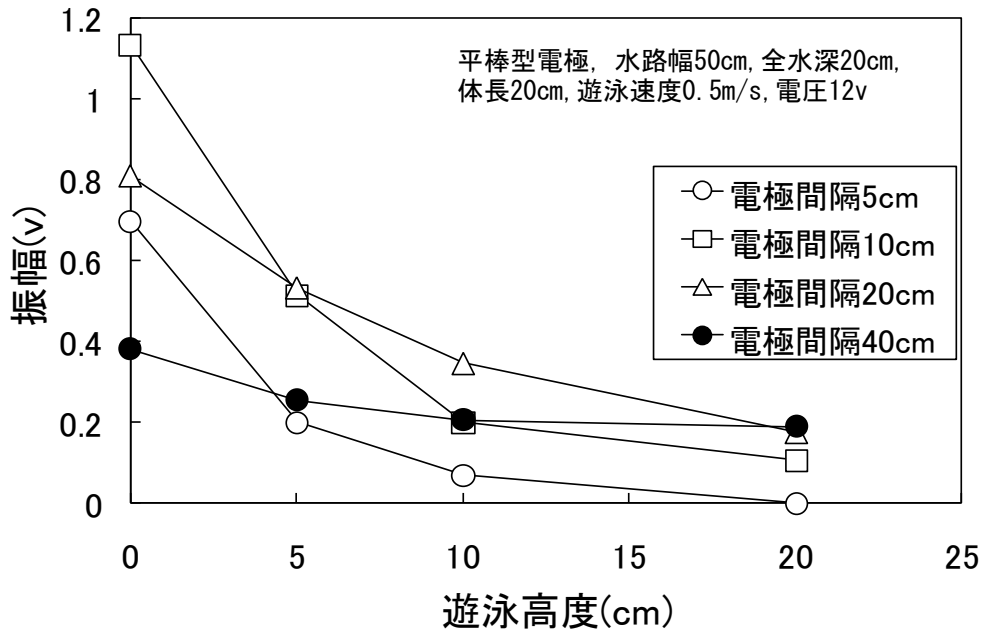


図 2-1-6 電極間隔・遊泳高度と振幅の関係

表 2-1-3 コの字型電極の遊泳位置・高度と振幅の関係

		壁面からの距離				凡例	振幅 (V)
		0cm	12.5cm	25cm	50cm		
遊泳高度	20cm	0.34	0	0	0	■	0.5以上
	10cm	0.39	0.04	0	0	■	0.3~0.5
	5cm	0.43	0.09	0.06	0.07	■	0.1~0.3
	0cm	0.53	0.27	0.25	0.25	■	0.1未満
					□	発生せず	

実験条件 : 水路幅 100cm, 全水深 20cm, 電極間隔 5cm, 電圧 12v, 体長 20cm, 遊泳速度 0.1m/s

表 2-1-4 棒型電極の遊泳位置・高度と振幅の関係

		壁面からの距離	
		0cm	10cm
遊 泳 高 度	20cm	0.94	0.55
	10cm	0.78	0.09
	0cm	1.3	0.52

凡例 振幅 (v)	
	0.5以上
	0.3～0.5
	0.1～0.3
	0.1未満
	発生せず

実験条件：水路幅 20cm, 全水深 20cm, 電極間隔 5cm, 電圧 12v, 体長 10cm, 遊泳速度 0.1m/s

c) 半周期, 電極間隔, 遊泳速度の関係について

遊泳速度と半周期の関係を図 2-1-7 に, 電極間隔と半周期の関係を図 2-1-8 に示す. 魚カウンターの原理から電極間隔と遊泳速度, パルス波の半周期の間には, $\text{半周期} = \text{電極間隔} / \text{遊泳速度}$ という関係が成立すると予測される. 解析の結果, 遊泳速度が小さくなるほど, 電極間隔が大きくなるほど, 半周期が長くなるという, 予想と一致する結果が得られた (図 2-1-7, 図 2-1-8). しかし, 電極間隔が魚の体長よりも大きな場合には, 魚が電極間に存在する間, ピークが継続する不明瞭なパルス波となった.

(2) 流水状態での計測

流水状態での遡上・降下とパルス波の関係を図 2-1-9 に示す. 静止状態と流水状態で結果を比較したところ, 流れの状態によらず, 振幅, 半周期の値は同程度の値であった. パルス波の振幅や半周期に水の流れの状態が与える影響は小さいと考えられる.

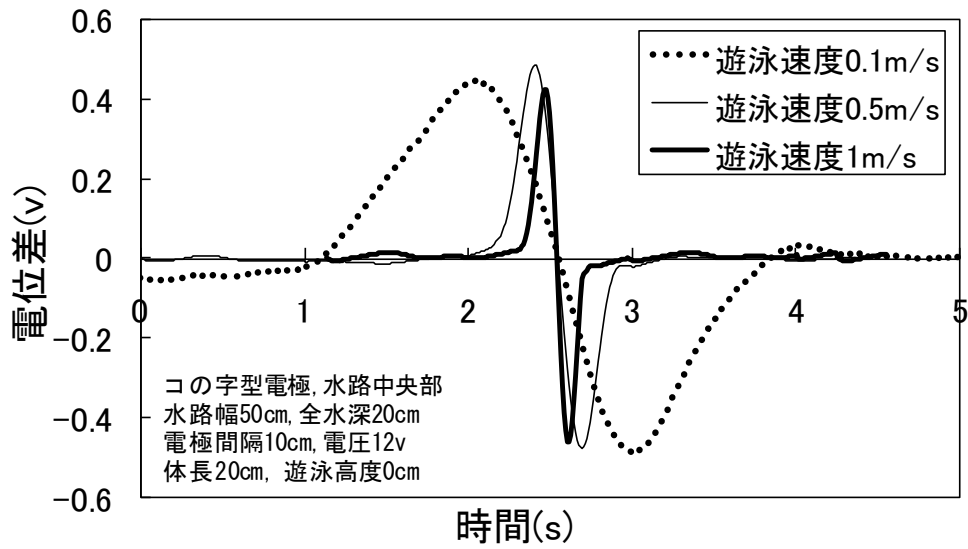


図 2-1-7 遊泳速度と半周期の関係

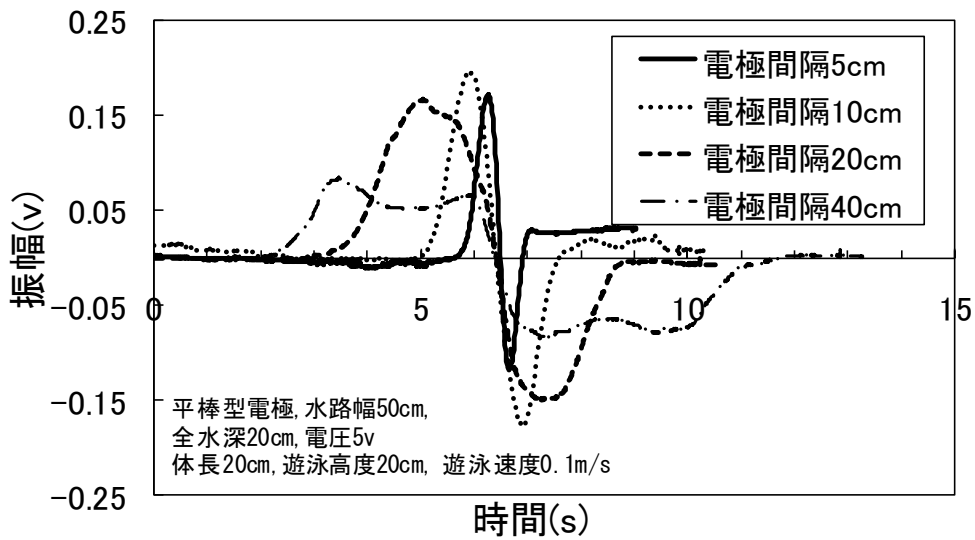


図 2-1-8 電極間隔と半周期の関係

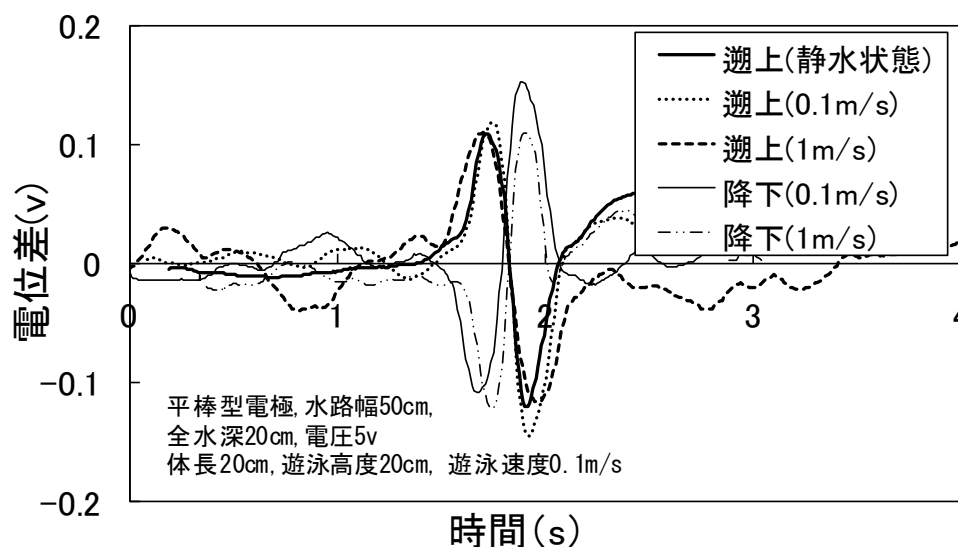


図 2-1-9 流水状態での遡上・降下とパルス波の関係

(3) センサー部電極の形状、計数条件と通過魚の計数性能の関係について

以上の結果より、半周期の長さによらず、振幅が大きいものがパルス波と識別しやすいことから、目視での判別が容易となる振幅が 0.1v 以上の場合、通過魚を計数可能と仮定し、センサー部電極の形状による計数性能の違いを検討した。計数性能の最も高かった電圧 12v の条件を例に挙げ、結果を述べる。

体長 20cm の魚の場合、全水深 20cm 以下、水路幅 50cm 以下の条件では、平棒型電極、コの字型電極を用いると、水路床から水面までの任意の遊泳高度で計数可能である。体長 10cm の魚の場合、電圧 12v で平棒型電極を用いると、水路幅 20cm では遊泳高度 10cm まで、水路幅 50cm では水路床付近でのみ計数可能であるが、コの字型電極を用いると、水路幅 20cm では水路全体で、水路幅 50cm では水路底と壁面付近で計数可能になる。そのため、計測に適した形状の魚道で計測を行うか、魚道の機能を損なわないような形状で魚道越流部を仕切り水路幅を狭くする、魚道出口を仕切り魚道内に流入する流量を調整するなどの工夫をすることで、10cm 以上の魚の計数が可能となる。

しかし、電気が魚に与える影響を考慮すると、電圧は低い方が好ましい。欧米でサケの計数に用いられている電圧は5vである。この電圧を印加した場合、体長20cm以上の魚は計数できる可能性があるが、体長20cm未満の魚の計数は困難となる。5v以下の電圧で体長20cm未満の魚を計数しようとする場合には、新しいセンサーを開発する必要がある。

第4節 まとめ

本章では、魚カウンターのセンサー部を製作し、欧米でサケの計数が行われている水路よりも小型の水路を想定した室内実験を実施し、以下の結論を得た。

- ・日本の魚道の大きさを想定したセンサー部の形状・設置条件、水理条件、魚の遊泳位置・速度等とパルス波の振幅、半周期の関係が明らかになった（図 2-1-10）。水路幅、電圧、遊泳高度、魚の大きさについては欧米での知見と同様、表 1-1-2 に示すような関係であった。電極間隔については、欧米の研究事例では魚の体長と同程度が最もよいとされていたが、本実験では電極付近では電極間隔が体長の1/2~体長程度で振幅が最大となるものの、電極から離れた場所では電極間隔が大きくなるほど振幅が大きくなる結果となった。
- ・水路幅が狭くなるほど、全水深が小さいほど計数性能が高くなる結果となったが、これらの条件は既設の魚道で計数する場合には魚道の形状に制限される。そのため、計数に適した形状の魚道で計数を行うか、魚道の機能を損なわないような形状で魚道越流部を仕切り水路幅を狭くする、魚道出口を仕切り魚道内に流入する流量を調整するなどの工夫が必要となる。
- ・魚が大きいほど、魚の遊泳位置が電極に近いほど計数性能が高くなる結果となったが、計数の対象となる魚種や大きさ、遊泳経路の特徴などを考慮し、電極をコの字型や枠型にする、電圧を高くする、狭い水路幅で計数するなどの工夫が必要となる。

- ・体長 20cm 以上の魚は幅 50cm 以下，水深 20cm 以下の水路であれば計数可能である。
- ・電圧は高くするほど魚体へ影響を及ぼす可能性があるため，低電圧で体長 20cm 未満の魚を計数する場合には，新しいセンサーを開発する必要がある。

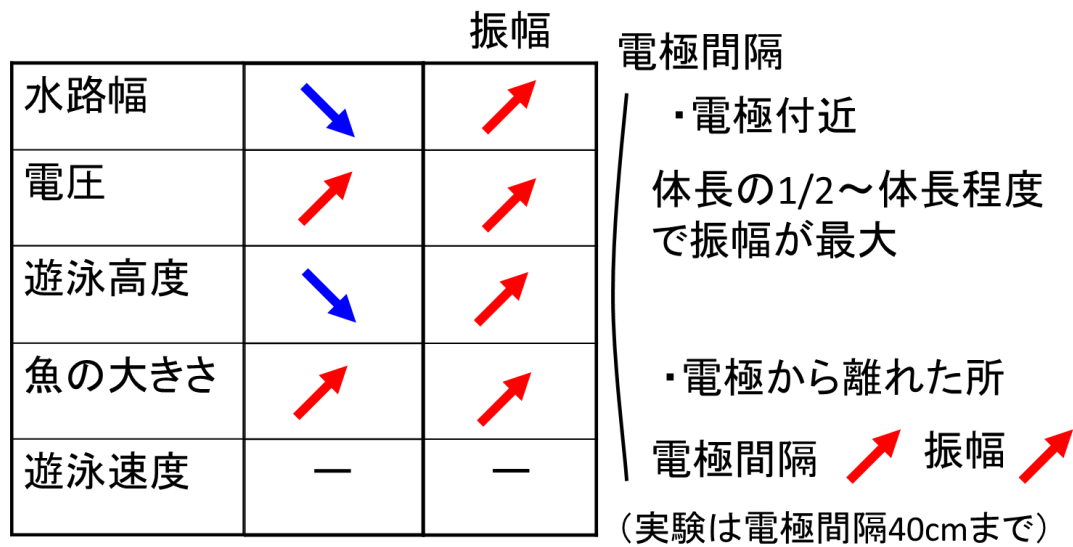


図 2-1-10 センサー部の形状・設置条件，水理条件，魚の遊泳位置・速度等とパルス波の振幅，半周期の関係

第 3 編 大型魚の計数を目的とした魚カウンターの開発

第 1 章 既設魚道での大型魚の計数試験

第 1 節 実験目的

第 2 編第 2 章において、日本の砂防堰堤や頭首工に設置される魚道のように、欧米でサケの計数が行われている水路よりも小型の水路を想定した室内実験を実施し、小型水路で魚カウンターを利用するためのセンサー部の電極の形状、電極間隔等の条件を検討した。その結果、体長 20cm 以上の魚は幅 50cm 以下、水深 20cm 以下の水路であれば計数可能であることが示された。

しかし、欧米ではセンサー部が堰や開水路の通水路に一体構造物として組み込まれている事例が多いのに対し、日本の魚道の多くは隔壁とプール部の連続した複雑な構造を持ち、センサー部を構築することを前提とした構造になっていない。このため、日本の魚道にセンサー部を構築する場合、計数に適した電極間隔で電極を設置することが可能で、センサー上の越流水深と越流流速が魚道の設計指針（例えばダム水源地環境整備センター、1998）に示されている条件を満たすような土台を考案する必要があるが、そのような研究事例はない。

そのため、日本の魚道で魚カウンターを用いた計数を実用化するためには、センサー部を魚類の通過の妨げにならない水理条件を保つような形状で階段状の既設の構造物内に後付けで構築する方法の検討が課題となる。

そこで本章では、現場での計数精度を検証すると共に、この課題を解決することを目的に、既設の魚道にセンサー部を後付けで構築し、産卵期に魚道を遡上する体長 50cm 以上の大型魚（サケ）を計数し、計数精度やセンサー部の設置方法を検証した。さらに、魚カウンターを用いた計数調査の調査コストについて従来の主要な調査方法と比較検討した。

第2節 実験方法

(1) 調査地と調査期間

調査地は利根大堰3号魚道，調査期間は2007年10月1日～12月25日（計86日），調査対象魚はサケとした．利根大堰は，利根川の河口から154kmの利根川の中下流域に位置する群馬県千代田町と埼玉県行田市地先に設置した691.7mの可動堰で，昭和43年に完成し現在も稼働中の日本を代表する大規模取水堰である（図3-1-1，図3-1-2）．1号魚道は幅0.85mの呼び水水路を持つアイスハーバー型（両側越流潜孔付き）階段式魚道で，右岸高水敷に設置されており，幅員2.2m，延長51.5mで，隔壁間落差は20cmである．魚道出口には，角落し及び越流型転倒ゲート1基が備えられ，魚道内の流量・流速を，最大流量0.92m³/s，最大流速1.81m/sまで調節可能である．3号魚道は堰中央部に，1号魚道は堰の右岸側に，2号魚道は3号魚道と1号魚道のおよそ中間に設置されている．2・3号魚道は同一タイプのアイスハーバー型（片側越流折り返し式）階段式魚道で，幅員1.7m，延長23.7mで，隔壁間落差は20cmである（表3-1-1，図3-1-3）．魚道出口には，角落し及び越流型転倒ゲート1基が備えられ，魚道内の流量・流速を最大流量0.67m³/sまで，流速は0.9～1.81m/sの範囲で調節可能である．本研究は3号魚道を対象に実施した．

(2) センサー部の構築

第2編第2章により，体長20cm以上の魚の場合，電圧5vを用いることで，全水深20cm以下，水路幅50cm以下の条件で計数可能であるとの結論を得ている．本章では体長50cm以上の大型魚のサケを計数対象とするが，計数箇所が既設の魚道であり，越流幅などの魚道の構造や，魚道内に流入する水量（流速，水深）の変動など，計数するにあたって制限が生じるが，第2編第2章の結果を参考にするとともに，魚道の設計指針に示されている条件を満たすような土台を考案し，計数を行った．

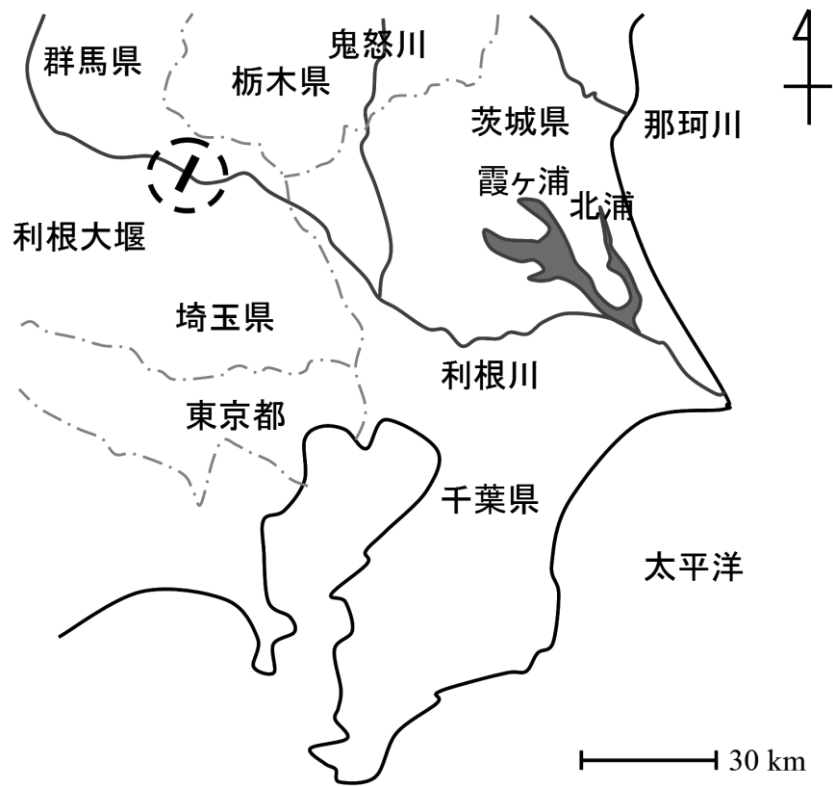


図 3-1-1 利根大堰位置図

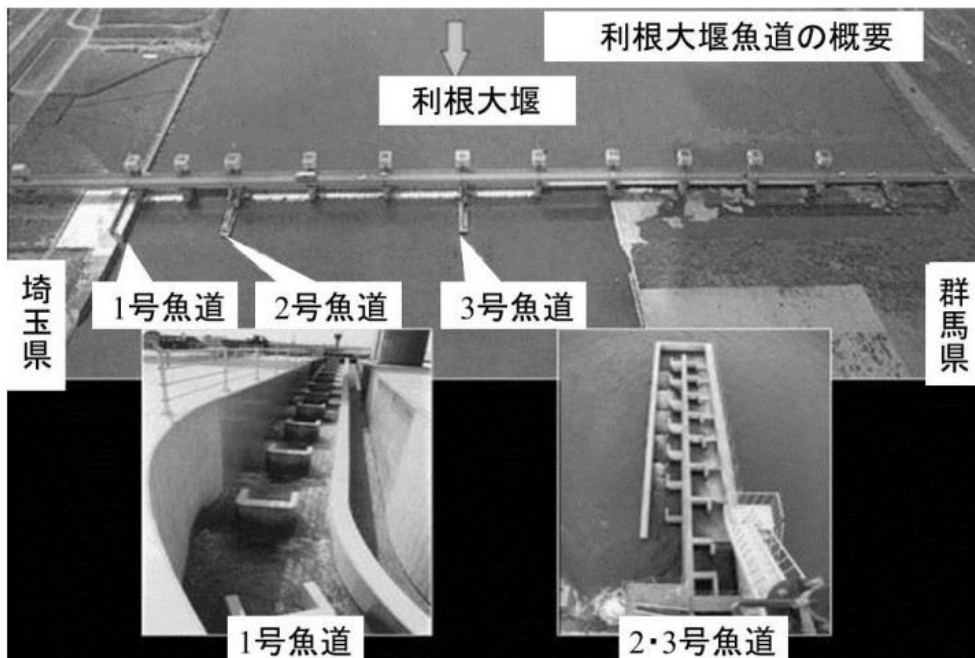


図 3-1-2 利根大堰 3号魚道の位置図

(水資源機構利根導水総合事業所(2012)に加筆)

表 3-1-1 利根大堰に設置されている魚道の諸元

(水資源機構利根導水総合事業所(2012)に加筆)

諸元	1号魚道	2・3号魚道
平面形	逆J型	二つ折直線形
構造	アイスハーバー型 両側越流潜孔付き	アイスハーバー型 片側越流潜孔付き
延長	51.50m	23.65m, 折り返し
勾配	1:1.6	1:1.2
幅	2.2m	1.7m
対象魚種	アユ、サケを主とする。サクラマス、ヨシノボリ等	

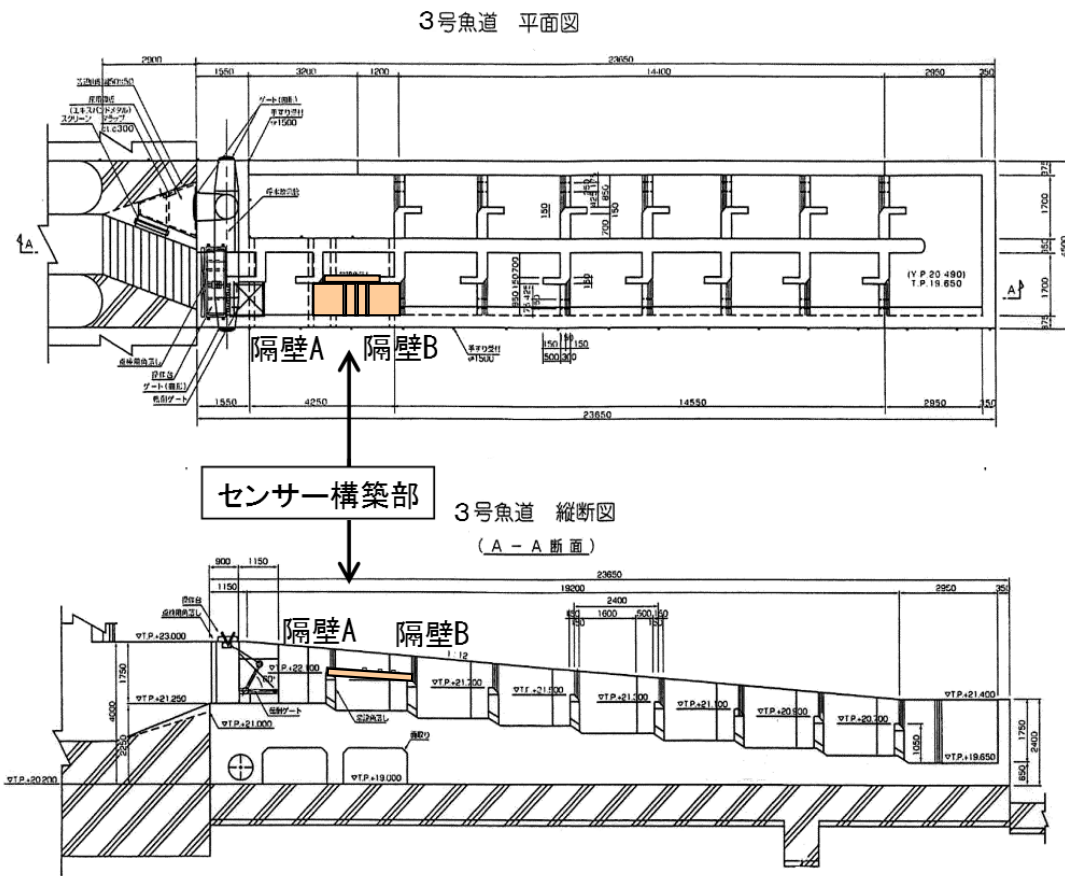


図 3-1-3 3号魚道概略図 ((独) 水資源機構提供の図面に加筆)

魚道内におけるセンサー部の設置位置を図 3-1-3, センサー部の拡大図を図 3-1-4, 3-1-5 に示す. 3 号魚道に設置されているゲートを閉じることにより, 流入する水を一時的に止め, 魚道の上から 2 段目のプール部の隔壁 A~B 間に平板(ホワイトウッド, 以下平板)を渡し, 魚道にボルトで固定した. 平板を水性ペンキで白く塗装した. 既往の研究(Simpson, 1978)では,電極間隔を対象魚の体長と同程度, 第 2 編第 2 章の実験結果から, 体長~体長の 1/2 程度にすると, パルス波の振幅が最大になることが分かっている. 利根大堰を遡上するサケの体長は 60cm 前後が主体(水資源機構総合事業所, 2007)であることから, 平板上に, 幅 5cm, 長さ 85cm, 厚さ 3mm のアルミ製の平棒型電極(以下電極)を 40cm 間隔で 3 本設置し, 各電極をセンサー回路に接続し, 両端の電極には安定化電源(株式会社エー・アンド・ディ社製: 直流安定化電源 AD-8735A)により欧米でのサケ類の計数の際に利用されている 5v の電圧(Simpson, 1978 ; Beaumont et al. , 1986)を印圧した. サケが必ず電極上を通過するように平板とプール部の間を側壁板で遮断した. 以下本章では, 平板と電極を合わせてセンサー部とする. センサー上の流速は, 平板を設置したため, 通常の隔壁越流部と比較して大きな流速となる. センサー部の構築にあたっては以下の点に留意する必要があると考えられる.

①サケがセンサー上で滞留せず, センサー上をスムーズに通過し, サケの通過によるパルス波が明瞭になるように, センサー上の流速は体長 50cm のサケの巡航速度約 1m/s 以上, 突進速度 5m/s 以下(例えばダム水源地環境整備センター, 1998)になるようにする.

②第 2 編第 2 章の実験結果により, センサー上の越流水深が小さいほどパルス波が大きくなりセンサーの感度が高くなることがわかっているが, 越流水深が小さすぎるとサケの遡上に支障を来すため, 魚道の設計指針(例えばダム水源地環境整備センター, 1998)を参考に, 越流水深をサケの体高の 2 倍の 30cm 程度とする.

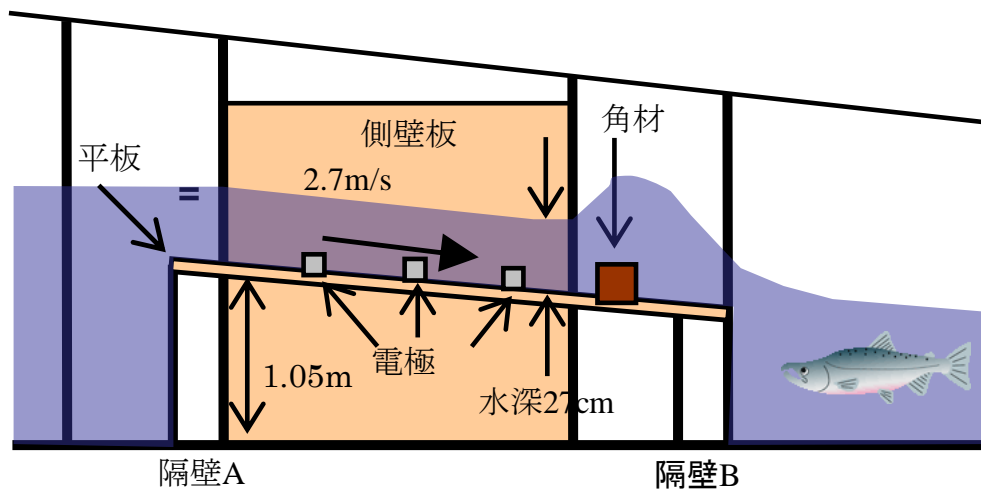


図 3-1-4 センサー部縦断面図(拡大図)

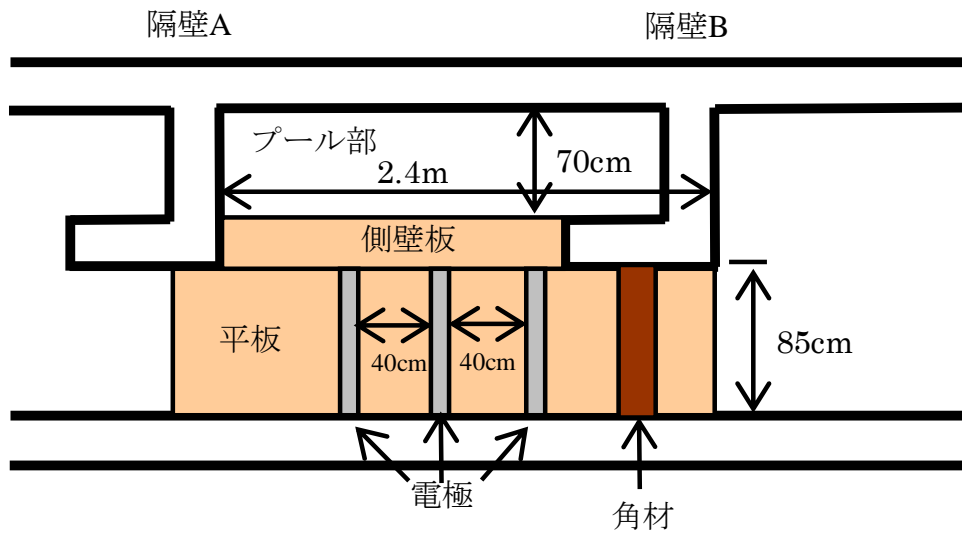


図 3-1-5 センサー部平面図(拡大図)

③水流の乱れはサケの遡上を阻害することが知られていることから、出来るだけ水流が乱れないようにする。

④センサー部は、サケの突進速度の持続時間内に通過できる長さにする必要がある。突進速度は数秒間持続できるとされている（ダム水源地環境整備センター，1998）ことから、センサー部の長さは、突進速度の持続時間の約半分にあたる 1 秒間でサケが遡上する距離（ $=(\text{突進速度}-\text{流速})\times 1[\text{m}]$ ）以下とする。

今回の計数では、魚道の構造上センサー部の長さは 2.6m にせざるを得ないため、①～④が同時に満たされるように、魚道内に流入する流量を魚道上流のゲートにより調整し、調査期間中は電極上の水深を 27cm、流速は 2.7m/s で一定となるようにした。また、隔壁 B を越流する際に流れが剥離しサケの遡上を阻害しないように、センサー部の下流端付近に角材を設置し流れを整流した。

(3) データの解析方法について

魚カウンターの電位の計測には AD 変換器として PICO Technology 社製オシロスコープ PICOSCOPE2202（垂直軸分解能 8 bits）を、サンプリングレート 0.1sec、入力レンジ-5V～+5V に設定して使用した。AD 変換器により PC に記録した計測データを CSV ヘクスポートして図化し、目視によりパルス波が発生した（＝魚が通過した）時刻を求めた。また、魚の通過方向（遡上または降下）により発生するパルス波の形状が反転する性質を利用し、魚の通過方向を識別した。

調査期間中にビデオカメラ（JVC Everio GZ-MG330）によりセンサー部を計 19 時間（10 月 19 日 10 時 20 分～11 時 20 分の計 1 時間，10 月 29 日 9 時～15 時の計 6 時間，11 月 9 日 9 時～15 時の計 6 時間，11 月 15 日 9 時～15 時の計 6 時間，合計 19 時間）撮影し、魚がセンサー部を通過した時刻，通過方向（遡上または降下），魚種を求めた。また，電極の間隔

が 40cm であることを利用し、ビデオ映像内の電極間隔をスケールにしてサケの上あごの先から尾鰭の付け根までの体長を求めた。ビデオ映像から目視により計数した魚数を魚カウンターによる計数結果と比較することにより、魚カウンターによるサケの計数精度を検証した。

なお本研究と並行して、1, 2 号魚道ではトラップを用いた遡上量調査が実施されたため、魚カウンターでの計数結果と、トラップ調査での計数結果の比較を行った。

第 3 節 結果

(1) 計測データについて

サケがセンサー部を遡上した際に生じたパルス波を図 3-1-6 に示す。本調査の場合、センサー回路から出力される信号に含まれるノイズ（サケが通過していない時にも生じている信号の変動）の振幅は 0.05v 程度であった（図 3-1-6）。

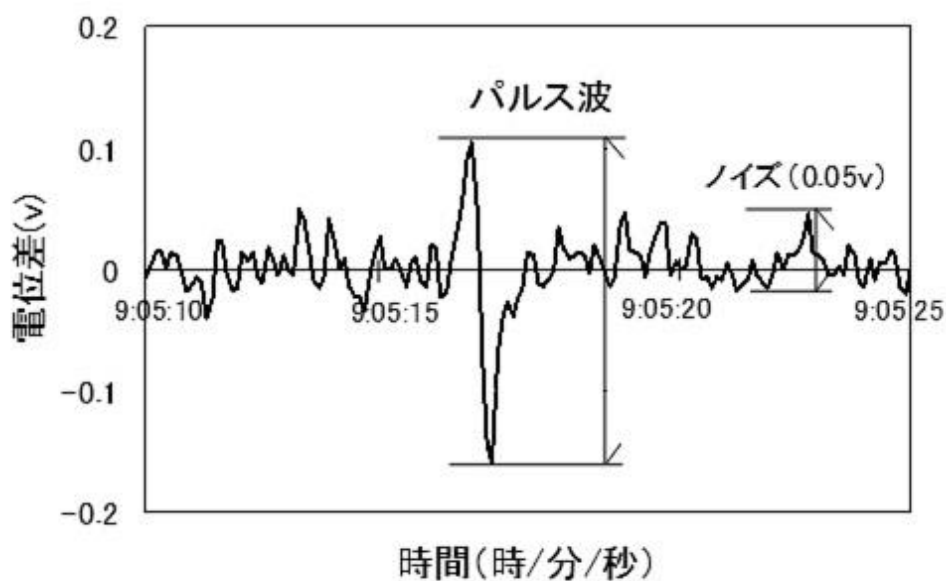


図 3-1-6 計測されたパルス波 (2007 年 11 月 9 日)

第2編第2章の実験の結果から、魚の体長、水路幅、全水深等の計測条件により魚の通過によるパルス波の大きさは大きく変化することが分かっている。ノイズの振幅がパルス波の振幅と同程度の場合、サケの通過によるパルス波を信号の振幅の大きさのみから検出することは難しい。第1章での実験結果から、パルス波の振幅がノイズの振幅の2倍以上の場合、パルス波を容易に計数出来ることが経験的にわかっていることから、本研究では振幅が0.1v以上のパルス波のみを魚類が通過した際に発生したパルス波として計数することとした。

また、既往の研究 (Simpson, 1978 ; Beaumont et al. , 1986 ; Smith et al. , 1996 ; Dunkley et al. , 1982 ; Smith et al. , 1997 ; Dunkley et al. , 1989) では、計数対象となるパルス波は図3-1-6に示す遡上のパルス波と、パルスの形状が左右反転した降下のパルス波であるが、他に計数対象とはならないが、降下中のサケがセンサー上で引き返すことにより不明瞭な形状のパルス波が発生することが報告されている (Smith et al. , 1996)。本研究でもサケの想定外の行動により発生した不明瞭な形状のパルス波が確認された。ここで、計測データから得られたパルス波の形状について整理する。

a) サケの遡上・降下形態とパルス波の形状について

ビデオカメラで撮影されたサケの通過形態には、①遡上したケース(47 sample)、②降下したケース(1 sample)、③飛び上がって遡上したケース(1 sample)、④センサー上で降下を中断し遡上したケース(1 sample)、⑤降下直後に遡上したケース(1 sample)の5通りあった。それぞれのケースのパルス波を図3-1-7～3-1-11に示す。①遡上したケース、②降下したケース、⑤降下直後に遡上したケースの場合は、パルス波が明瞭でサケの通過方向の識別は容易であった。③飛び上がって遡上したケース、④降下を中断し遡上したケースの場合は下に凸型の不明瞭なパルス波となり、パルス波としての識別が困難であった。本研究では①遡上

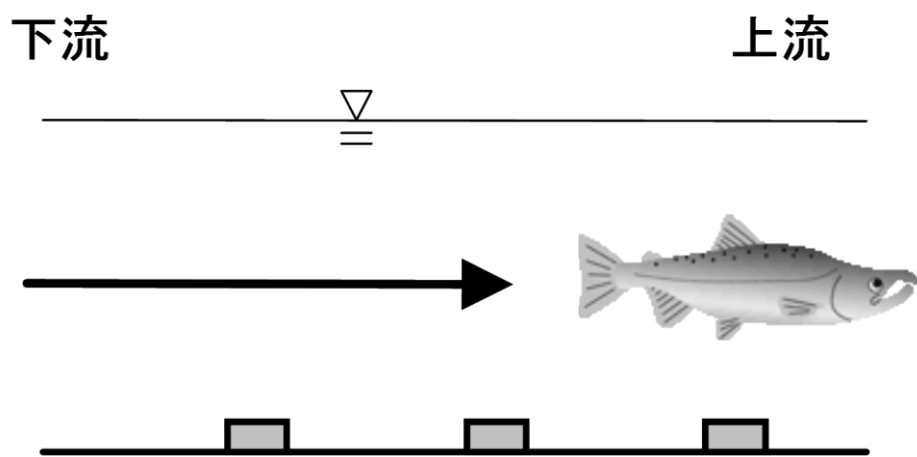
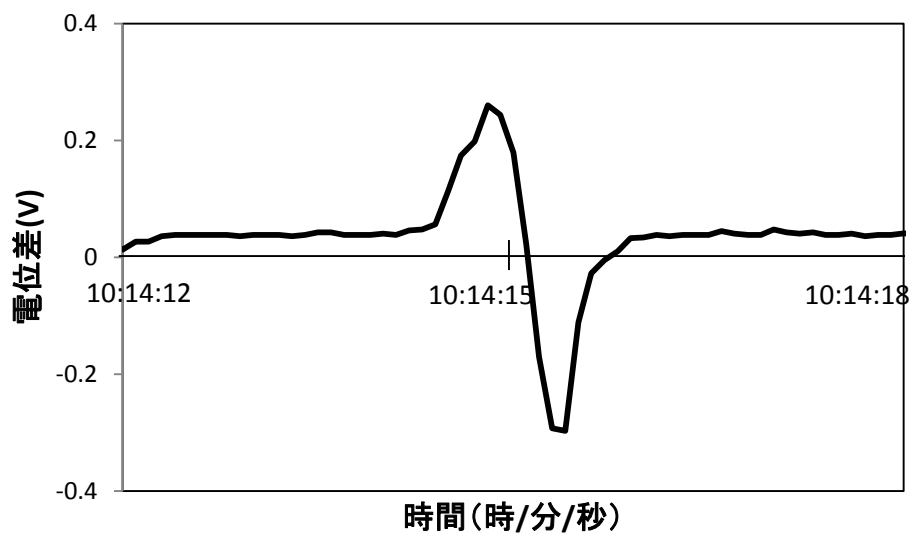


図 3-1-7 遡上したケース① (2007 年 11 月 15 日)

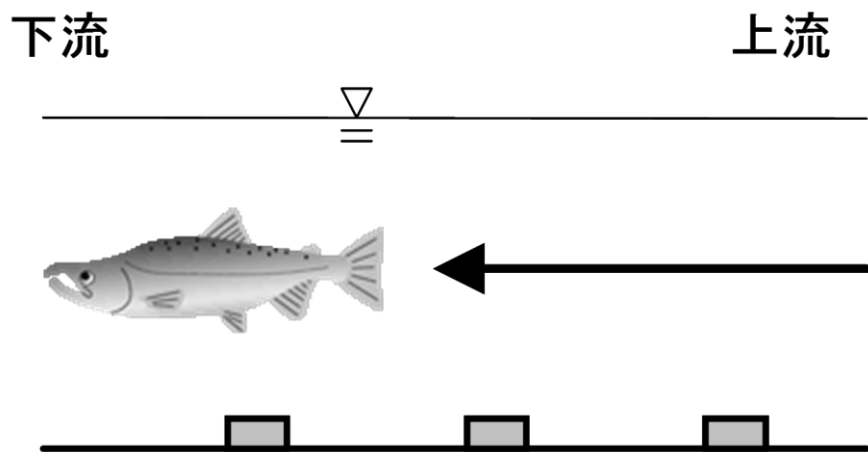
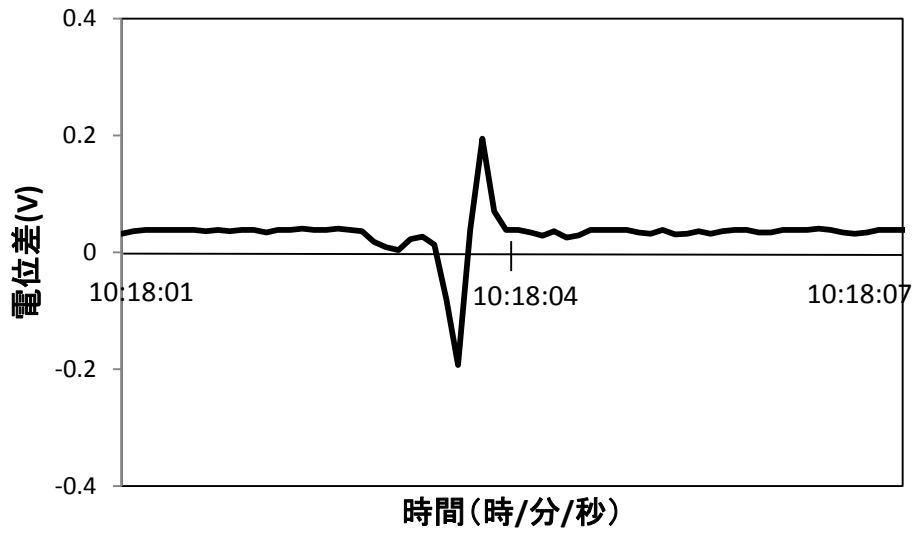


図 3-1-8 降下したケース② (2007 年 11 月 15 日)

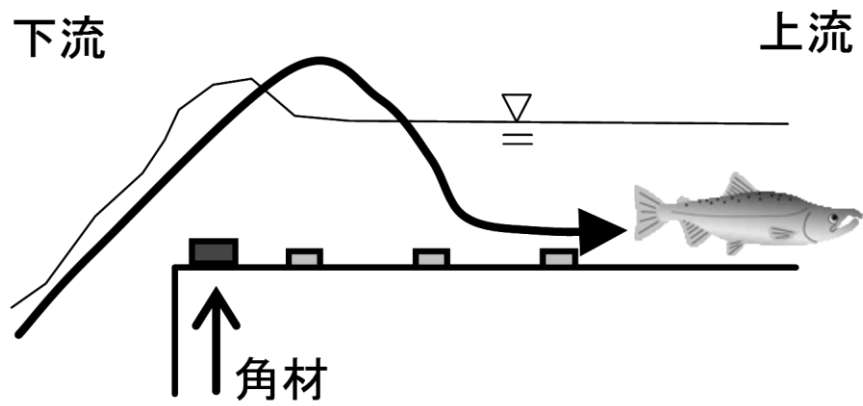
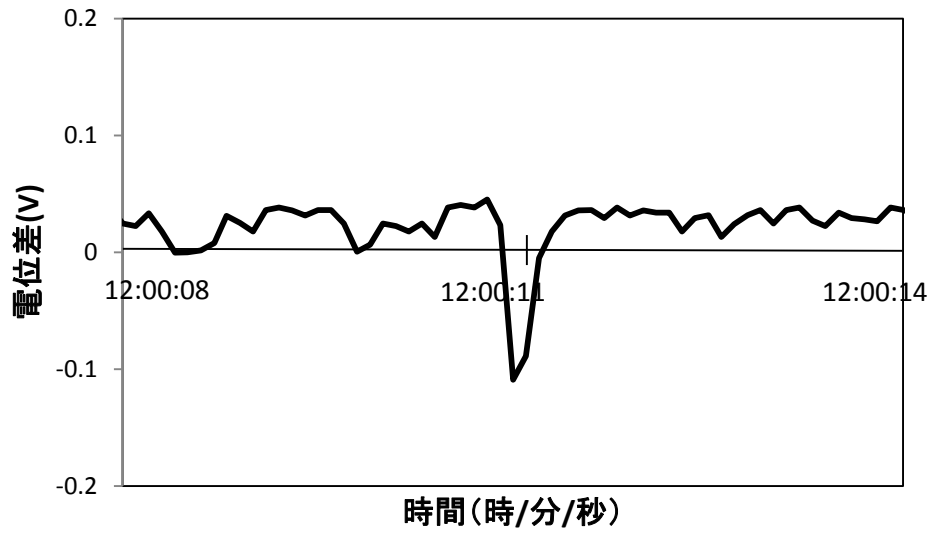


図 3-1-9 飛び上がって遡上したケース③ (2007年11月15日)

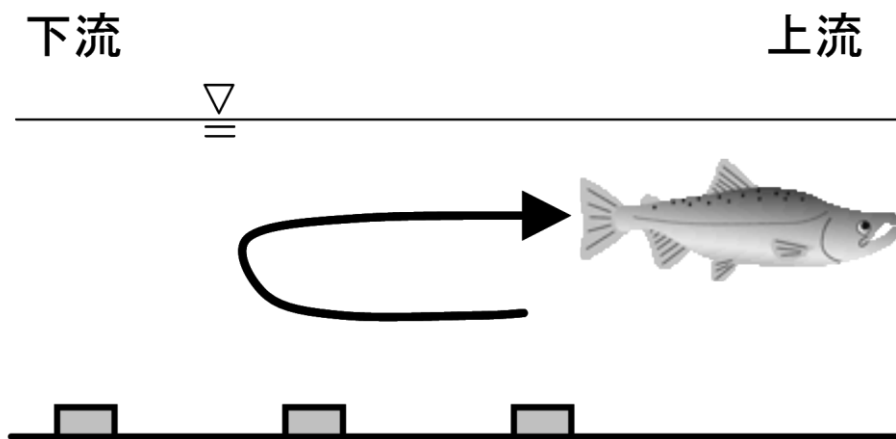
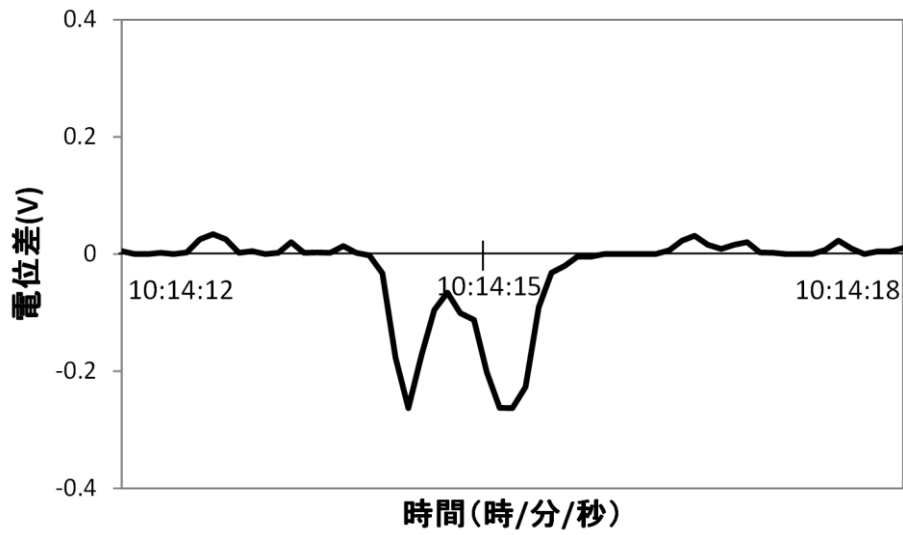


図 3-1-10 センサー上で降下を中断し遡上したケース④

(2007年11月15日)

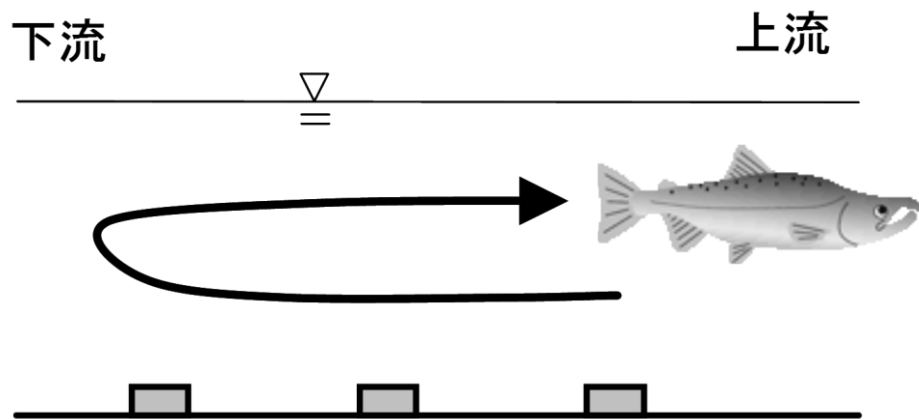
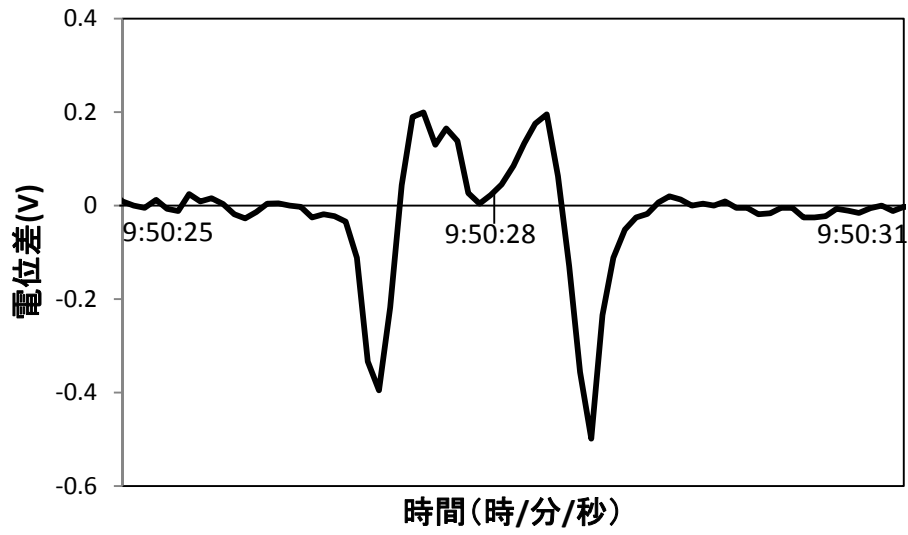


図 3-1-11 降下直後に遡上したケース⑤ (2007 年 11 月 15 日)

したケース，②降下したケースのみを計数し，実質的に遡上していないことになる⑤降下直後に遡上したケースと，パルス波が不明瞭で識別が困難な③飛び上がって遡上したケース，④センサー上で降下を中断し遡上したケースの3ケースは計数対象外とした。

b) 魚の非通過時に生じた波形の乱れについて

計数期間中，図 3-1-12 のように電位差が細かく変動しながら約 5 秒間増加し，その後同程度の時間をかけて減少するという現象が観察された。このような波形は 1 日最大で 4 回発生した。ビデオ撮影時にもこの波は 4 回発生したが，その時刻に記録されたビデオ映像には魚やその他の生物の通過は記録されておらず，流木やその他の流下物，流況の変化等も確認されなかった。既往の研究 (Simpson, 1978 ; Beaumont et al. , 1986 ; Smith et al. , 1996 ; Dunkley et al. , 1982 ; Smith et al. , 1997 ; Dunkley et al. , 1989) には，このような波形の報告は見当たらない。

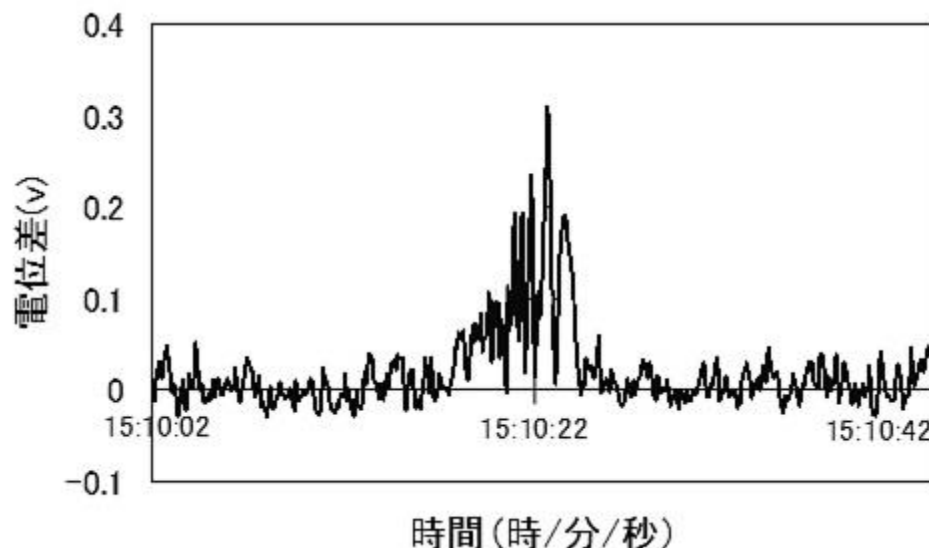


図 3-1-12 波形の乱れ (2007 年 11 月 15 日)

(2) 魚種・体長と振幅の関係について

ビデオカメラで撮影された魚種，体長と，魚カウンターで計測されたパルス波の振幅との関係を図 3-1-13 に示す．ビデオ映像により確認された遡上魚数はサケ 48 尾，フナ類 1 尾であった．サケの体長と振幅の値について回帰分析を行った結果，相関係数 $r=0.648$ ，1% 有意水準で有意な相関がある結果となった．魚の体長が大きいほど，振幅が大きくなる傾向があることが分かった．これは第 2 編第 2 章の実験の結果と一致する．しかし，同じ体長でも振幅の値にはばらつきがあり，大きい場合には 2 倍程度差のあるケースがあった．

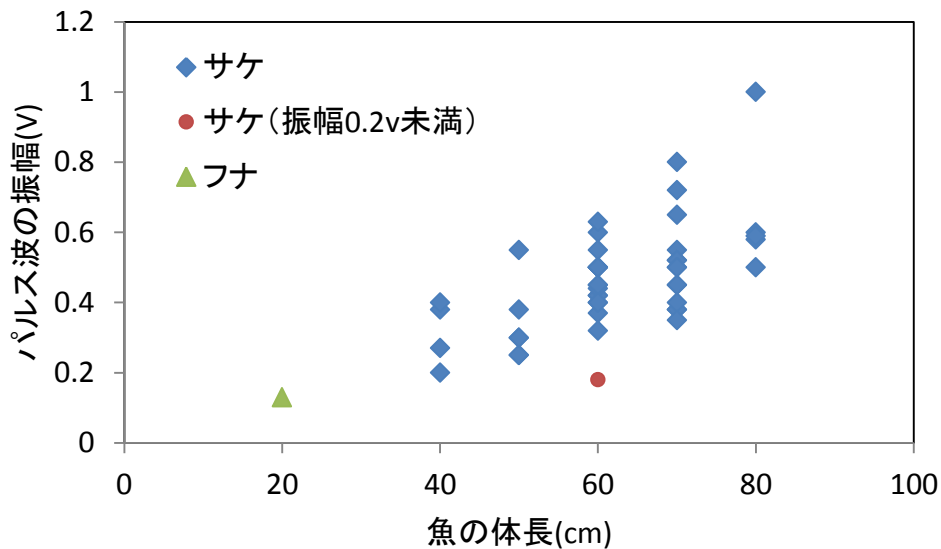


図 3-1-13 魚種・体長とパルス波の振幅の関係

(3) センサー部の流況，センサー上での魚の挙動について

調査期間中，ビデオ映像や肉眼での観察による限り，サケがセンサー部を通過するのに支障を来している様子は見られなかった．センサー上の水深平均した流速は 2.7m/s であったが，体長 10cm 程度の魚が遡上しているのが肉眼で確認された．センサー部電極が粗度と

して働き、センサー部平板の表面近傍の流速が低下したため体長の小さな魚でも遡上可能であったものと推測される。センサー部では魚道の隔壁越流部よりも流速が大きかったが、サケや他の魚類の遡上に与える影響は少なかったと思われる。また、魚がセンサー上を通過する際に感電したり、急に遊泳方向を転換し電極を避けたりするような行動はみられなかった。既往の研究からも、センサー部で魚が電極を忌避するような報告は見当たらない (Simpson, 1978 ; Beaumont et al. , 1986 ; Smith et al. , 1996 ; Dunkley et al. , 1982 ; Smith et al. , 1997 ; Dunkley et al. , 1989)。センサー部の両端の電極に印圧した 5v の電圧の魚類への影響は少なかったと思われる。

第 4 節 考察

本節ではまず、ビデオ映像から目視で計数した遡上魚数と魚カウンターによる計数結果から、魚カウンターの計数精度を算出する。次に、計数精度を低下させた要因、低下させる可能性のある要因について挙げ、計数精度を向上させる方法と魚類の通過によるパルス波の定義について考察を行う。さらに、センサー部の構築方法について考察を行い、最後に、トラップ調査、ビデオカメラ（目視）調査と魚カウンターによる調査の調査コストの比較を行う。

(1) 計数精度について

ビデオ映像により確認された遡上魚数は、サケ 48 尾、フナ類 1 尾であった。第 2 編第 2 章の実験結果により、体長とパルス波の振幅の大きさには正の相関があることが分かっている。体長 20cm のフナ類が振幅 0.16v、計数されたサケのうち体長が最小の 40cm のサケのパルス波の振幅が 0.2v であることから、本研究では振幅 0.2v 以上のパルス波をサケのパルス波と定義する(図 3-1-13)。

ビデオカメラ撮影期間中に計測された振幅 0.2v 以上のパルス波の数は 46 であり、いずれもサケの通過時に発生したものであった(図 3-1-13)。0.2v 以下のパルス波の数は 2 つであり、1 つはサケ、1 つはフナ類(体長 20cm)の通過時に発生したものであった。サケが電極上を飛び越えて遡上したためパルス波の形状が不明瞭となり、パルス波として識別できないものが 1 つあった(図 3-1-9)。限られたデータではあるが、以上より遡上魚の計数精度は $46 \div 48 \times 100 = 96\%$ であり、十分な精度で遡上数を計数できていることが示された。

また、ビデオカメラにより確認された降下魚数はサケ 1 尾であり計数精度を議論することはできない。

振幅が 0.2v 以上で、通過形態が第 3 節(1)の a)で述べた①、②の場合のパルス波のみを、サケが通過した際に発生したパルス波として計数した。その結果、計数期間中の遡上魚数は 1,929 尾、降下数は 34 尾、純遡上数は 1,895 尾となった。5 日毎に集計した期別の遡上数

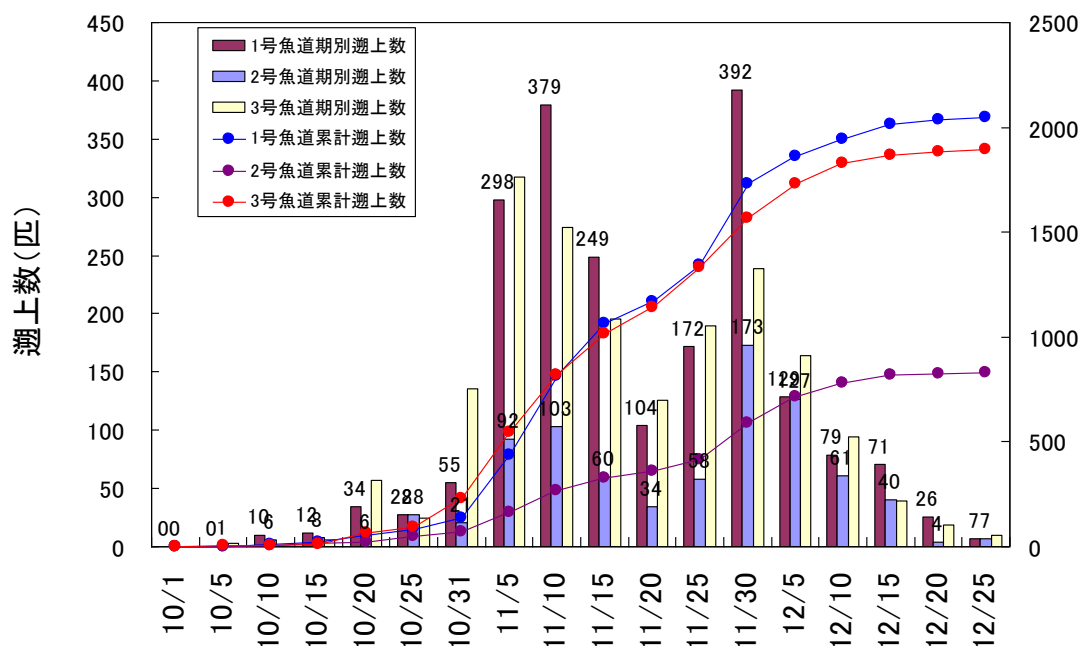


図 3-1-14 サケの遡上数の推移

と累計遡上数の推移を図 3-1-14 に示す。サケは主に 10 月中旬から 12 月下旬に遡上し、遡上のピークは 11 月初旬から 11 月下旬になることが分かった。これは並行して 1 号, 2 号魚道で実施したトラップ調査の結果と一致している。

(2) 計数精度を低下させた要因, 低下させる可能性のある要因とそれらの対策について

a) サケの飛び越え遡上について

ビデオカメラ撮影期間中に、サケがセンサー部を途中まで飛び越えたためパルス波が不明瞭となり、カウント対象外となったケースが 1 回あった (図 3-1-9)。ビデオカメラ撮影をしていない期間のデータにも、飛び越えの際に生じたと思われるパルス波が約 10 個みられることから、全調査期間中に飛び越え遡上により計数されなかったサケが 10 尾程度存在するものと推測される。

サケがセンサー部を途中まで飛び越えた理由は、センサー部の下流端付近に角材を設置したことで、隔壁 B と下流のプール部間の落差が大きくなり、隔壁を越える際に飛び上がったためと考えられる (図 3-1-4, 図 3-1-9)。今後は、サケの飛び越えによる計数精度の低下を軽減するため、隔壁を越流する流れが隔壁から剥離しない工夫をする、センサー部の電極全体を上流側へ移動し、サケが隔壁を乗り越えようと飛び上がった場合でも、センサーの最下流の電極よりも下流側で着水するようにするなどの対策を施す必要があると考えられる。

b) サケの通過によるパルス波の定義について

第 2 編第 2 章の実験結果により、魚カウンターは、体長、水路幅等の計測条件により、ノイズの大きさやパルス波の大きさが変化することが分かっている。本研究では、幅 85cm, 水深 27cm, 流速 2.7m/s, 電極間隔 40cm の水路条件で、パルス波の振幅が 0.2v 以上のものを計数対象とすることで、高精度でサケを計数することができた。

本調査中に、降下途中のサケがセンサー上で降下を中断し遡上したため、不明瞭な形状のパルス波が発生したケースが 1 件あった。このような不明瞭な波形は誤計数をもたらす危険性がある (Smith et al. , 1996)。センサー上でのサケの行動によっては、さらに複雑な形状の波形が発生する可能性がある。本研究では、(1)で述べたように、サケの通過はパルス波の振幅の値から判断しているが、今後は、より多くの水路、魚種で魚カウンターが運用できるように、水路条件や魚種の違いによるパルス波の振幅の閾値について検討を行うと同時に、サケが遡上または降下した場合のパルス波の形状とサケがセンサー上で想定外の行動をとった場合のパルス波を、パルス波の形状等により識別する方法について検討を行う必要がある。

c) 不定期に発生するノイズについて

本調査中には、図 3-1-12 に示した不定期に発生するノイズが観察された。不定期に発生するノイズは振幅が 0.3v 以上に達する場合があり、誤計数につながる可能性がある。不定期に発生するノイズは 10 秒程度継続しているため、発生原因には、波による水面の変化、一時的な水質の変化等が考えられる。

Simpson(1978)により、水面に発生する波が background signals (ノイズ) として計測データに反映される場合があることが報告されているが、それらのノイズの振幅値は小型のサケのパルス波の振幅値と比較しても著しく小さく、計数上問題ないとしている。本調査のビデオ映像からは水面の流況を詳細に評価することはできないが、このノイズが生じた時刻に、通常観察されないような大きな水面の乱れは観察されなかった。Beaumont et al.(1986)がスコットランド北部の河川で行った調査では、電気伝導度の変化は $\pm 2\%$ 程度で計数精度に大きな影響がないと報告されている。一方、Dunkley et al.(1982)が行った North Esc river での調査では、1 時間毎で 60 日間計数されたデータでは、調査期間を通して $21\sim 45\mu\text{S}/\text{cm}$

の範囲で変化した。河川水の電気伝導度の減少により電気抵抗が増加した場合、常時計測されるノイズと比較して相対的にパルス波の振幅が大きくなり、魚カウンターの感度を増加させると報告されている。これら既往の研究から、河川水の電気伝導度が短時間に大幅に変動した場合、計測データに影響を及ぼす可能性があると考えられる。今回の調査で確認された不定期に発生するノイズも、瞬間的な河川水の電気伝導度の変化が原因で発生した可能性がある。しかし、本調査地では 1 時間単位の電気伝導度の計測しか行われておらず、このノイズが発生した際に、どのような電気伝導度の変動があったのかわからない。

以上より、不定期に発生する継続時間の短いノイズは水面に発生する波に起因するものではないと推測されるが、電気伝導度の変化との関係については、今後、魚カウンターによる現地計数と並行し、秒単位の電気伝導度の計測を行うことで、因果関係を検討する必要がある。

(3) センサー部の構築方法について

センサー部の構築にあたっては、第 2 節実験方法の(2)で述べたように、サケがセンサー上で滞留せずスムーズに遡上し明瞭なパルス波が出力されるように、①センサー上の流速をサケの巡航速度以上、突進速度未満とする、②魚道を設計する際の隔壁部の越流水深の下限値であるサケの体高の 2 倍程度とする、③出来るだけ水流が乱れないようにする、④サケの突進速度の持続時間内にセンサー部を通過できるようにセンサー部の長さは、突進速度の持続時間の約半分にあたる 1 秒間でサケが遡上する距離(=突進速度－流速)×1[m])以下とする。といった 4 つの条件を満たすように留意し、魚道に流入する流量を調整し、センサー上の流速 2.7m/s, 越流水深 27cm, センサー部の長さ 2.6m の条件で計数を行った。その結果、欧米での計数精度と同程度 (Simpson, 1978 ; Smith et al. , 1996) の計数精度 96%という高い精度でサケの遡上数を計数することができた。したがって、今回の計数で

構築にあたって留意した 4 つの条件は必要条件であったと考えられるが、必要かつ十分な条件であったとは言い難い。例えばセンサー上の流速などは、①の条件を満たす流速の幅は広く、センサー部の構築指針とするには不十分である。また、これら 4 つの条件を満たしても、第 3 節の(1)a)で述べたように、センサー部下流に大きな段差のある場合には、サケが飛び越え遡上し、計数精度が低下する恐れがあるため、センサー部を上流に設置する、段差を解消するといった工夫が必要となる。魚カウンターを様々な条件の魚道で容易に利用できるようにするためには、構築のノウハウを蓄積することにより、さらに条件を絞り込んでいく必要がある。

(4) トラップ調査、ビデオカメラ（目視）調査と魚カウンターを用いた調査の調査コストの比較

本調査におけるサケの遡上量調査の調査にかかる作業員 1 人の 1 日の作業時間 8 時間を調査コスト 1 人工とし、トラップ調査、ビデオカメラ（目視）調査と魚カウンターを用いた調査の概算コスト比較を表 3-1-2 に示す。トラップ調査、ビデオカメラ（目視）調査は直接人が魚数を確認するため手間がかかり 1 日当たり 3.1 人工必要なのに対し、魚カウンターは自動計数のため 1 日当たり 0.3 人工と約 1/10 の調査コストとなる。魚カウンターにより調査コストが大きく削減できることが示された。

第 5 節 まとめ

既設の魚道に後付けで構築した魚カウンターを用いた調査により、以下の結論を得た。

- ・魚カウンターのセンサー部の形状を魚道の設計指針（ダム水源地環境整備センター，1998）を満足するように設計し、既設の魚道の越流部に後付けで構築することにより、魚類の通過の妨げにならずにサケの遡上を計数精度 96% という高精度で計数することが出来た。

表 3-1-2 調査の概算コスト比較

	トラップ	ビデオカメラ (目視)	魚カウンター
計測に必要な人工(1日に必要な人工×計測時間)	3人工×86日間 =258人工	3人工×86日間 =258人工	0.02人工×86日間 =1.7人工
設置・撤去	6人工	4人工	12人工
維持管理	6人工	3人工	9人工
合計	270人工	265人工	22.7人工
日平均	3.1人工	3.1人工	0.3人工
摘要	計測に必要な人工については、遡上数が多いこと、大型魚のサケが対象のため、3人工/日と計上した。維持管理については月1回2人工として計上した。	計測に必要な人工については、等倍再生で1日24時間かかるため、24/8(1人工)=3人工と計上した。維持管理については月1回1人工として計上した。	計測に必要な人工については、自動計測のため、0.02人工(10分)/日と計上した。維持管理については月1回3人工として計上した。

なお、センサー部の構築については設計指針に従い次の4項目に留意した。①センサー上の流速をサケの巡航速度以上、突進速度未満とする、②魚道を設計する際の隔壁部の越流水深の下限値であるサケの体高の2倍程度とする、③出来るだけ水流が乱れないようにする、④サケの突進速度の持続時間内にセンサー部を通過できるようにセンサー部の長さは、突進速度の持続時間の約半分にあたる1秒間でサケが遡上する距離(=(突進速度-流速)×1[m])以下とする。

・魚カウンターを用いた調査に必要なコストを算出した結果、従来主流になっているトラップ調査、ビデオカメラ(目視)調査による計数方法よりも低コストで調査が可能であることが示された。

なお、利根大堰では、本章での調査以後、従来行われていたトラップ調査にかわり、8年間(2007年～2014年)にわたって魚カウンターを用いた方法によりサケの遡上数計数が行われており、遡上数結果も管理者HPで公開されている(水資源機構利根導水総合事業所、

2015). また, 本章では振幅値 0.2v 以上のパルス波を計数し, サケの遡上数を算出したが, その後の計数業務では, パルス波の頂点の値が一定値以上で, 底点の値が一定値以下となっているパルス波を検出し, 魚の通過数を自動計数するプログラムを使用しており, 同程度の計数精度で計数が行われている.

第2章 小河川での計数試験

第1節 実験目的

第3編第1章の既設の魚道での魚カウンターを用いた調査方法により、96%という計数精度で大型魚（サケ）が計数可能であることが示された。この手法は、その後8年間（2007～2014年）にわたり利根大堰におけるサケの遡上数計数業務に用いられており、近藤・権田(2012)および河林(2009)により、魚道でのサケの遡上数の計数に有用であることが実証されている。第1編でも述べたが、魚道のみでなく、魚カウンターを用いて河川内に生息する魚類を計数する方法を開発することは、河川内の魚の生息状況や産卵のための移動の実態を把握するなど、内水面における水産生物の移動を定量的に把握する方法としても有用であると考えられる。一般の河川区間においても魚カウンターを用いて魚の計数ができるようにするためには、まず比較的水位・川幅の小さい小規模な河川においての魚カウンターの実用性の試験研究が必要であるが、魚カウンターを一般の河川区間に設置して魚を計数するためには、次に挙げる課題を解決する必要がある。

課題1：プラットフォームをどのように設計・設置するか

魚カウンターを利用するためには、センサー部の電極を固定する土台（プラットフォーム）が必要となる。利根大堰では、平板のプラットフォームを魚道の形状に合わせて作成し、魚道にボルトで固定しているが、自然河川の河床形は不規則であり、プラットフォームを河床に固定するためには工夫が必要となる。さらに、魚カウンターで、魚数を精度良く計数するためには、魚がプラットフォームに設置された電極の上を、滞留することなく通過しなければならない。したがって、河川を遡上あるいは降下してきた全ての魚が、プラットフォームの電極上をスムーズに通過するような、プラットフォームの作成・設置方

法を明らかにする必要がある。

課題 2 : 川幅が広くなることに伴う計数精度低下をどのように抑えるか

利根大堰で魚カウンターを設置した魚道隔壁越流部の幅は 85cm であったが、河川の川幅は小河川であっても、数 m 以上に及ぶ場合が多い。第 2 編第 2 章の実験結果より、水路幅が広くなり、水路全幅をカバーするのに必要な電極の長さが長くなるほど計数精度が低下することがわかっている。実河川で魚カウンターにより魚数を計数する場合、魚道での計数のように、河道全幅をカバーするような長さの電極を用いて、単一のカウンターで計数しようとする、計数精度が著しく低下することが懸念される。この問題への対策としては、プラットフォームを横断方向に複数の測定領域に分割し、各測定領域に 1 台ずつカウンターを設置して、魚の通過を計数する工夫が考えられる。しかし、カウンターを複数設置することは、計数に係るコスト増につながるため、計数精度を維持しつつ、できるだけ少ないカウンターで計数するための、適切な電極の長さを明らかにする必要がある。また、複数のカウンターを並列に並べた場合、隣接するカウンターにより、魚が二重にカウントされることはないのかといった点についても同時に確認する必要がある。

本研究は、上述の 2 つの課題を解決することを目的に、小河川の一般の河川区間の河床や、実河川の河床形を模倣した多自然型魚道の河床に魚カウンターを設置し、河川を移動（遡上または降下）するサケやサクラマス の計数を行った。

第 2 節 実験方法

(1) 調査地、調査期間、調査方法

調査は、新潟県糸魚川市田海川（2009 年 10 月 18 日 15:00~21:00, 19 日 8:00~18:00 : 計 16 時間）、山形県飽海郡遊佐町滝沢川（2009 年 12 月 12 日 8:00~17:00, 13 日 8:00~14:00 : 計 15

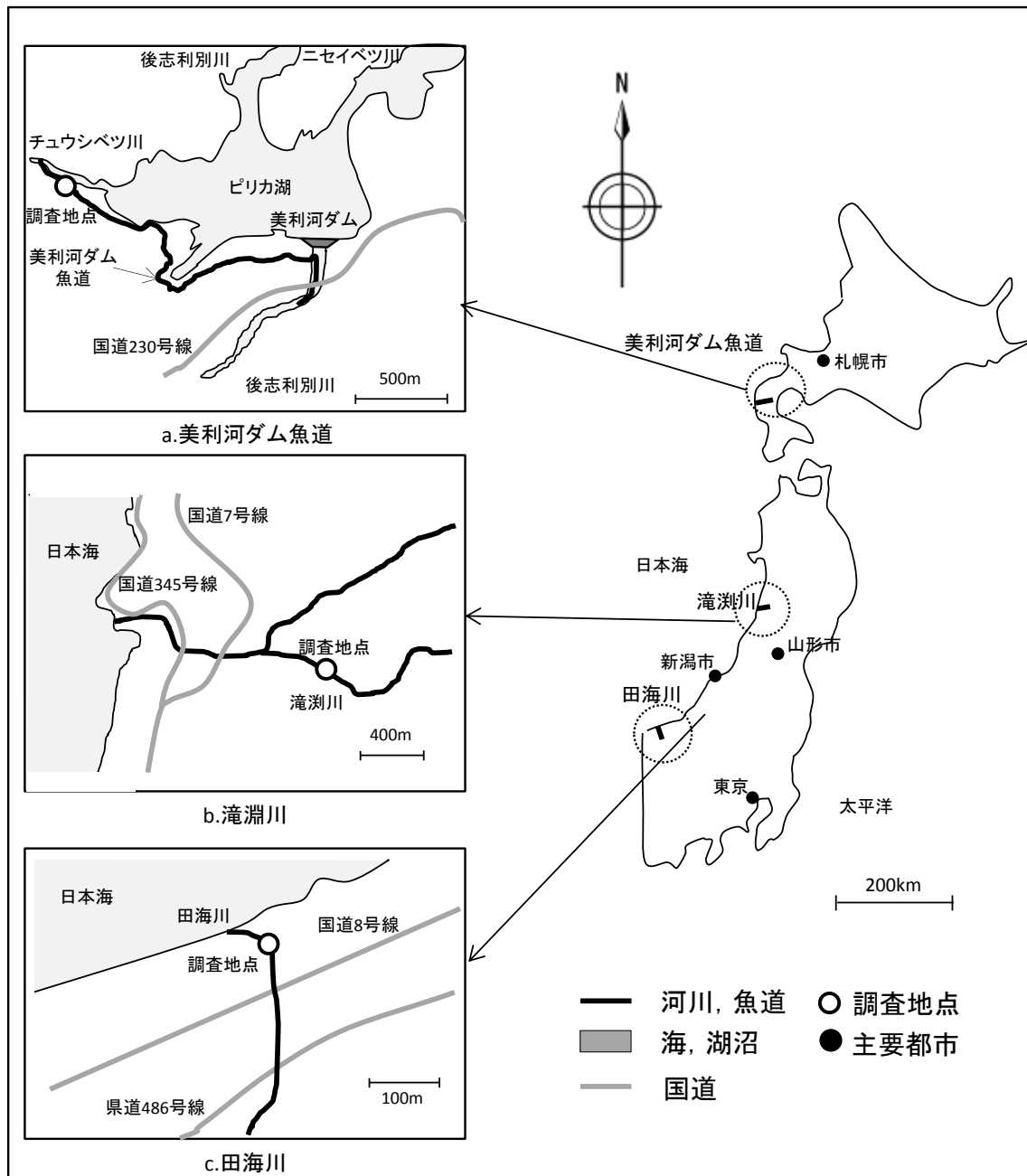


図 3-2-1 調査地点位置図

時間) および北海道瀬棚郡今金町の美利河ダム魚道 2011 年 9 月 19 日 11:00~12:00, 20 日 13:00~14:00, 21 日 7:00~9:00, 22 日 12:00~16:00, 23 日 8:00~16:00: 計 16 時間) で実施した (図 3-2-1). 田海川は糸魚川市を流れる全長約 15km の二級河川である. 調査は河口から約 200m

上流の地点で行った。調査地点の川幅（低水路幅）は約 5m、水深は約 30cm であった。滝
淵川は二級河川月光川水系の一支流で、山形県飽海郡遊佐町鳥海山大平付近の湧水を源流
とする全長 2.9km の河川である。調査は月光川との合流地点から約 1.5km の場所で行った。
調査地の 100m 上流にウライが設置されており、実験期間中は滞留するサケが多数見られた。
調査地点の川幅は約 7m、水深は約 25cm であった。美利河ダムは、北海道瀬棚郡今金町美
利河地先、一級河川後志利別川本流上流部に建設された重力式コンクリートダムとロック
フィルダムの複合式のダムで、平成 17 年にダム直下からチュウシベツ川との合流点間に日
本一の長さとなる 2.4km の自然の河川・河床を模倣した多自然型魚道が設置された。調査
地点の魚道の水路幅は約 3m、水深は約 70cm であった。

調査対象魚はそれぞれ、現地に生息するサケ、サクラマス（いずれも体長約 70cm）、ヤマ
メ（河川型サクラマス、体長 10～30cm）とした。計数用の電極を取り付けたプラットフォ
ームを河床に固定した。河川内を移動する魚類を魚カウンターにより計数した。同時に、
魚カウンターの電極付近を水面上方よりビデオカメラ（JVC Everio GZ-MG330）で撮影し、
撮影映像から電極付近での魚の行動を把握するとともに、遡上数と降下数を計数した。魚
カウンターによる遡上数とビデオ映像から読み取った遡上数を比較することで、計数精度
を求めた。さらに、カウンターでは計数できなかった魚を対象に、電極付近での行動をビ
デオ映像から解析した。

(2) プラットフォームの作成・設置とデータ取得方法

魚カウンターは、電極・電極を設置するプラットフォーム・センサー回路からなるセン
サー部と、AD 変換器・PC からなる解析部で構成される（図 3-2-2）。今回の一連の調査で
は、コンパネ（縦 90cm、横 180cm、厚さ 12mm）・単管パイプ（φ48.6mm×80cm または
φ48.6mm×160cm）で組み上げたプラットフォームの上に、1 セット 3 本のアルミ製の電極（幅

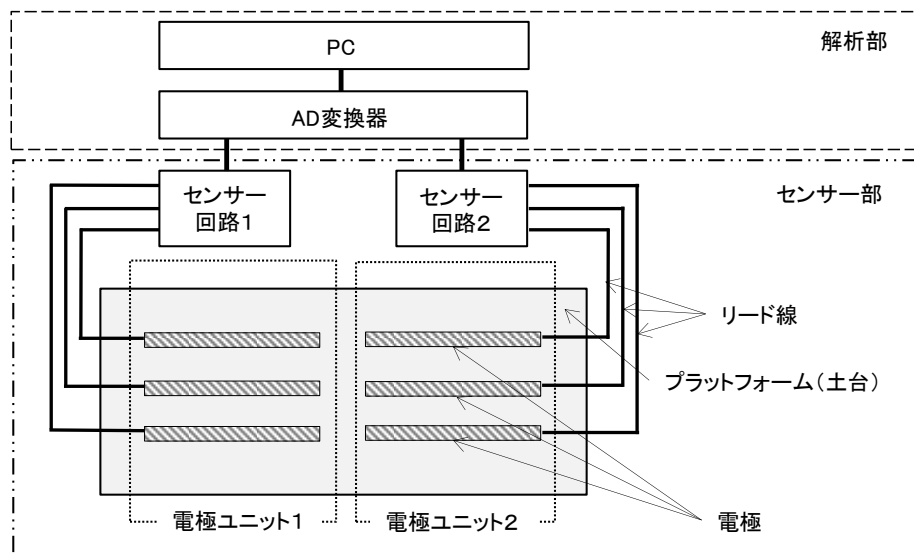


図 3-2-2 魚カウンターの構成

表 3-2-1 各実験河川における魚カウンターの設置条件と対象魚種

	田海川	滝沢川	美利河ダム魚道
電極の長さ	80, 160cm	80, 160, 320cm	80cm
電極間隔	30cm	30cm	20cm
供給電圧	5v	5v	5v
電極上の流速	1.1m/s	0.1m/s	0.7m/s
電極上の水深	20cm	20cm	70cm
プラットフォームの固定方法	単管パイプ	単管パイプ	置き石
設置位置	田海川河口から 200m	滝沢川の河口 から1,500m	美利河ダム魚道
対象魚	サケ	サケ	サクラマス

5cm, 厚さ 3mm, 以下, 電極ユニット) を 2~3 セット並列に貼り付け, 各電極ユニットをリード線により別々のセンサー回路に接続した. 第 2 編第 2 章及び第 3 編第 1 章の研究結果から, 電極間隔は対象とする魚類の体長の 1/2 程度が望ましいことが分かっている. 田海川と滝沢川では, 各電極ユニットの電極間隔を 30cm, 美利河ダムでは大型魚と中型魚の体長の中間をとって電極間隔を 20cm とした (表 3-2-1). 各調査地点でのカウンターの設置状

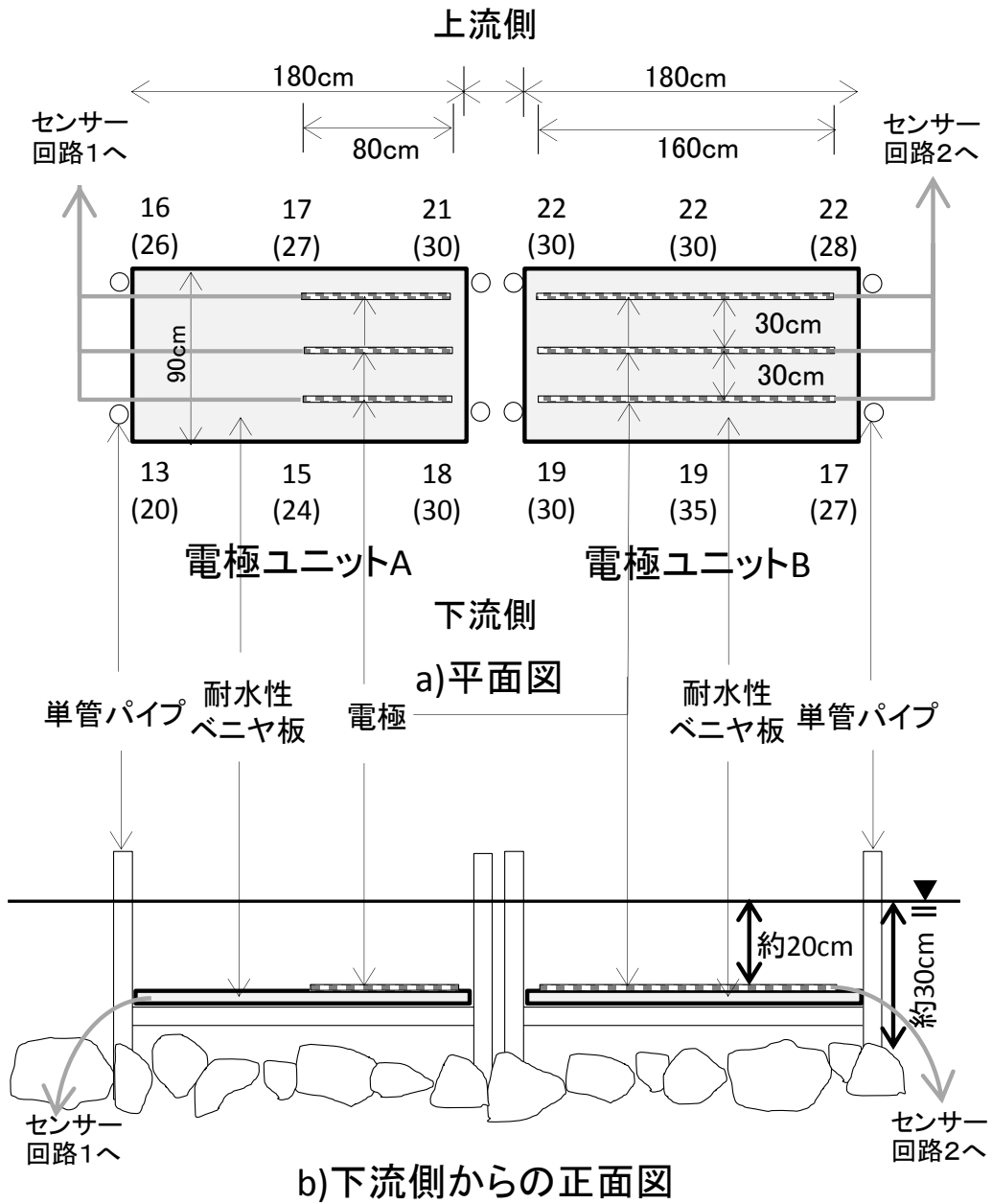
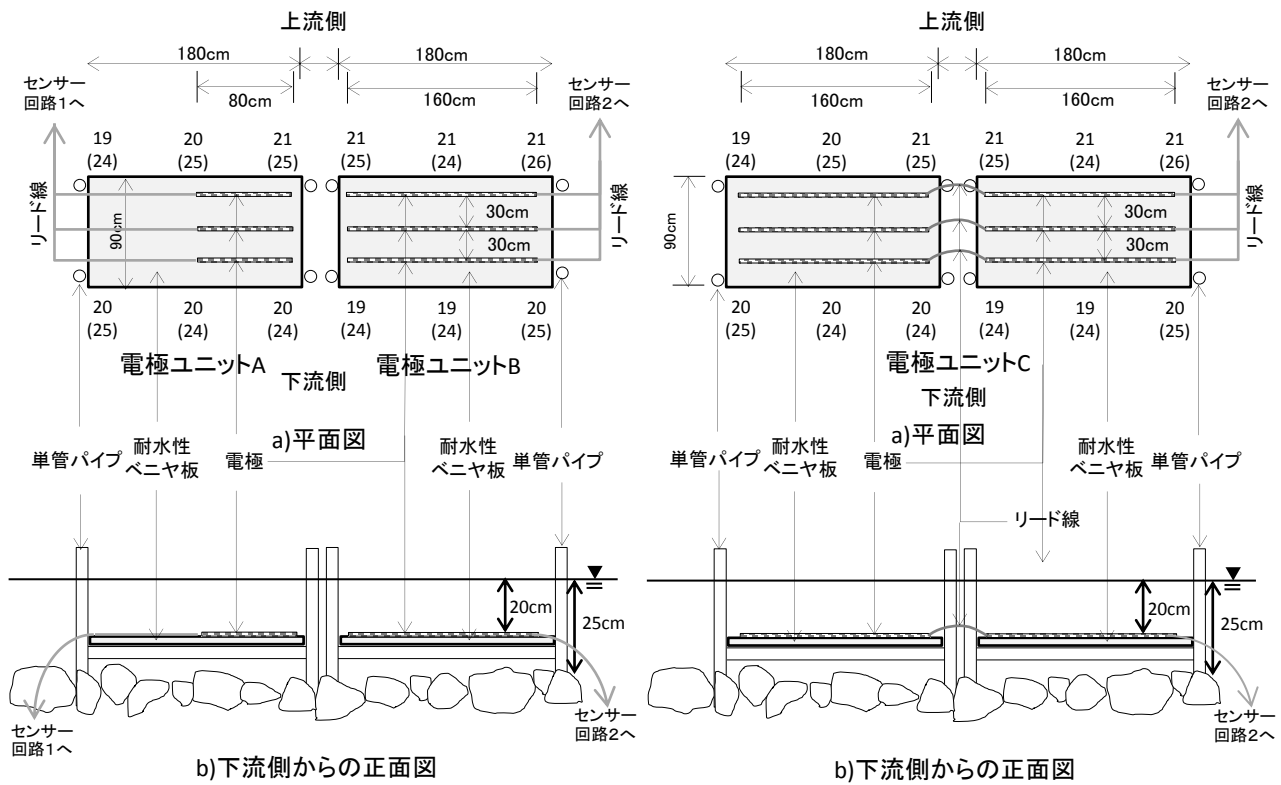


図 3-2-3 田海川に設置したプラットフォームの構造
 (図中の数字は耐水ベニヤ板上の水深, 括弧内は河床の水深, 単位 cm)



a 2009年12月12日
 ※電極ユニットA・Bを設置

b 2009年12月13日
 ※電極ユニットBを連結した電極ユニットCを設置

図 3-2-4 滝淵川に設置したプラットフォームの構造
 (図中の数字は耐水ベニヤ合板上の水深, 括弧内は河床の水深, 単位 cm)

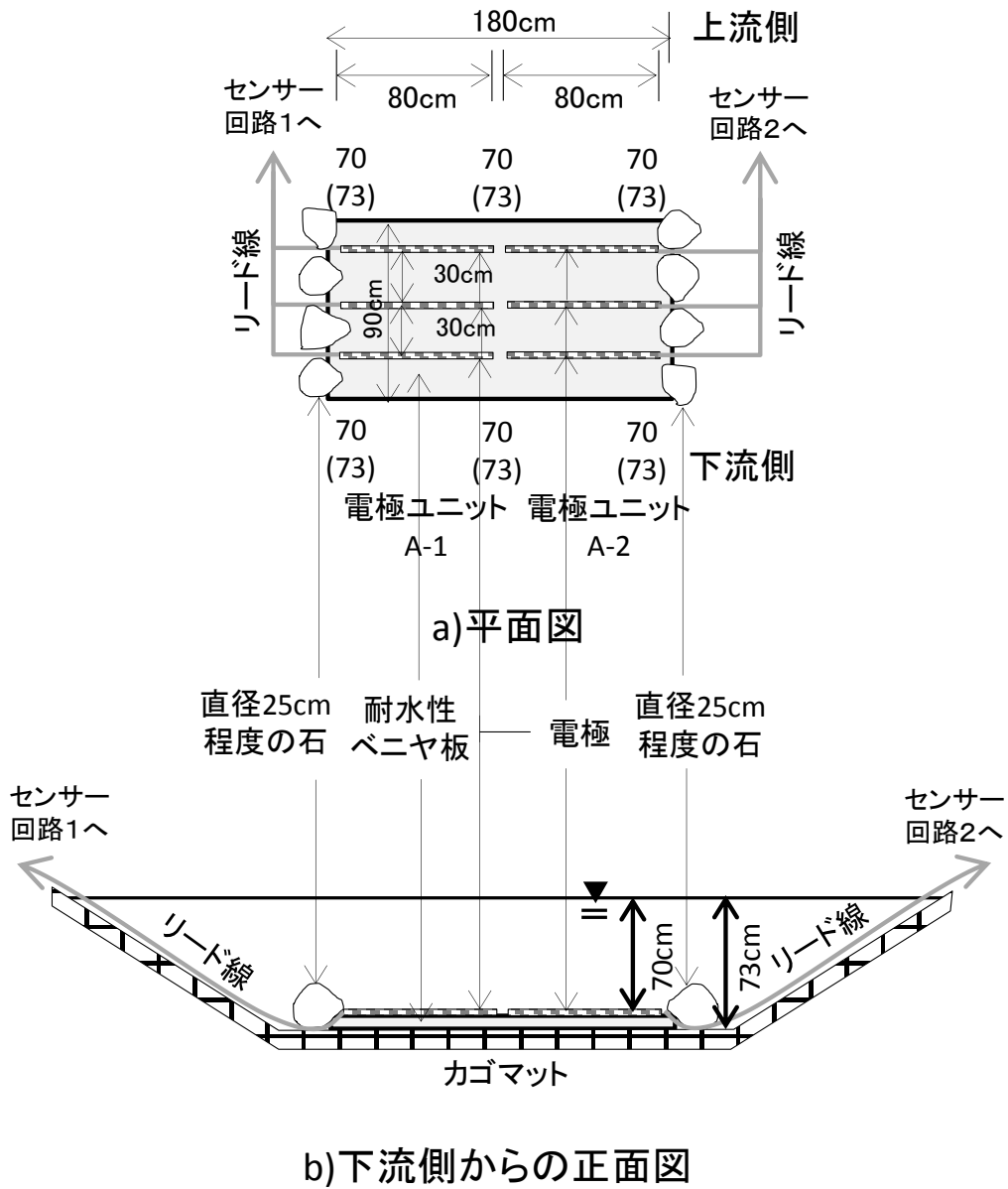


図 3-2-5 美利河ダム魚道に設置したプラットフォームの構造図
 (図中の数字は耐水性ベニヤ板上の水深, 括弧内は河床の水深, 単位 cm)

表 3-2-2 各実験河川における電極長さ別のノイズの振幅と計数対象としたパルス波の振幅

対象河川・魚道	電極の長さ					
	80cm		160cm		320cm	
	ノイズの 振幅	計数対象とした パルスの振幅	ノイズの 振幅	計数対象とした パルスの振幅	ノイズの 振幅	計数対象とした パルスの振幅
田海川	0.06v	0.12v以上	0.03v	0.06v以上	-	-
滝淵川	0.03v	0.06v以上	0.03v	0.06v以上	0.02v	0.04v以上
美利河ダム魚道	0.03v	0.06v以上	-	-	-	-

況を図 3-2-3~図 3-2-5 に示す。

田海川、滝淵川では、プラットフォーム上の水深がほぼ均一になるように河床を整形した後、コンパネを 2 枚並列に並べ、河床に打ち込んだ単管パイプで固定してプラットフォームとした。プラットフォーム上の水深は両河川ともに約 20cm、流速はそれぞれ 1.2m/s、0.1m/s であった (図 3-2-3, 3-2-4)。美利河ダム魚道では、コンパネ 1 枚を河床に置き、その上に直径 25cm 程度の丸い形状の石を置き河床に固定してプラットフォームとした。プラットフォーム上の水深は約 70cm、流速は 0.7m/s であった (図 3-2-5)。

田海川では、プラットフォーム上に、電極ユニット A (電極の長さ 80cm)・電極ユニット B (電極の長さ 160cm) を、滝淵川では、2009 年 12 月 12 日には電極ユニット A (電極の長さ 80cm)・電極ユニット B (電極の長さ 160 cm) を、2009 年 12 月 13 日には電極ユニット B を 2 つ連結した電極ユニット C (電極の長さ 320 cm) を、美利河ダム魚道では電極ユニット A1, A2 (それぞれの電極の長さ 80cm) を設置した (図 3-2-3~3-2-5)。

利根大堰の魚道でサケを計数した際と同様に両端の電極に安定化電源 (株式会社エー・アンド・ディ社製: 直流安定化電源 AD-8735A) により 5v を印圧した。魚カウンターの電位の計測には AD 変換器として PICO Technology 社製オシロスコープ PICOSCOPE2202 (垂直軸分解能 8 bits) を、サンプリングレート 0.1sec, 入力レンジ -5V~+5V に設定して使用した。AD 変換器の出力するデータを PicoLog Data logging software を利用して PC に取得し記録した。記録したデータを CSV にエクスポートして図化し、目視によりパルス波が発生

した（＝魚が通過した）時刻を求めた。同時に、魚の通過方向（遡上または降下）により、発生するパルス波の形状が反転する性質を利用し、魚の通過方向を識別した。また、魚カウンターによる計数期間中に電極付近を撮影したビデオ映像から、魚が電極上を通過した時刻、通過形態を求めた。また、ビデオ映像中の電極の間隔をスケールにして、通過魚の体長を 10cm 単位で計測した。ビデオ映像から得られた計数結果と魚カウンターによる計数結果を次式に代入することにより、魚カウンターによる魚類の計数精度（カウント率 CR）を求めた。

$$CR = (N_c / N_v) \times 100(\%) \quad (3-2-1)$$

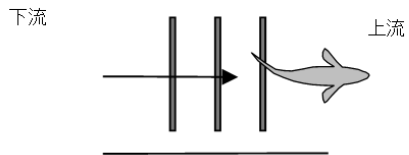
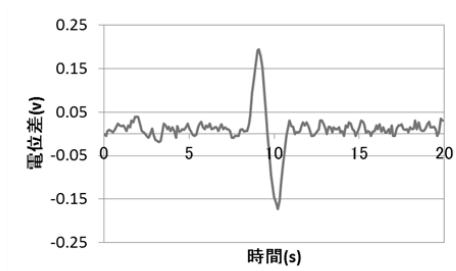
ただし、 N_c ：魚カウンターにより計数された遡上数（尾）、 N_v ：ビデオ映像から計数した遡上数（尾）。

計測に先立ち、絶縁体の棒に固定した魚の死骸を、センサー上を移動させる予備実験をすべての計測地点で行い、隣接するセンサー同士が干渉しあって計測に支障を来さないことや、隣の電極ユニット上を通過した魚を誤計数しないことを確認した。

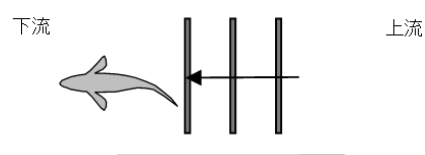
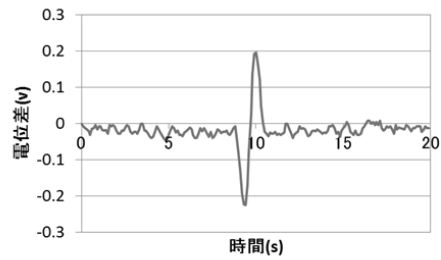
第3節 結果と考察

(1) 魚の通過形態と記録されたパルス波の波形について

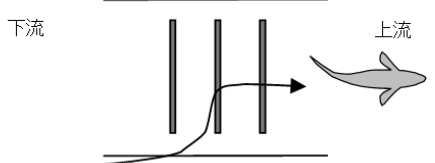
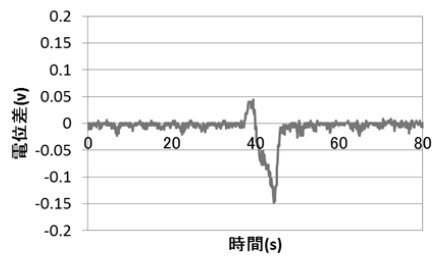
ビデオ映像の解析により、田海川・滝沢川ではサケ、美利河ダム魚道ではサクラマス、ヤマメの通過が確認された。ビデオカメラで撮影された魚類の通過形態には、遡上したケース（図 3-2-6_a）、降下したケース（図 3-2-6_b）、センサー部の側面から電極ユニット内に進入したケース（図 3-2-6_c）、通過中に滞留したケース（図 3-2-6_d）、通過はせずに滞留したケース（図 3-2-6_e）の他、複数が同時に遡上または降下し、パルス波が不明瞭な形状となったケース（以下同時通過（図 3-2-6_f）があった（表 3-2-3_a~3-2-3_c）。遡上したケース、



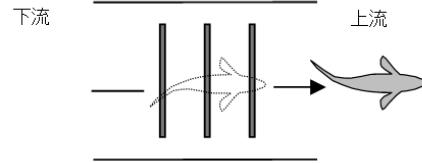
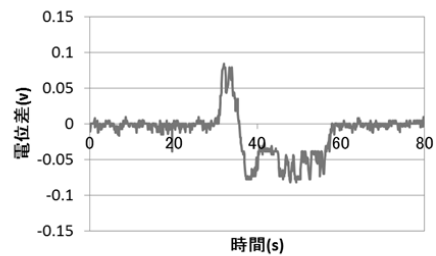
a 遡上したケース



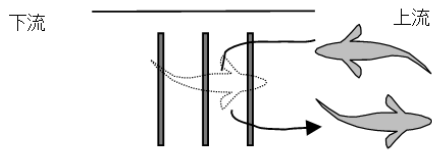
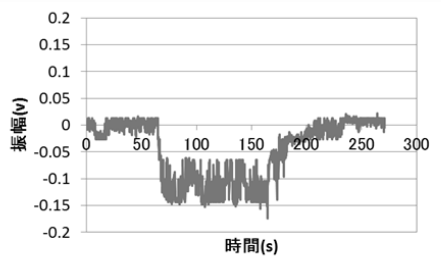
b 降下したケース



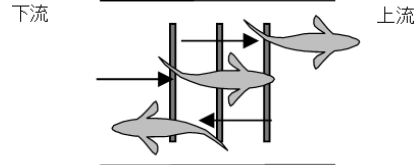
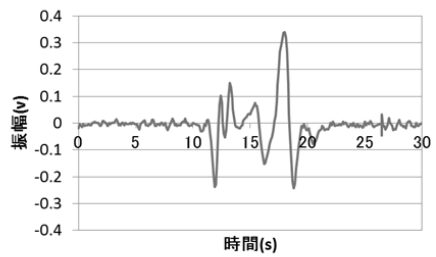
c 側面から侵入したケース



d 通過中に滞留したケース



e 通過途中でUターンしたケース



F 複数が同時に通過したケース

図 3-2-6 電極ユニット上での魚の行動とパルスの形状
(波形は田海川での計測事例)

表 3-2-3_a 田海川における電極センサー上での魚の行動と計数精度の比較

	電極の長さ			
	80cm		160cm	
	総尾数	計数可能尾数	総尾数	計数可能尾数
遡上	21	21	2	2
降下	9	9	2	2
横から進入 (遡上)	2	0	0	0
横から進入 (降下)	0	0	0	0
滞留 (遡上)	8	0		0
滞留 (降下)	0	0		0
計	40	30	4	4
計数精度	75.0%		100.0%	
計数精度 (合計)	77.3%			

(サケ44尾)

表 3-2-3_b 滝淵川における電極センサー上での魚の行動と計数精度の比較

	電極の長さ					
	80cm		160cm		320cm	
	総尾数	計数可能尾数	総尾数	計数可能尾数	総尾数	計数可能尾数
遡上	89	89	123	123	32	32
降下	69	69	97	97	45	45
複数通過 (遡上)	29	12	101	35	29	8
複数通過 (降下)	23	9	71	25	30	8
横から進入 (遡上)	20	0	13	0	2	0
横から進入 (降下)	15	0	11	0	0	0
滞留 (遡上)	3	0	5	0	0	0
滞留 (降下)	3	0	3	0	0	0
Uターン (遡上)	2	0	4	0	0	0
Uターン (降下)	1	0	4	0	0	0
計	254	179	432	280	138	93
計数精度	70.5%		64.8%		67.4%	
計数精度 (合計)	67.0%					

(サケ824尾)

表 3-2-3_c 美利河ダム魚道における電極センサー上での魚の行動と計数精度の比較

	電極の長さ					
	80cm					
	体長70cm		体長30cm		体長20cm	
	総尾数	計数可能尾数	総尾数	計数可能尾数	総尾数	計数可能尾数
	4	4	2	0	14	0
	0	0	0	0	6	0
	4	4	2	0	20	0
	100.0%		0.0%		0.0%	
	15.4%					

(サクラマス26尾)

降下したケースの場合は、パルス波が明瞭で魚類の通過方向の識別は容易であった。しかし、側面から進入したケース、通過中に滞留したケースの場合はパルス波が不明瞭になり、パルス波としての識別が困難であった。また、通過中に滞留したケースのうち、特に田海川のケースでは、センサー上流側での滞留することが多く、台形状の波形が生じた（図 3-2-6_e）。複数が同時に遡上・降下をしたケースでは、ビデオ映像からは通過尾数の計数は可能であったが、パルス波が不明瞭な形状となり、魚カウンターでは計数が困難であった。

(2) 計数精度について

田海川での調査において、ビデオ映像により確認された、電極ユニット上を通過した魚はサケのみであった。今回の調査では幅の狭い電極ユニット B で計測されたノイズの振幅

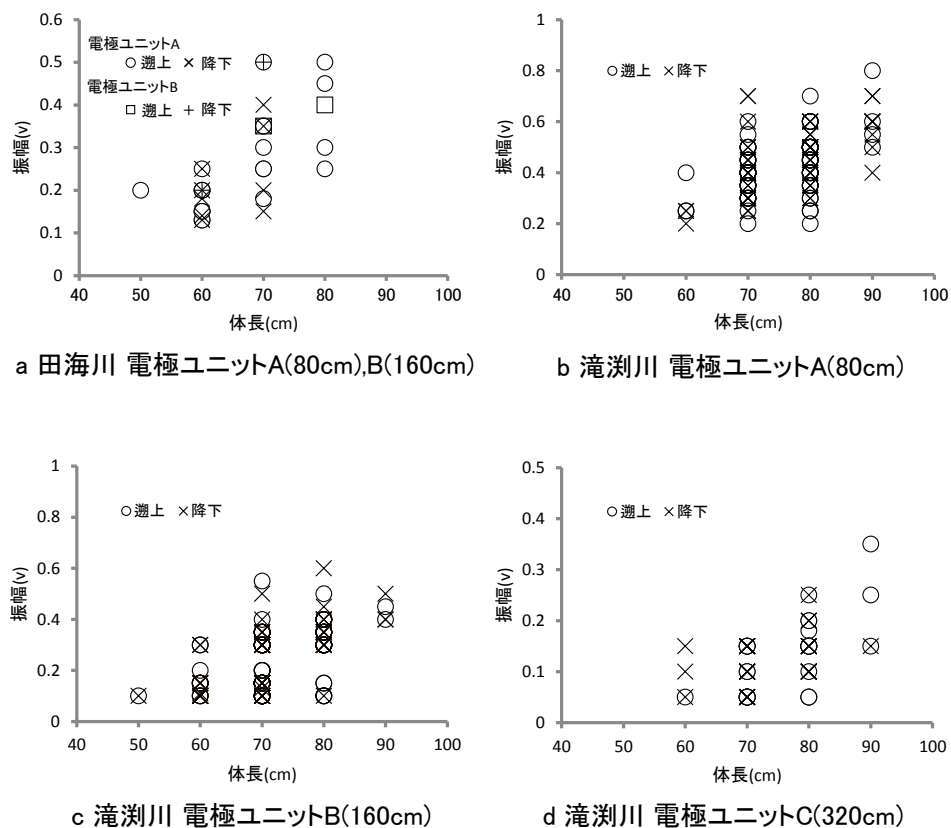


図 3-2-7 各電極ユニット上を通過した魚の体長とパルス波の振幅の関係

が電極ユニット A の約 2 倍であった (表 3-2-2)。ビデオ映像から求めた魚の体長と魚カウンターで計測されたパルス波の振幅との関係を図 3-2-7 に示す。

電極ユニット A では遡上した魚 21 尾, 降下した魚 9 尾, 側面からの進入した魚 2 尾, 通過中に滞留した魚 8 尾, 電極ユニット B では遡上した魚 2 尾, 降下した魚 2 尾, 両電極ユニット合計 44 尾であった (表 3-2-3_a)。これに対し, ビデオ撮影期間に魚カウンターのセンサー回路から出力された識別可能なパルス波 (振幅 0.12v 以上) は電極ユニット A,B 合わせて 34 個あり, いずれも魚の遡上, 降下時に発生したものであった。魚カウンターによる計数精度は $34 \div 44 \times 100 = 77\%$ となり, ある程度の精度でサケの通過を計数できた。しかし, 第 3 編第 1 章の研究結果と比較すると約 20 ポイント低い精度となった。魚がセンサー部側面からの進入した場合とセンサー上で滞留した場合には, パルス波が不明瞭となり魚数を計数できない場合があったことが計数精度を低下させた原因であった。

また, 魚体が大きくなるほど, パルス波の振幅が大きくなる結果となっている (図 3-2-7_a)。この結果は第 2 編第 2 章, 第 3 編第 1 章の研究結果と一致した。

滝淵川での調査では, 各ユニットでのノイズの振幅に大きな違いは見られなかった (表 3-2-2)。電極ユニット A (電極の長さ 80cm) では遡上した魚 89 尾, 降下した魚 69 尾, 側面から電極ユニットに進入した魚 35 尾, 通過中に滞留した魚 6 尾, 電極ユニット上で U ターンした魚 3 尾, 複数尾で同時に通過した魚 52 尾 (23 ケース), 電極ユニット B (電極の長さ 160cm) では遡上した魚 123 尾, 降下した魚 97 尾, 側面から電極ユニットに進入した魚 24 尾, 通過中に滞留した魚 8 尾, 電極ユニット上で U ターンした魚 8 尾, 複数尾で同時に通過した魚 152 尾 (68 ケース), 電極ユニット C (電極の長さ 320cm) では遡上した魚 32 尾, 降下した魚 45 尾, 側面から電極ユニットに進入した魚 2 尾, 複数尾で同時に通過した魚 59 尾 (20 ケース) であった (表 3-2-3_b)。

各電極ユニットともに、電極ユニット上をスムーズに通過した魚はすべて計数できた。各電極ユニットでの計数精度はユニット A:70.5%, ユニット B:64.8%, ユニット C:67.4%で、全ユニットをあわせたサケの計数精度は 67.0%となり、計数精度が低かった。複数尾同時に通過した場合と側面からの進入した場合に計数できなかったことが大きく計数精度を低下させている原因となった。

また、図 3-2-7b~3-2-7d より、田海川での計測結果と同様に、遡上魚と降下魚ともに、魚体が大きくなるほどパルス波の振幅が大きくなる結果となった。

美利河ダム魚道においての計数期間中、ビデオカメラにより通過が確認された魚は、サクラマス 4 尾と、体長 20cm のヤマメ 20 尾、体長 30cm のヤマメまたはサクラマス 2 尾であった (表 3-2-3_c)。サンプル数は少ないものの、体長 70cm のサクラマスについては全て計数できた。しかし、体長 30cm 以下の魚類については、全く計数できなかった。

(3) センサー部の諸元が計数精度に与える影響

田海川では、電極ユニットの電極の長さは、80cm, 160cm (順に電極ユニット A,B) の 2 通りであった。電極ユニット B 上を通過する魚数が少数であったため、電極の長さによる計数精度の相違について比較検討できなかった。

滝沢川では、電極ユニットの電極の長さは、80cm,160cm,320cm (順に電極ユニット A,B,C) の 3 通りであった。全てのユニットで、魚体が大きくなるほど、パルス波の振幅が大きくなることがわかった。また、電極の長さが小さくなるほど、パルス波の振幅が大きくなることがわかった。これらの結果は、第 2 編第 2 章で水路の幅を変えて行った室内実験の結果と一致していた。

滝沢川の調査結果より、電極ユニット上の水深が 20cm 程度であれば、長さ 320cm の電極を用いても、同時通過や側面から進入するなどのイレギュラーな行動をとらなければ、体

長 60cm 以上の魚を高い精度で計数可能であることが示唆された (図 3-2-7, 表 3-2-3_b).

今回の調査では, 田海川, 滝淵川ともに電極ユニット上の水深は約 20cm だったのに対し, 美利河ダム魚道では約 70cm だった. 美利河ダム魚道においては, 体長 20~30cm の魚が電極ユニット上を通過するのが観察されたが, パルス波は発生しなかった. また, 計数期間中 10cm 程度の魚が電極ユニット上を行き来していたが, 回路から出力される波形には変化は見られなかった.

第 2 編第 2 章の実験の結果から, 全水深が大きくなるほど, 魚の遊泳高度 (電極ユニットからの距離) が高くなるほど, パルス波の振幅が小さくなること, 水路幅 (電極の長さ) が大きくなるほどパルス波の振幅が小さくなることがわかっている.

美利河ダム魚道で, 体長 20~30cm の魚が通過した際にパルス波が発生しなかった原因は, 電極の長さが 80cm と通過した魚の体長に対して長すぎたことに加え, 全水深が大きく, 遊泳高度が高かったため, パルス波の振幅が小さくなったためであると推測される.

今回の計数できなかつた, 体長 20~30cm 程度の小型の魚類を計数できるようにするためには, 全水深を小さくすることで魚の遊泳高度を低くし, さらに電極を短くすることによりパルス波の振幅を大きくする必要があると考えられる. 第 3 編第 1 章で行った調査では, 電極の長さ 85cm, 電極ユニット上の全水深 27cm で体長 40cm のフナ類のパルス波が計測されている. この結果から, 体長 40cm 未満の魚を計数するためには, 少なくとも電極の長さを 85cm 未満, 全水深を 27cm 未満にする必要があると推測されるが, 具体的な条件についてはまだ十分に検討されていない.

また, 電極間隔については, 第 2 編第 2 章の実験結果によると電極間隔は対象とする魚類の体長の 1/2 程度が望ましいとされている. しかし, 今回の調査対象地のように, 計数対象とする魚種が複数存在し, その体長が異なる場合での最適な電極間隔については検討さ

れていない。

今後は、対象魚種の体長に合わせた最適な電極の長さ、最適な全水深、最適な電極間隔について検討し、その成果をもとに複数種の魚を計数対象とする場合のセンサー部の条件を検討する必要がある。

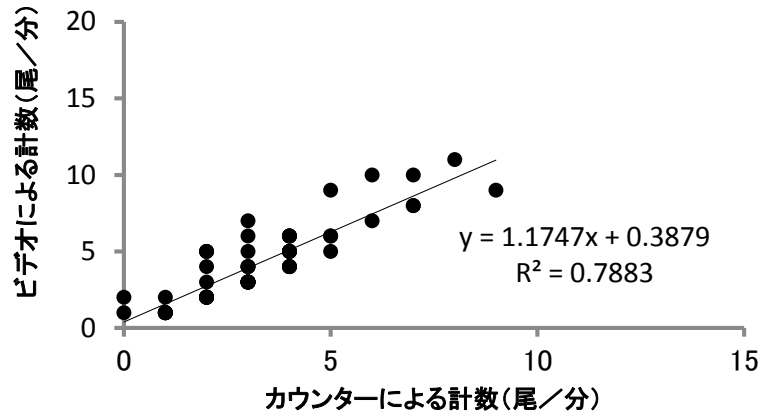
(4) 計数精度を上げるための対策

滝淵川では、複数尾の魚が同時に電極ユニット上を通過すること（以下同時通過とする）が、計数精度を低下させる最大の原因となった。第4編第2章で行ったアユの稚魚を対象とした魚カウンターによる計数実験でも、同時通過が発生した場合計数精度が低下する結果となった。第4編第2章では、同時通過による計数精度の低下を抑えるための対策として、次のような補正方法を提案している。

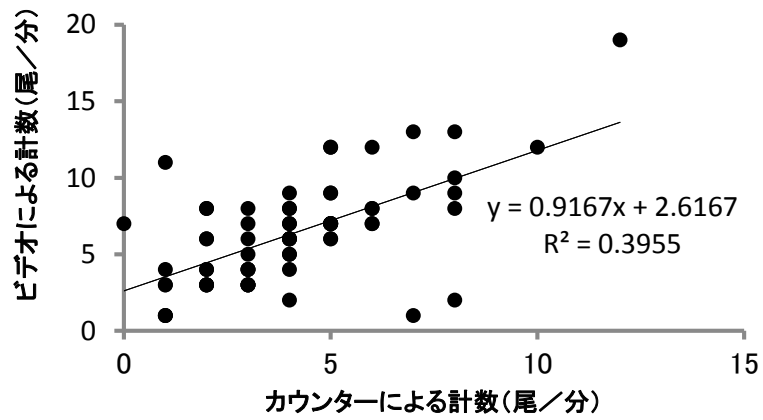
- 1) 1分間あたりの通過数が30尾未満の範囲ではカウント率CRがほぼ100%のため、カウンターの計数値をそのまま用いる。
- 2) 単位時間あたりの通過数が30尾以上の場合、カウンターで計数される通過数と実際の通過数（＝ビデオ映像から求めた通過数）の関係を表す近似式をあらかじめ求めておき、その式を用いてカウンターの通過数を補正する。
- 3) 補正後の値を積算し、数10分毎の通過数を求める。

第4編第2章では、この補正方法により、小型魚が大量に遡上し同時通過が発生している場合であっても、数10分毎の通過数であれば、高い精度で計数できると考察している。

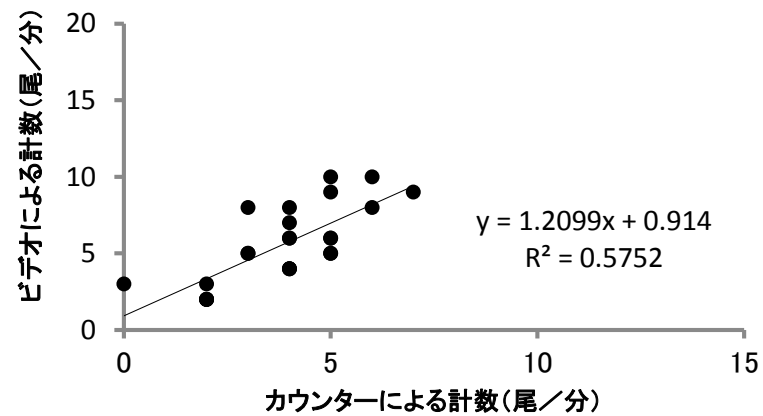
ここで、滝淵川のケースでも第4編第2章の補正法が適用可能かどうか検討することにする。図2-3-8にカウンターの遡上数の計数値とビデオ映像から求めた通過数の計数値の関係を示す。第4編第2章でのアユの稚魚を対象とした研究では、1分間あたりのビデオの通過数が50尾未満の範囲では、ほとんど同時通過は発生せず、補正前のデータを用いた場合



電極ユニットA(80cm)の場合



電極ユニットB(160cm)の場合



電極ユニットC(320cm)の場合

図 3-2-8 電極ユニット別のカウンターによる計数値とビデオによる計数値の関係

でも CR の平均値は 90% 程度であり、データの分布を表す近似式の決定係数 R^2 は 0.98 と非常に高い結果であった。これに対し、本研究では、ビデオから求めた 1 分間当たりの遡上数が 12 尾未満と少ない範囲でも同時通過の占める割合は高く、CR は、電極ユニット A（電極の長さ 80cm）の場合 77.2%，電極ユニット B（電極の長さ 160 cm）の場合 64.6%，電極ユニット C（電極の長さ 320 cm）の場合 69.1% と低く、データの分布を表す近似式の決定係数 R^2 は電極ユニット A の場合 0.79，電極ユニット B の場合 0.40，電極ユニット C の場合 0.58 と低い値となった。

同時通過が発生した場合、魚カウンターでは、複数尾の魚を 1 尾の魚と計数してしまうため、計数値が実際の値よりも少なくなる。さらに同時通過する魚数やそれぞれの魚がセンサーを通過するタイミングのばらつきによって、計数誤差のばらつきが生じる。第 4 編第 2 章での補正法では、計数値の減少を補正式で補正し、さらに補正後の値を累積することにより、計数誤差のばらつきを相殺し、計数誤差を相対的に小さくしている。滝淵川の場合は、通過数が一分間あたりの通過数が 0～12 尾と少なく、このように少ない範囲であっても、同時通過する魚の数のばらつきが大きいため、この手法を適用し計数精度を向上させることは難しいと考えられる。

滝淵川における電極ユニット幅毎の同時通過の割合を表 3-2-4 に示す。

表 3-2-4 滝淵川における電極ユニット別のサケの同時通過の割合 (%)

	電極の長さ		
	0.8m	1.6m	3.2m
同時通過の割合	20.5%	39.8%	42.8%

電極ユニットの幅が広がるほど同時通過率が増加することがわかる。この結果は、同

時通過の頻度を低下させるためには、電極ユニットの幅を狭くすることが有効であること
を示唆している。また、滝淵川において同時通過が生じたのは、電極ユニット上の流速が
遅かったため、魚が群れを成してユニット上を通過しやすかったことも一因だと想像され
る。したがって、計数精度を高めるためには、電極ユニットの幅を狭くし、電極ユニット
上の流速を上げることにより、同時通過の頻度を低下させることが必要であると思われる。
しかし、河川を移動する魚を漏れなく計数するためには、川幅全体をカバーするように電
極ユニットを並べる必要があり、電極ユニットの幅を小さくするほど必要なユニット数が
多くなり、維持管理の負担や設置コストの増大につながる。今回の研究結果からは、体長
60cm 以上の魚の同時通過を軽減するためには電極ユニットの電極の長さを 80cm 程度にす
ることが適当と推測されるが、電極ユニットの電極の長さの最適値については、計数する
河川の規模に応じて、計数精度、設置コストや維持管理の負担を総合的に勘案し検討する
必要がある。

田海川、滝淵川では電極ユニット上で魚が滞留することで計数精度が低下した。田海川
において、魚が滞留した場所は、電極ユニット上と電極ユニット上流側であった。このよ
うに滞留したのは、センサー上の流速が 1.2m/s と、第 3 編第 1 章での利根大堰 3 号魚道で
の調査と比較すると小さかったこと、センサー部のコンパネから河床まで 10cm 程度の段差
があり、その段差部分で流れが滞っていたことが原因だと推測された（図 3-2-9a）。また、
滝淵川の調査では、河川の流量が少なく河川の流速が 0.1m/s と小さかったことが、電極ユ
ニット上での滞留につながったと考えられた。魚が電極ユニット付近で滞留することを防
止するためには、電極ユニットを河川の流速が速い箇所に設置することにより、またはプ
ラットフォーム部を台形にするなどの改良を行い、電極が設置されている位置を高くし、
水深を小さくすることにより、電極ユニット上の流速を速くする（図 3-2-9b）、プラットフ

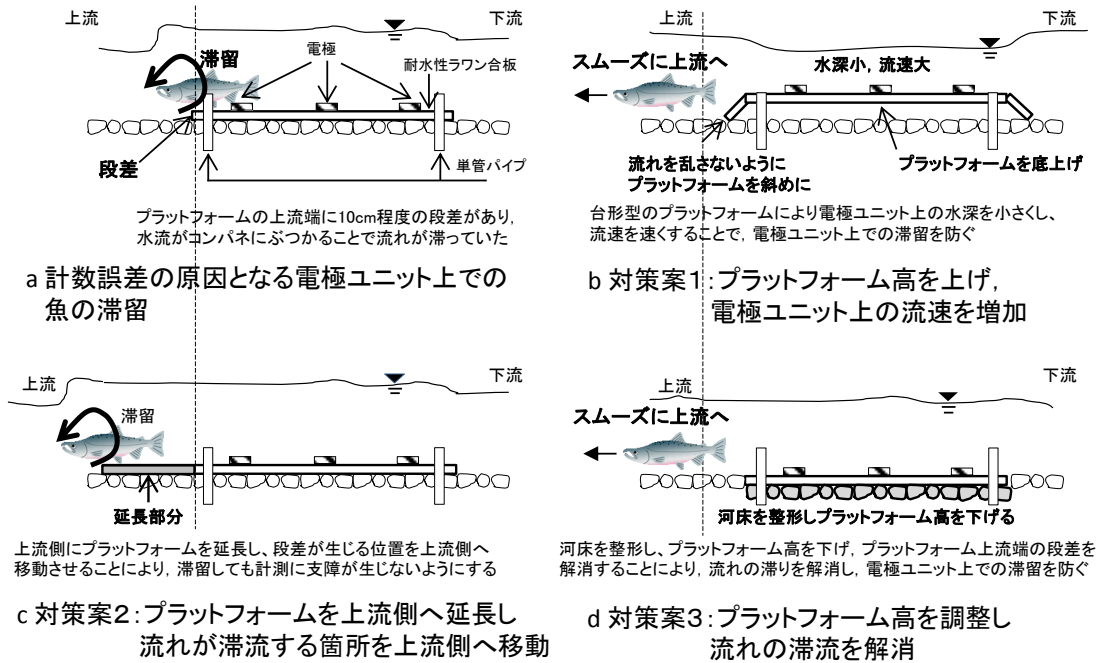


図 3-2-9 魚の滞留を防ぎ計数精度を向上させるための対策

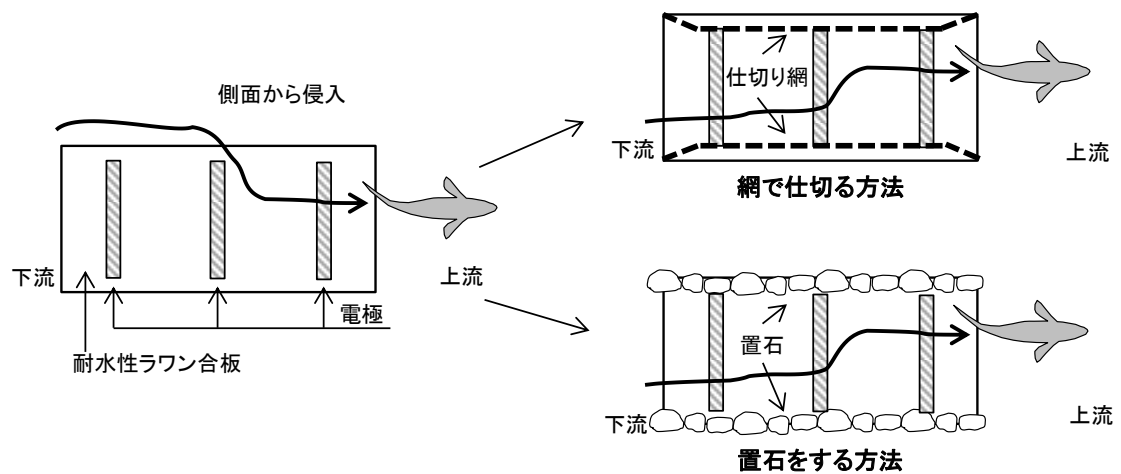


図 3-2-10 魚の側面からの進入を防ぎ計数精度を向上させるための対策

フォームを上流側に延長し段差が生じる箇所をより上流側に移動させる（図 3-2-9c）、上流側の段差を解消し流れを滞らせないようにする（図 3-2-9d）といった改良が必要だと考えられる。ただし、プラットフォーム上の流速を過度に大きくすることは、魚の遡上を阻害することにつながるため、滞留を防ぐと同時に魚の遡上を妨げない流速がどの程度なのか、現地計数により今後検討する必要がある。

また、田海川、滝淵川では魚が側面から電極ユニットへ進入することも計数精度を低下させる主な原因の一つとなっている。側面からの魚の進入を防止するためには、電極ユニット側面に網や置き石などを設置することが必要であると考えられる（図 3-2-10）。

美利河ダム魚道において、30cm 未満の中型魚・小型魚が計数できなかった。これは、60cm を超える大型魚と比べて魚体が小さく、魚の通過に伴う電極間の電気抵抗の変化が小さかったため、振幅の大きなパルス波が発生しなかったことが原因と考えられる。第 2 編第 2 章の実験結果により、印加電圧が大きい方が、振幅の大きなパルス波が発生することが報告されている。本研究では、センサー部に 5v の電圧を印加したが、魚がセンサー上を通過する際に感電したり、急に遊泳方向を転換し電極を避けたりする行動はみられなかった。既往の研究でも、印加電圧が 5v の場合に、センサー部で魚が電極を忌避したという報告は見当たらない（河林，2009；近藤・権田，2012）。体長 60cm 以上の大型魚と体長 60cm 未満の中型、小型の魚類を同時に計数するためには、魚類の行動に影響を与えない範囲で印加電圧をなるべく大きくすることが有効だと思われる。今後は、印加電圧を大きくした場合に魚類が受ける影響と計数精度について検討する必要がある。

(5) 魚カウンターセンサー部プラットフォームの設置方法

本研究の調査対象である 3 河川の水利条件は、田海川：水深約 30cm，流速約 1.2m/s，滝淵川：水深約 27cm，流速約 0.1m/s，美利河ダム：水深約 70cm，流速約 0.7m/s であった。

田海川、滝淵川については河床に打ち込んだ単管パイプにプラットフォームを固定する方法で、美利河ダム魚道についてはプラットフォーム上に石を置く方法でプラットフォームを河床に固定した。その結果、今回の計数期間においてはプラットフォームが流れに対して十分固定され、安定して計数することができた。つまり今回のプラットフォームの設置方法は、短期間の計数であれば、プラットフォームを河床に単管パイプで固定する方法では水深 30cm、流速 1m/s 程度まで、石を置いて固定する方法では水深が 70cm、流速 1m/s 程度までは有効であった。

しかし、前述のとおり、電極ユニット上のサケの滞留の頻度や、同時通過の頻度を軽減し、カウンターによる計数精度を向上させるためには、前述したように、プラットフォームの形状を改良することで、できるだけプラットフォーム上の流速を速くし、プラットフォーム周辺で流れが滞留しないようにすることが必要となる。今回調査対象とした 3 河川のうち、センサー上の流速が 1.2m/s と大きかった田海川でもセンサー上でのサケの滞留が見られたことを考慮すると、センサー上の流速は流速 1.2m/s 以上にする、あるいは流速 1.2m/s 以上の箇所にプラットフォームを設置することが望まれる。

前節で提案したようにプラットフォームの形状を改良する場合には、単管パイプや置き石による設置方法に問題が生じないか検証する必要がある。また、今回の計数よりも長期にわたって計数を継続する場合、河川の流況が変化し、それにとまってプラットフォーム上の水位が過小または過大になり計数が困難になる、プラットフォームが流出・破壊される等の問題が生じる可能性がある。今後は長期計数を見据えて、例えばプラットフォームの素材にコンパネではなく、強化プラスチックを用いることにより、プラットフォームの強化をはかる、プラットフォームの固定方法を長期の設置に耐えうるようなものに変更する、流況の変動が計数精度に与える影響を明らかにし計数精度の低下を抑える手法を考案

する等の対策をはかっていく必要がある。

また、計数精度を上げるためには電極ユニットの幅を小さくして、川幅をカバーするように複数のユニットを並列に並べる方法が有効であると考えられるが、カウンターの運用コストと計数精度の両面から、最適な設置台数、設置方法を今後検討していく必要がある。

第4節 まとめ

本章では、河川の魚道の存在しない区間での魚カウンターを用いた魚数計数を実現すること目的に、小河川の魚道の存在しない区間の河床や、実河川の河床形を模倣した多自然魚道に魚カウンターセンサー部プラットフォームを設置し、河川を移動するサケやサクラマス数を計数し、魚カウンターの計数精度、現地計数の際に生じる問題を検討した。

その結果、サケやサクラマスなどの体長 50cm を超える大型魚については 70% 以上のある程度の精度で計数することができた。

現地計数で、魚カウンターの計数精度が低下した主な理由には、以下の項目が挙げられる。

- ・電極ユニットの側面から魚類が進入した
- ・センサー上、センサー周辺で魚類が停滞した
- ・複数の魚類が同時に電極ユニット上を通過した。特にセンサー幅が大きな場合に多発した

た

- ・水深が過大であった

そのため、今回のように体長 70cm 程度のサケ、サクラマスを計数対象とした場合、センサー部プラットフォームを設置する際には、複数の魚の同時通過を防ぐために電極ユニットの電極の長さは 80cm 程度にし、複数の電極ユニットを並べることにより川幅全体をカバーするようにすること、電極ユニット上の水深が 20cm 程度で維持されるようにプラットフ

ホームの設置場所を選定，設置を工夫することが必要となる．また，各電極ユニットの側面に仕切りを設けるなどして魚が必ず電極ユニット上を通過するようにすること，電極ユニット付近での滞留を防ぐために，プラットフォームと河床との段差を無くす，センサー上の流速を魚の遡上の障害にならない程度に速くすること等の工夫も必要となる．

第4編 小型魚の計数を目的とした魚カウンターの開発

第1章 室内実験による小型魚用魚カウンターセンサー部の検討

第1節 実験目的

第3編にて、現地計数により大型魚（サケ）用の魚カウンターの実用性が示された。しかし、魚道を利用する魚類にはイワナやヤマメ、アユやカジカなど体長10~20cm程度の魚類も多い。これら小型の魚は、センサー部を通過した際の電極間の電気抵抗の変化が小さい。そのため、従来の魚カウンターでこれらの小型魚を計数しようとした場合、回路から出力されるパルス波の振幅が小さく、回路から常時出力されているノイズとの識別が難しいため、小型魚の計数は難しい。従って小型魚を計数可能な魚カウンターを実用化するためには、パルス波が識別しやすくなるように、ノイズの振幅に対してパルス波の振幅を相対的に大きくなるよう、魚カウンターのセンサー部を改良することが重要となる。

パルス波の振幅に関しては、第2編第2章の室内実験により、サケ用の魚カウンターに使用されている平棒型電極よりも、棒型電極を用いた方がパルス波の振幅が大きくなること、棒型の電極の大きさを小さくするほどパルス波の振幅が大きくなることが明らかにされている（表2-1-3, 2-1-4）。さらに、高さ20cm×幅20cmの棒型電極（電極の大きさは以下、高さ×幅の形で表記）に12vの電圧を印加した場合には、体長10cmの魚を計数可能であることが分かっているが、このように高い電圧を印加すると魚が感電し、遡上を阻害することになる。欧米でサケの計数用に使用されている電圧は5vであるが、20cm×20cmのアルミ製棒型電極に5vの電圧を印加しても、体長10cmの魚は計数できない。体長10cm~20cmの魚を5v程度の電圧で計数するためには、20cm×20cmの棒型電極よりも大きさの小さな電極が必要だと考えられるが、具体的な棒型電極の大きさや印加電圧等については検討されていない。また、従来の研究では電極の素材には入手が容易なアルミを用いて

きた。入手が容易な電極にはアルミの他に銅やステンレスがある。電極に使用する素材によって、パルス波の振幅の大きさが変化すると推測されるが、これらの金属のうち、センサーユニットを構成するのに適した電極素材は分かっていない。さらに、20cm×20cm よりも大きさの小さな枠型電極を計数に用いる場合には、一般に50cm以上はある魚道の水路の全幅を単一の電極ではカバーできず、単一の魚カウンターでは水路を通過する小型魚の全数を計数できないという新たな問題が生じる。水路幅すべての断面で通過する魚を計数するため、絶縁性のカバーで囲んだ枠型電極（以下センサーユニット）を、水路幅横断方向に複数個並列に設置し、各ユニットを通過する魚を個別のセンサー回路で計数するユニット型魚カウンター（図4-1-1）を考案した。

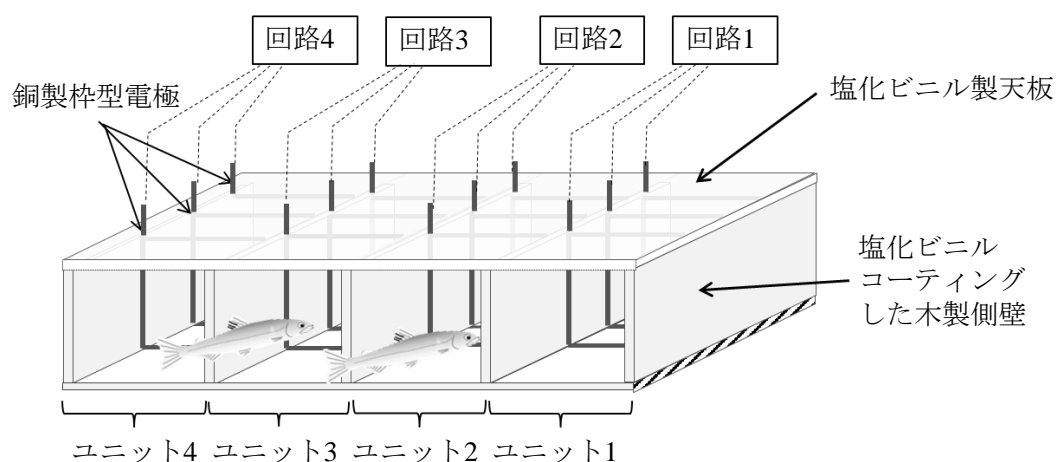


図 4-1-1 ユニット型魚カウンター（4 ユニット連結型の例）

電極を絶縁体で囲む目的は、以下の3つである。

- ・電極を固定して電極が流水により振動することで発生するノイズを防ぐ
- ・魚がユニットの途中でユニット外へ移動することを防ぐ

・ユニットの内部を外部から電氣的に隔離し、外側を通過した魚を誤計数するのを防ぐ
しかし、この目的にかなう絶縁性のカバーの最低限必要な長さについては分かってない。

そこで本研究では、10cm 程度の小型魚を計数可能なユニット型魚カウンターのセンサー部の諸元を室内実験により検討する。

第2節 実験の概要および結果

(1) 供試体にソーセージを用いた場合とワカサギを用いた場合のパルス波の振幅の比較

従来の室内実験では、筆者らは入手の容易なワカサギ等の死魚を供試体として用いてきた。死魚からは電解質が溶出するためだと推測されるが、同じ供試体を長時間実験に用いた場合は、時間の経過とともに供試体の通過にともない魚カウンター回路から出力されるパルス波の大きさが減少することが判明している。このため、従来は実験ケース毎に供試体を交換するなどの方法で実験を行ってきたが、実験ケースが多くなる場合、同様な形状（体高、体長、肉のつき方など）の魚体を実験ケース数と同じ尾数用意することは難しい。そのため、本研究では、実験の信頼性を維持するために、形状が均質で入手が容易な市販のソーセージ（以下ソーセージ）を供試体に用いて実験を行うこととした。しかしソーセージと魚の死体では、形状が同様であってもパルス波の振幅が異なる。そこでまず、供試体にワカサギ（体長8cm×体高1cm×幅5mm）とソーセージ（長さ8cm×高さ2cm×幅5mm）の2種類の供試体を用いて、絶縁された棒に固定した供試体を0.1m/sの速度でセンサーユニット内を遊泳させパルス波を計測する実験を行った（図4-1-2）。魚カウンターの電位の計測にはAD変換器としてPICO Technology社製オシロスコープPICOSCOPE2202（垂直軸分解能8bits）を、サンプリングレート0.1sec、入力レンジ-5V～+5Vに設定して使用した。AD変換器の出力するデータをPicoLog Data logging softwareを利用してPCに取得し記録し

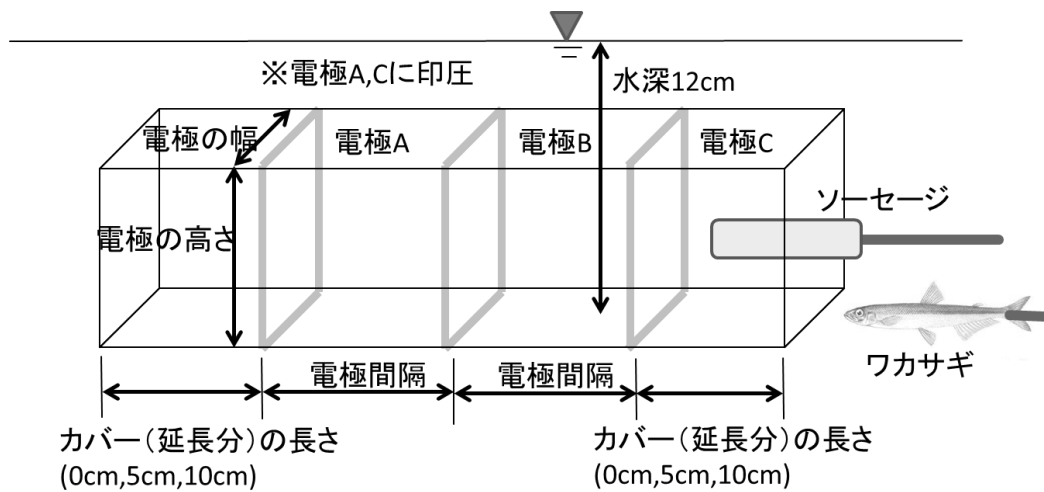


図 4-1-2 センサーユニットを用いた実験の概要

た．記録したデータを図化し，目視によりパルス波の振幅と半周期を計測した．結果を比較し，ソーセージを用いた場合のパルス波の振幅を，ワカサギの死魚を用いた場合の振幅に換算する式を求めた．実験には銅製の 10cm×6cm の枠型電極を電極間隔 5cm で設置したものを用いた．両端の電極に電池により 1.5v, 3v, 5v の 3 種類を印圧した．第 2 編第 2 章の研究結果から，枠型電極の場合，供試体が電極中央付近を遊泳した場合にパルス波の振幅が最小となることが明らかになっている．このため，供試体は電極中央を遊泳させることとした．センサーユニット内部で供試体を遊泳させる試行を各実験ケースにつき 5 回行った．

なお予備実験により，ソーセージを使用した実験では 1 時間毎にワカサギを使用した実験では数 10 分毎に供試体を交換することで供試体の変質の影響が無視できることを確認したため，ソーセージの場合は 1 時間毎に，ワカサギの場合は数 10 分毎に供試体を交換した．また予備実験により，枠型カバー付きの電極を使用した場合，水路の全水深が結果に

与える影響は無視できることを確認したため、以降に行う全ての実験で全水深を 12cm とした。

結果を図 4-1-3 に示す。ソーセージとワカサギのパルス波の振幅の比の平均値は、電圧を変えても 3 で一定であった。一元配置の分散分析の結果、電圧別の振幅の比の間には有意な差は認められなかった。

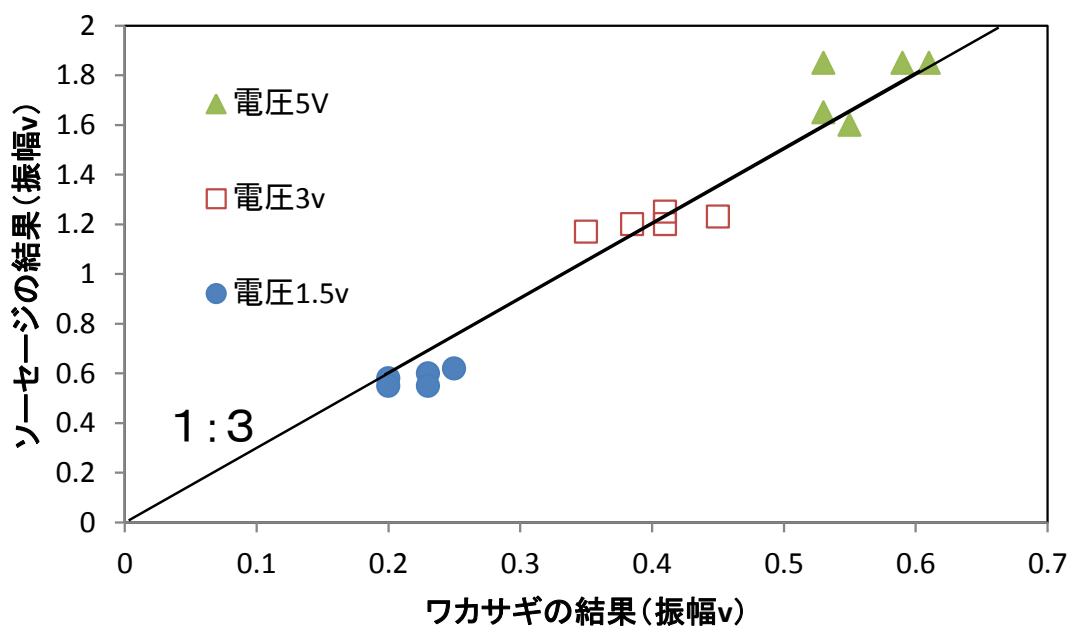


図 4-1-3 ワカサギとソーセージのパルス波の振幅の比較

このため、以降の実験 2~4 では、ソーセージを用いた実験で得られたパルス波の振幅を 3 で除し、ワカサギを使用した場合のパルス波の振幅 (ワカサギ相当値) に換算し、S/N 比 (以下相当 S/N 比) を算出し、各実験ケースで得られたパルス波の明瞭さを示す指標として用いた。

(2) ユニット型魚カウンターのカバーの長さ と 電極の素材の検討

(a) カバー（延長分）の長さの検討

実験には銅製の 10cm×6cm の枠型電極を電極間隔 5cm で設置したものをを用い、5v の電圧を印加した。カバー（延長分の長さ）は 0cm,5cm,10cm の 3 種類とした。絶縁された棒に固定したソーセージを 0.1m/s の速度でセンサーユニット中央部を遊泳させる試行を各ケース 5 回行った。

カバーの長さ と 相当 S/N 比の関係を表 4-1-1 に示す。各実験ケースで計測された計測ノイズは約 0.1v であった。各実験ケースの相当 S/N 比の平均値は約 6 であり、分散分析の結果、各実験ケースの平均値に有意な差は認められなかった。カバー（延長分）の長さの違いがパルス波やノイズの振幅に与える影響は無視できると考えられる。

表 4-1-1 カバー（延長分）の長さ と 相当 S/N 比の関係

カバー(延長分)の長さ(cm)	相当S/N比
0	5.9
5	5.9
10	6

※電極間隔5cm, 電圧5v, 電極の大きさ10cm×6cm, 銅電極の実験結果

(b) 電極の材質の違いが相当 S/N 比に与える影響

10cm×6cm の大きさの電極を銅、アルミ、ステンレスの 3 種類の素材で作成し、電極間隔は 5cm,7.5cm,10cm の 3 種類、電圧は 1.5v,3v,5v の 3 種類、カバー（延長分）の長さは 5cm とし、絶縁された棒に固定したソーセージを 0.1m/s の速度でセンサーユニット中央部を遊泳させる試行を各ケース 5 回行った。

電極素材別の相当 S/N 比の結果の一例を表 4-1-2 に示す。各実験ケースで計測されたノイズは概ね 0.1v であった。分散分析を行った結果、電極の素材別の相当 S/N 比には有意な差があることがわかった(p<0.05)。Turkey の範囲検定によれば、銅・アルミとステンレスの間に有意な差があり、銅・アルミの方が相当 S/N 比が大きくなることがわかった。

表 4-1-2 電極素材の違いと相当 S/N 比の関係

電極の種類	相当S/N比
銅	5.9
アルミ	5.76
ステンレス	4.46

※電極間隔5cm, 電圧5v, 電極の大きさ10cm×6cm, カバー(延長分)の長さ5cmの実験結果

(3) 小型魚を計数可能なユニット型センサーの諸元の検討

(2)でカバー(延長分)の長さの違いがパルス波やノイズの振幅に与える影響は無視できること、電極に銅・アルミを用いた方がステンレスよりも S/N 比が大きくなることがわかった。そこで、実験に用いる電極は銅製、カバー(延長分)の長さを 5cm とした。電極の大きさを 10cm×10cm, 10cm×6cm, 10cm×3.6cm の 3 種類、電極間隔 5cm, 7.5cm, 10cm の 3 種類、電圧は 1.5v,3v,5v の 3 種類とし、絶縁された棒に固定したソーセージを 0.1m/s の速度でセンサーユニット中央部を遊泳させる試行を各ケース 5 回ずつ行った。

電圧、電極間隔と相当 S/N 比の関係の一例を図 4-1-4 に、電極の大きさと相当 S/N 比の関係の 1 例を図 4-1-5 に、各実験条件での相当 S/N 比の一覧を表 4-1-3 に示す。各実験ケースで計測された計測ノイズは概ね 0.1v であった。分散分析の結果、電圧別の相当 S/N 比、電極の大きさ別の相当 S/N 比、電極間隔別の相当 S/N 比には有意な差があることがわかつ

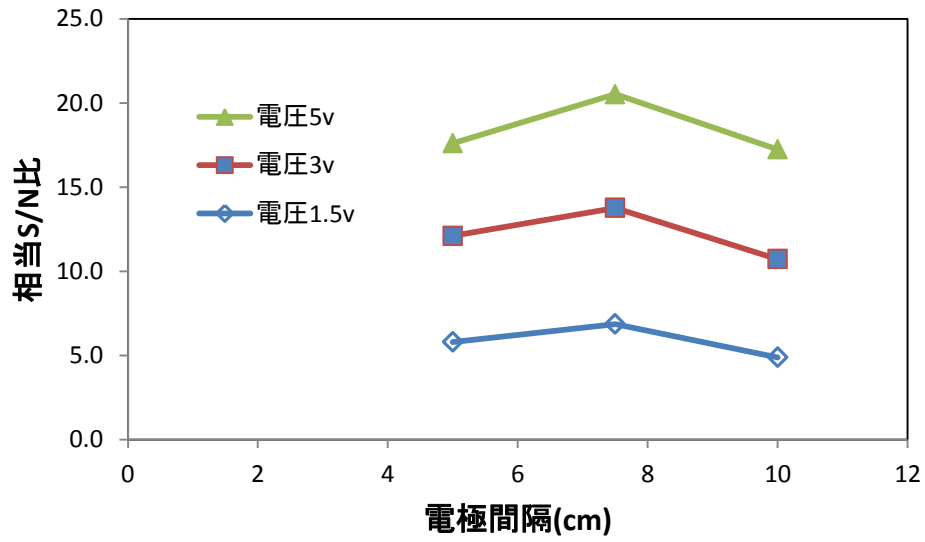


図 4-1-4 電圧，電極間隔と S/N 比の関係

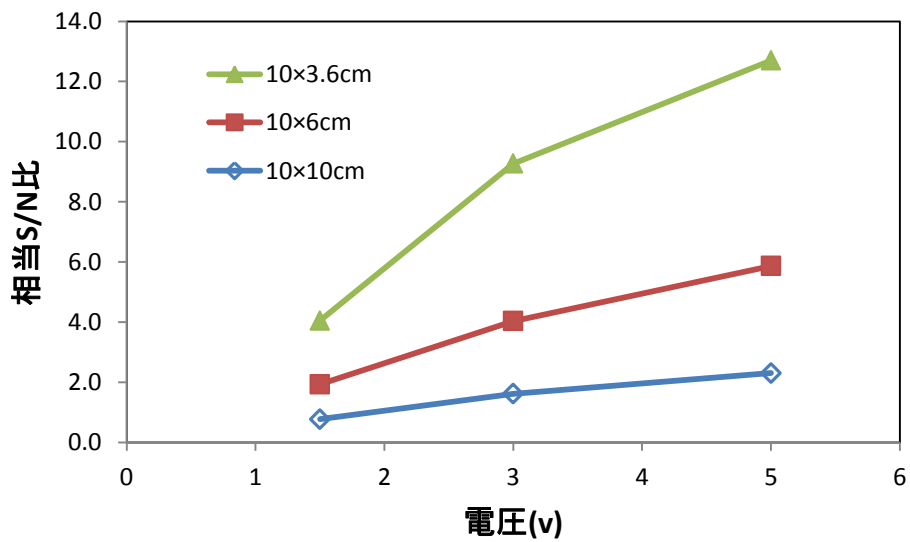


図 4-1-5 電極の大きさ，電圧と S/N 比の関係

表 4-1-3 各実験条件での相当 S/N 比

		電極の大きさ		
		電圧	10×3.6cm	10×6cm
電極間隔 5cm	1.5v	4.1	1.9	0.8
	3v	9.3	4.0	1.6
	5v	12.7	5.9	2.3
電極間隔 7.5cm	1.5v	3.9	2.3	1.2
	3v	8.1	4.6	2.7
	5v	12.7	6.8	3.9
電極間隔 10cm	1.5v	3.2	1.6	1.2
	3v	7.2	3.6	2.6
	5v	10.4	5.7	3.8

(※カバー(延長分)の長さ 5cm. なお, 表中の相当 S/N<2 未満の部分をグレーアウトした.)

た($p<0.0001$). Turkey の範囲検定により多重比較を行った結果, 前述したように電圧が大きくなるほど, また電極の大きさが小さくなるほど, 相当 S/N 比が大きくなることがわかった($p<0.05$). また, 電極間隔については, 7.5cm の場合に最大となることがわかった($p<0.05$).

第 2 編での研究結果より, S/N 比が 2 以上の場合, パルス波が容易に識別できることが分かっている. よって, ここでは相当 S/N 比 ≥ 2 の場合パルス波が計数可能と判断することとして, 計数に適したカウンターユニットの諸元について考察する. 表 4-1-3 から, 電極の素材に銅を用いた場合, 背景が白地のセルの条件では, いずれも相当 S/N 比 ≥ 2 となっており, 体長 8cm 程度の魚を計数可能であることが分かる. ただし, 魚体への影響を考慮すると, できるだけ電圧を低くすることが必要である. また, 電極の横幅は小さいほど S/N 比が大きくなるが, 電極の横幅が小さくなると流木などの流下物がカウンターユニットにつきやすくなる. また, 電極の横幅が小さくなると設置に必要なセンサーユニットの数も増える. 設置コストを低減するためにも, 電極の横幅は適度に大きい方がよい.

これらのことを総合的に考えると、8cm 程度の魚を計数する場合には、電極の大きさが 10×6cm 程度の銅製あるいはアルミ製の電極を使用し、電極間隔を魚の体長程度、電圧を 3v 程度にすることが望ましいと考えられる。

第3節 まとめ

本章では、10cm 程度の小型魚を計数可能なユニット型魚カウンターのセンサー部の諸元を室内実験により検討した。その結果、以下の結論を得た。

- ・カバーの長さは S/N 比に影響しない。(カバーが電極を覆っていればよい.)
- ・ステンレスよりも、銅・アルミのほうが相当 S/N 比が大きくなる
- ・電圧が大きくなるほど、また電極の大きさが小さくなるほど、相当 S/N 比が大きくなる
- ・電極間隔が体長とほぼ等しい 7.5cm の場合に相当 S/N 比が最大となる。
- ・8cm 程度の魚を計数する場合には、電極の大きさが 10×6cm 程度の銅製あるいはアルミ製の電極を使用し、電極間隔を魚の体長程度、電圧を 3v 程度にすることが望ましい。

第2章 既設魚道での小型魚の計数試験

第1節 実験目的

第1章において、小型魚が通過した際のパルス波を明瞭に識別可能なセンサー部電極「電極ユニット（図4-1-1）」を開発した。例えば表4-2-1の条件では、この電極ユニットにより体長8cmの小型魚のパルス波を明瞭に識別できることが室内実験により確認されている。また、複数の電極ユニットを並列に並べ、各ユニットを別々のセンサー回路に接続し、魚数の計数を行った場合でも、それぞれのセンサー回路が干渉せずに魚数の計数が行えることが室内実験により確認されている（近藤ら，2009；図4-1-1）。

以上のように、体長10cm程度の小型魚計数を目的とした魚カウンターの研究は室内実験を中心に進められてきたが、実際の魚道に魚カウンターを設置し、遡上または降下する小型魚を十分な精度で計数できるかどうかについては検討されていない。小型魚計数用の魚カウンターを実用化するためには、実際の魚道に電極ユニットを用いた魚カウンターを設置し、小型魚の通過により得られるパルス波や計測ノイズの解析を行い、実用可能なレベルまで計数精度を向上させるために必要な設置方法・運用方法を検討する必要がある。

そこで本章では、魚カウンターの現場での計数精度や設置・運用方法等を検討することを目的に、体長10cm程度の稚アユが多く遡上する時期に利根大堰の魚道に電極ユニットを使用した魚カウンターと計数精度検証用のビデオカメラを設置し、計数実験を行った。

第2節 実験方法

(1) 実験1 実験場所と実験日時

計数実験は、第3編第1章で実施したサケの計数実験と同じ利根大堰3号魚道(図3-1-2, 図3-1-3, 表3-1-1)において、2010年5月9日の11時～16時（実計測時間4時間）に実施

した。3号魚道の平面形は二つ折直線型であり，構造はアイスハーバー型・片側越流潜孔付きである。対象魚種はアユ・サケを主としている。

なお，1号魚道では4月から5月にかけて，魚類捕獲用トラップを用いた稚アユの遡上量調査が行なわれている。実験を行なった日は普段と比較して稚アユの遡上数が著しく多く（図 4-2-1），魚道内には目視で確認できるだけでも数百尾を超える稚アユが確認された。実験開始前に，魚道内に存在する稚アユ 30 尾の平均体長を計測したところ，7.1cm であった（最大:8.5cm，最少 6.5cm）。本研究では，計数対象とする平均 7.1cm（最大:8.5cm，最少 6.5cm）程度の稚アユや同程度の体長の小型の魚類を小型魚と総称することとする。

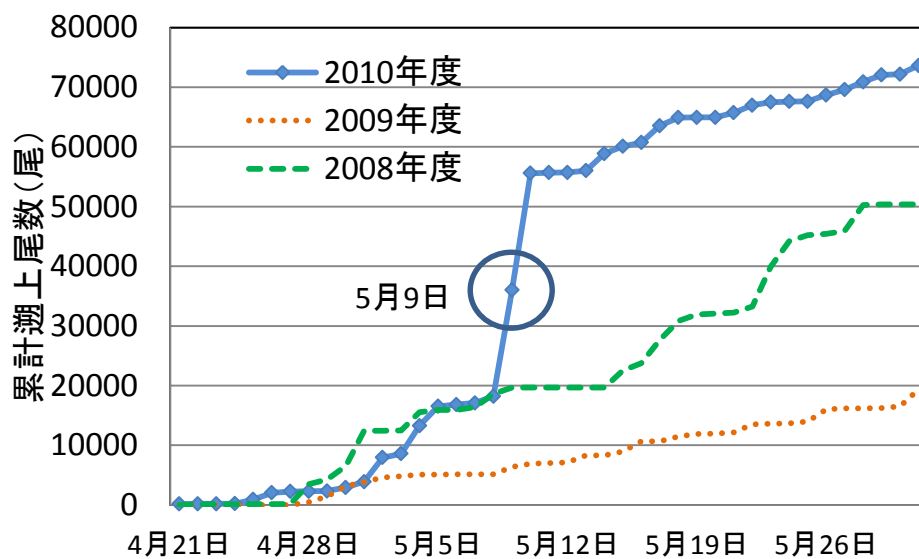


図 4-2-1 利根大堰 1 号魚道における稚アユの遡上数

(2) センサー部の設置にあたり工夫した事項

魚道に設置されているゲートを閉じることにより，流入する水を一時的に止めた後，魚道の隔壁上部に敷板を取り付けた。敷板の上に，6×10cm の銅製枠型電極，透明なアクリル製

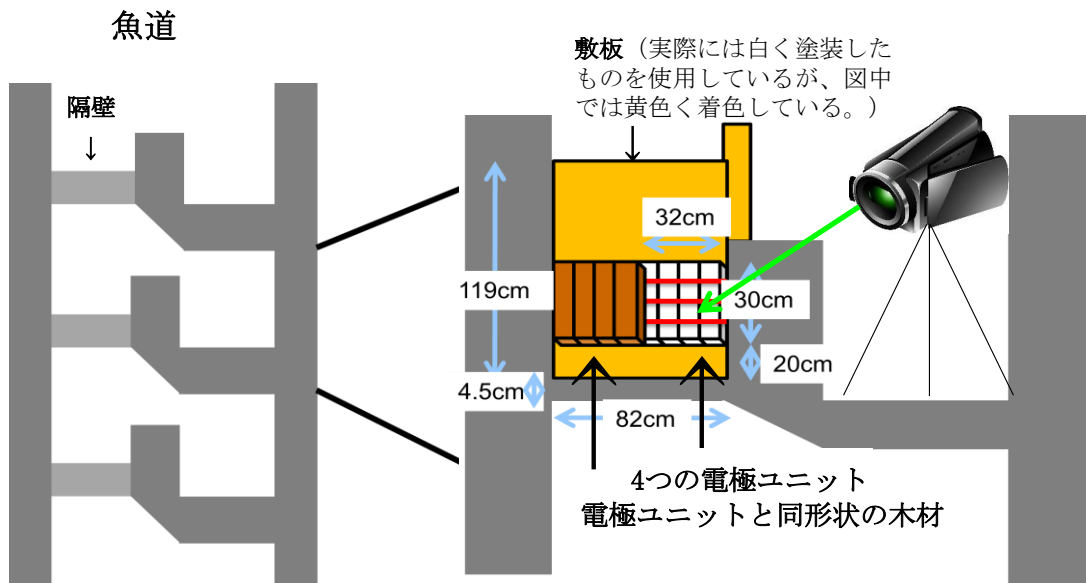


図 4-2-2 電極ユニット設置状況 (平面図)

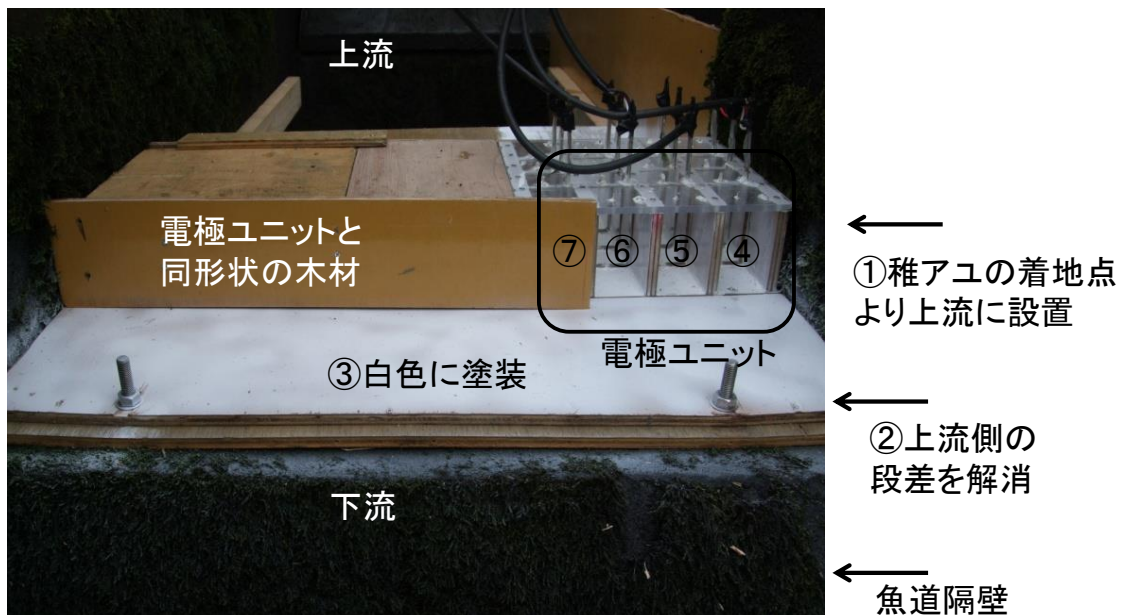


図 4-2-3 電極ユニット (正面図)

天板と、塩化ビニルで被膜したコンパネで製作した側板・底板を用いて4つの電極ユニットを一体成形したもの(図 4-1-1)を作成し、隔壁に接するように設置した(図 4-2-2)。電極ユニット周辺の水の流れを安定させるのと同時に、小型魚が電極ユニット内を通過して遡上・降下するように、図 4-2-2、図 4-2-3 のように木材(ホワイトウッド)で水路を仕切った。また、電センサー部の設置後、ゲートを開き魚道に水が流れるようにした。遡上してくる稚アユの電極ユニットに流入する流量を調整するために、水路中央側の1ユニットの出入口もコンパネにより封鎖した(図 4-2-3 の⑦)。パルス波データをパソコンに記録した。各電極ユニットをそれぞれ独立したセンサー回路にリード線により接続し、電池により両端の電極に3Vを印圧した。

魚カウンターの電位の計測にはAD変換器としてPICO Technology社製オシロスコープPICOSCOPE2202(垂直軸分解能8bits)を、サンプリングレート0.1sec、入力レンジ-5V~5Vに設定して使用した。AD変換器の出力するデータをPicoLog Data logging softwareを利用してPCに取得し記録した。記録したデータを図化し、目視によりパルス波が発生した(=魚が通過した)時刻を求めた。魚の通過方向(遡上または降下)により、発生するパルス波の形状が反転する性質を利用し、魚の通過方向を識別した。また、魚カウンターの計数精度を検証するため、電極ユニットを通過する魚をビデオカメラ(JVC Everio GZ-MG330)で撮影し(図 4-2-2)、ビデオ映像から魚の通過数を計数した。電極ユニットの諸元および計数対象魚の体長を表 4-2-2 に示す。なお、電極ユニットを設置するにあたり、以下4点に配慮した。

- 1) 電極ユニットは、小型魚が勢いよく遡上し、水面上に飛び出した場合の着水地点よりも上流側に設置する(図 4-2-3 の①)。

小型魚は電極ユニットが設置されている隔壁直下のプールから勢いよく遡上してくるため、空中に飛び出すことがある。浅石ら(2010)の現地実験の際には、小型魚が電極ユニッ

表 4-2-2 電極ユニットの諸言および計数対象魚

電極の形状	枠型電極
電極の形状サイズ(cm)	6×10
電極の材質	銅
電極の幅(cm)	1
電極の間隔(cm)	6.5
電圧(v)	3
サンプリング間隔(ms)	10
アユの体長(cm)	7.1cm(30尾の平均) 最大:8.5cm 最少:6.5cm

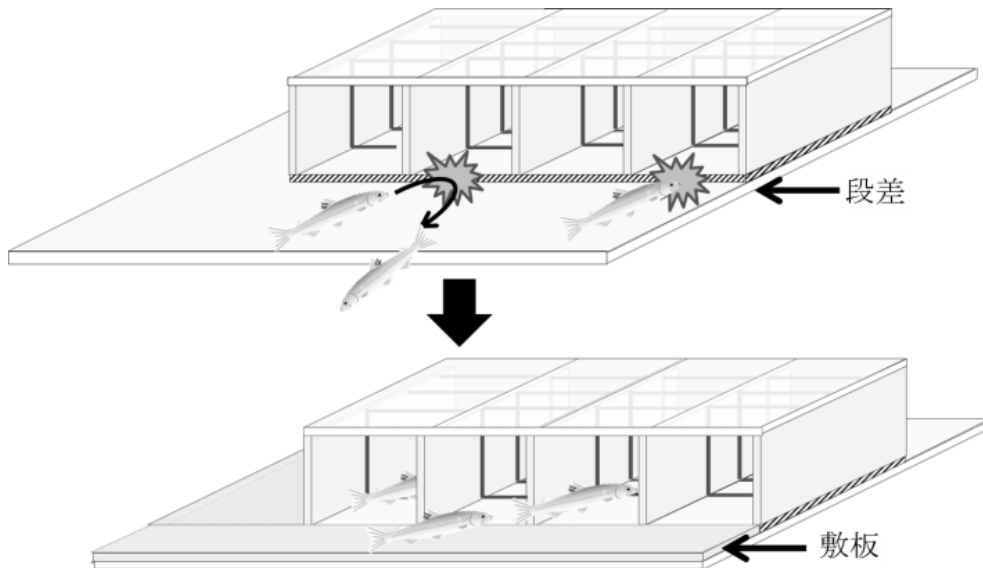


図 4-2-4 電極ユニット下流側の段差の解消

トを飛び越えて上流側に着水する場合があった。今回の実験では、図 4-2-2 で示したように敷板の端から上流側 20cm の位置に電極ユニットを設置することで、小型魚が電極ユニットを飛び越えることを防止した。

2)電極ユニット入口の段差の解消(図 4-2-3 の②, 図 4-2-4)

浅石ら (2010) の現地実験では、魚道の隔壁の上に敷き詰めた板の上に電極ユニットの

底板を木ネジで固定して計数実験を行ったところ、電極ユニットの下流側の入口に高さ 1cm 程度の段差が生じた。その結果、敷板の上を這うように遡上してきた小型魚が段差に衝突して引き返すケースが多く観測された。この現象を未然に防ぐため、電極ユニットの下流側に電極ユニットの底板と同じ厚さの板を敷き詰め段差を無くした(図 4-2-3 の②, 図 4-2-4)。

3)水深が電極ユニット上部より少し高くなる程度に調節する

水位が電極ユニットの天板よりも高い場合、小型魚が電極ユニットの上方を遊泳して通過してしまうことがある。また、水位が電極ユニットの天板よりも低い場合、電極ユニット内に空気塊が侵入することで振幅の大きなノイズが発生し、魚カウンターの計数精度が低下することがある。このため、魚道の上流端に設置されている流量調整ゲートを調節することにより、水位を電極ユニットの上部より数 cm 高くなる程度に調整した。

4)電極ユニットを設置している敷板を白く塗装する(図 4-2-3 の③)

本研究ではビデオ画像から電極ユニットを魚が通過した時刻・方向のデータを読みとり、魚カウンターの計数精度の検証用のデータとして用いることとした。ビデオ画像からの小型魚の通過時刻・通過方向の読み取りを容易にするため、敷板を水性ペンキで白く塗装した。

(3) データの解析方法について

小型魚が電極ユニットを通過した際に、センサー回路から出力されたパルス波の一例を図 4-2-5,4-2-6 に示す。センサー回路から出力される信号には、常に微少な振動成分であるノイズが含まれている。

従来の室内実験では、ノイズの振幅は時間によらずほぼ一定の値を示したが、今回の現地計数では、図 4-2-5 のように 0.12v と低い値を示す場合もあれば図 4-2-6 のように 0.16v と高い値を示す場合もあった。例えば、図 4-2-5 のように、ノイズの振幅が小さい場合はグラフ全体がすっきりしており、小型魚が通過した際に現れるパルス波は識別しやすい。し

かし、図 4-2-6 のようにノイズの振幅が大きくパルス波の振幅と同程度の場合は、パルス波は識別しにくくなる。

このように、ノイズの振幅の大きさの違いによってパルス波の識別のしやすさが変化するため、ノイズの変動を A(ノイズの振幅が小さい)、B(ノイズの振幅が大きい)の 2つのパターンに分け、パターンごとにパルス波として計数する条件を設定した。また、振幅が小さくノイズとの識別が困難で、計数対象とすべきかどうか判断に迷うパルス波が稀に現れるが、このようなパルス波は計数対象外とした。ノイズのパターン A、B の場合のパルス波の計数条件を以下に示す。

A : ノイズの振幅が小さな場合

以下の①、②を満たすものをパルス波として計数した。

① 山と谷がある。

② パルス波の頂点の値が、ノイズの最大値より大きく、底点の値がノイズの最小値よりも小さい。

B : ノイズの振幅が大きな場合

①、②または①、③の条件を満たすものをパルス波として計数した。

③ パルス波の頂点の値がノイズの最大値より大きく、底点の値がノイズの最小値と同程度。または、頂点の値がノイズの最大値と同程度で、底点がノイズの最小値より小さい。

ノイズの振幅が大きい場合は、パルス波の識別が困難になり、ノイズをパルス波として誤って数えてしまう恐れがある。そこで、ノイズとパルス波を識別するために、ノイズの振幅が小さい場合の条件よりも条件を緩和し①かつ③を満たすものとした。計数条件を満たすパルス波の例を図 3-2-5、図 3-2-6 の図中に矢印で示す。

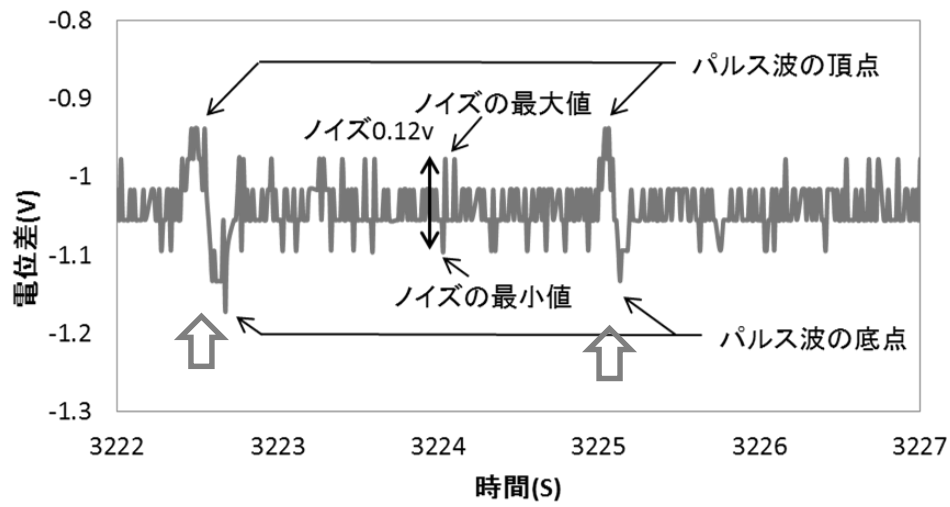


図 4-2-5 振幅 0.12v 程度のノイズ (A ノイズ) 発生時のパルス波の例
(矢印は魚が通過した際に発生したパルス波)

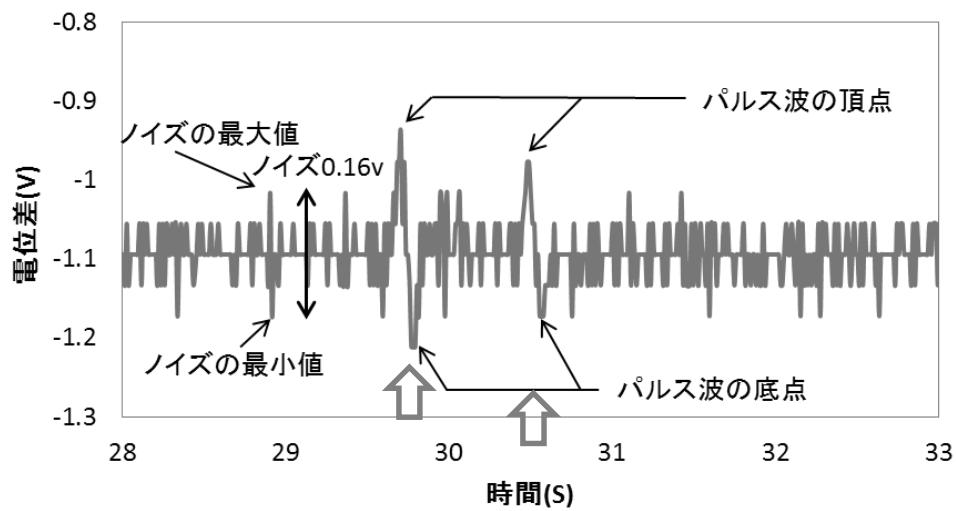


図 4-2-6 振幅 0.16v 程度のノイズ (B ノイズ) 発生時のパルス波の例
(矢印は魚通過によるパルス波)

第3節 結果と考察

(1) 計測データについて

水面における反射の影響で、隔壁側から2, 3番目の電極ユニット(図4-2-3の⑤, ⑥)を通過する小型魚をビデオ映像から計数することが難しい場合が多かった。そこで、電極ユニットの検証には、信頼性を高めるために、遡上数を正確に把握可能な隔壁側から1番目の電極ユニット(図4-2-3の④)のみの計測データを使用した。

ビデオ映像から、小型魚が電極ユニットを通過した時刻と通過方向(遡上/降下)を求めた。同様に、魚カウンターの計測データからパルス波の発生時刻とパルス波の形状から読みとった魚の通過方向を求めた。計測時間1分間ごとにデータを区切り、次式により1分間あたりの計数精度(カウント率 CR_{PM} , 以下 CR_{PM})を求めた。

$$CR_{PM} = (N_{cpm} / N_{vpm}) \times 100(\%) \quad (4-2-1)$$

ただし、 N_{cpm} : カウンターで計数された1分間あたりの遡上数(尾/分)、 N_{vpm} : ビデオ映像から計数した1分間あたりの遡上数(尾/分)

なお、小型魚が全く遡上しなかった時間帯を除いた全データ約4時間の中から100分間(100サンプル)分を抽出し解析した。また、ビデオ映像に写った魚影から、電極間の間隔10cmをスケールとして魚の体長を推定したところ、調査開始前に捕獲した20個体の体長(平均: 体長7.1cm, 最大:8.5cm, 最少:6.5cm)と同程度だった。

小型魚が通過した際に生じたパルス波の振幅は0.18~0.32v程度であった。パルス波と比べ、小型魚が通過していない時に生じるノイズの振幅は0.12~0.16v程度であった。パルス波の振幅が0.18v未満、ノイズの振幅が0.16v以上になる場合もあり、その様な場合には小型魚が通過しているにもかかわらず、パルス波が第2節(3)で示した条件を満たさずに、カウント対象外となる場合があった。

ビデオ映像から読み取った 1 分間あたりの遡上数は、1～50 尾が 56 サンプル、101～150 尾が 25 サンプル、51～100 尾は 14 サンプル、101 尾以上は 5 サンプルであり、1 分間の遡上数が 50 尾を越えるケースが約半数を占めた。1 分間の遡上数が 50 尾を越える場合、同時に複数の小型魚が電極ユニット内を遡上する現象（以下、同時遡上とする）が発生した。小型魚が 1 尾ずつセンサーユニットを通過した場合は、パルス波が明瞭に現れることがほとんどであったが(図 4-2-5, 図 4-2-6)、同時遡上が発生した場合、パルス波が重なり合い、パルス波が不明瞭になった(図 4-2-7)。

(2) カウント率 CR_{PM} について

小型魚が 1 尾ずつセンサーユニットを通過した場合は、パルス波が明瞭に識別できるため、 CR_{PM} が高い値となった。1 分間あたりのビデオの遡上数 50 尾未満では CR_{PM} の平均値が 90% 程度であったものが、150 尾以上になると CR_{PM} の平均値が 60% 程度まで低下する結果となった(図 4-2-8)。1 分間あたりの遡上数が増加するに従って CR_{PM} が低下傾向を示したのは、遡上数の増加に従い同時遡上が発生する割合が増加することで不明瞭なパルス波が増加し、パルス波から遡上数を正確に計数することが困難になったことが主な原因と考えられる。また、ノイズ A が発生している場合とノイズ B が発生している場合では、 CR_{PM} に明瞭な差はなかった。

計数期間中、ノイズの大きさは概ねノイズ A からノイズ B の大きさの範囲で変化した。第 3 編第 1 章ではこのようにノイズの大きさが変動する原因としては、水面の波や水質の変化等が候補として挙げられているが、ノイズが変動する原因については十分に明らかにされていない。

今回の計数では、前述したようにノイズの大きさが計数精度におよぼす影響は無視できる程度であったが、ノイズの大きさが計数中に大きく変動した場合には、誤計数や計数精

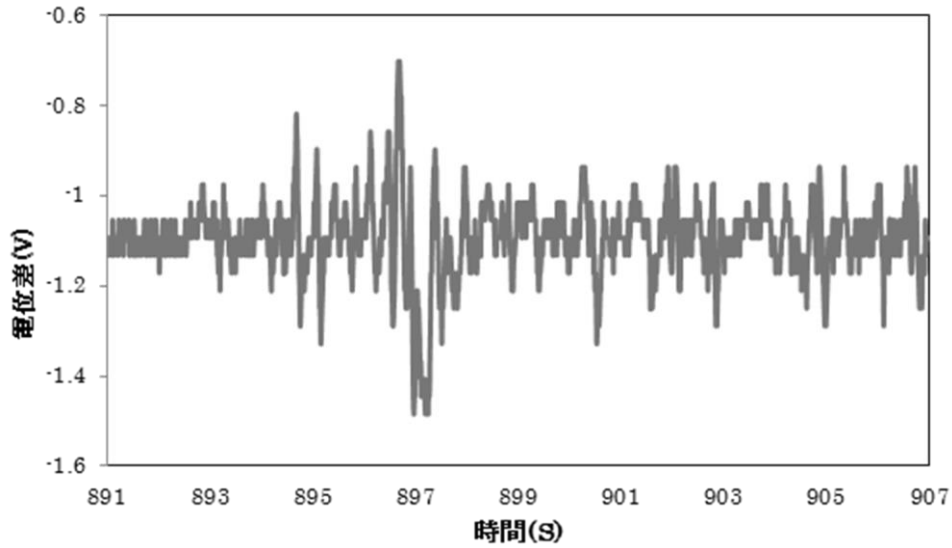


図 4-2-7 魚が同時に電極ユニット内に侵入した場合（同時遡上時）の波形

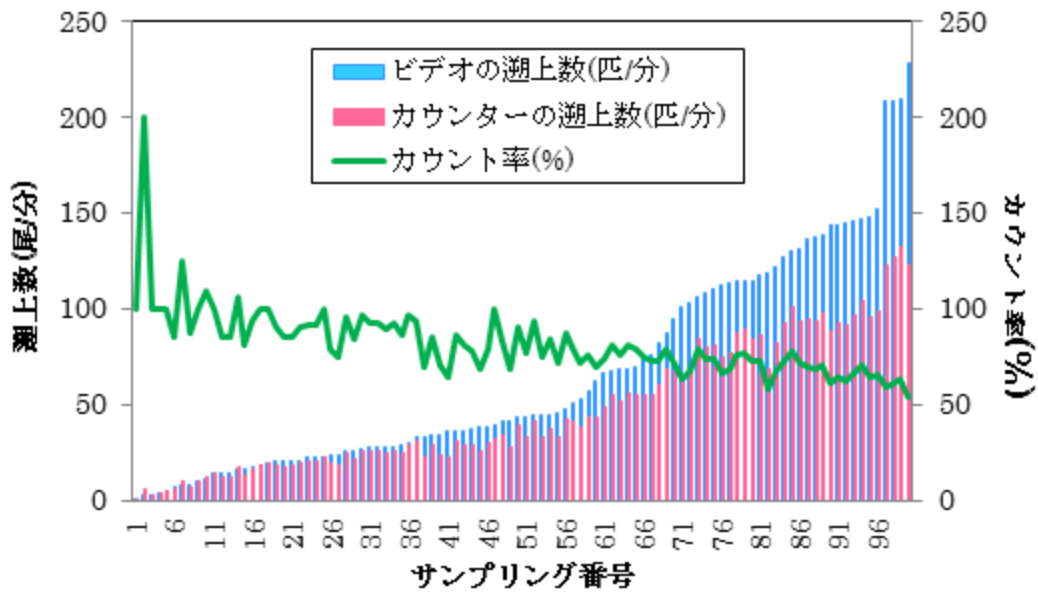


図 4-2-8 1 分間あたりの遡上数の違いによるカウント率の変化

度の低下につながる危険性がある。今後はこのノイズが変動する原因について解明し、計数精度の低下を防止する手法を見いだす必要がある。

(3) ノイズ A 発生時とノイズ B 発生時のカウント率 CR_{PM} の比較

ノイズ A(ノイズの振幅が小さい)の発生時のデータは、今回解析した全データ 100 サンプルの 65%(65 サンプル)を占めていた。また、比較的 CR_{PM} が低い、単位時間当たりのビデオ遡上数が 50 尾以上のサンプル数が 65 サンプル中の 65%(42 サンプル)を占めており、 CR_{PM} はノイズ B(ノイズの振幅が大きい)の発生時と比較して低い傾向を示した(図 4-2-9)。一方ノイズ B の発生時のデータは、今回解析した全データ 100 サンプルの 35%(35 サンプル)を占めており、 CR_{PM} はノイズ A の発生時と比較して高い傾向を示した。今回ノイズ B では、比較的 CR_{PM} が高い、単位時間当たりのビデオ遡上数が 50 尾未満のサンプル数が 35 サンプル中の 90%以上(33 サンプル)を占めていたため、 CR_{PM} はノイズ A の発生時と比較して高い傾向を示した(図 4-2-10)。

今回の結果では、ノイズ A の発生時の場合、単位時間当たりの遡上数が多いために CR_{PM} が低くなり、ノイズ B の発生時の場合、単位時間当たりの遡上数が少ないために CR_{PM} が高くなる傾向を示したと考えられる。

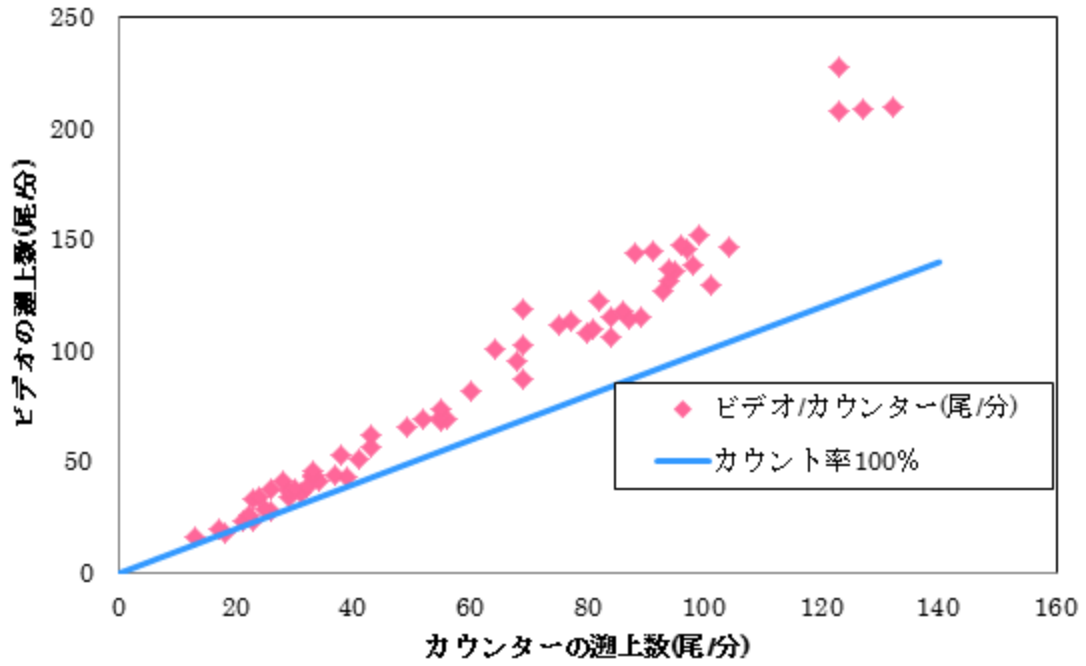


図 4-2-9 A ノイズ（振幅が小さい）発生時の単位時間当たりのカウント率

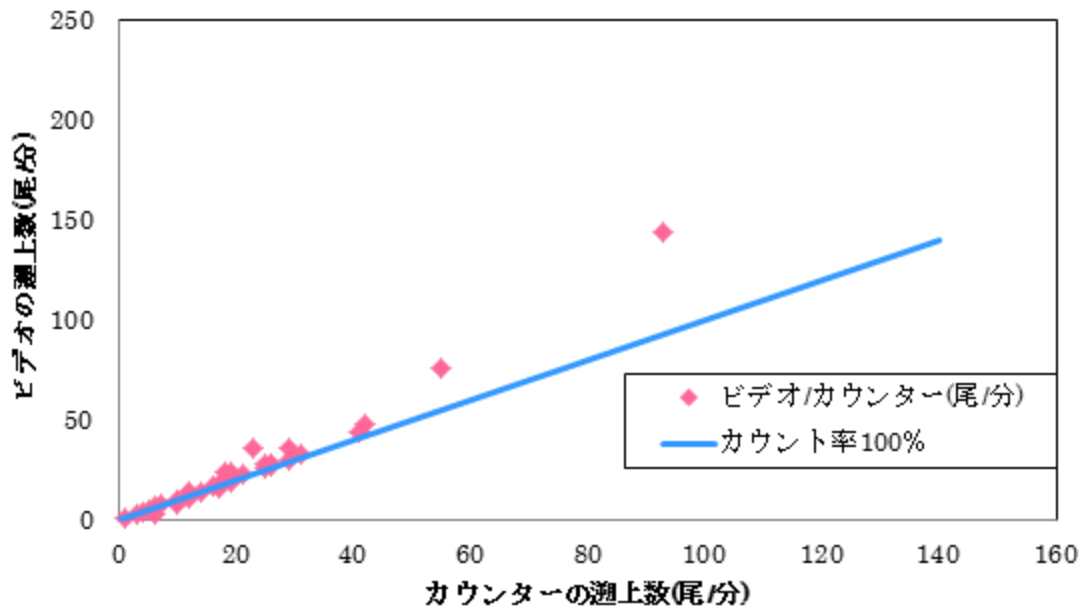


図 4-2-10 B ノイズ（振幅が大きい）発生時の単位時間当たりのカウント率

(4) 不定期に発生するノイズについて

a) 魚の通常後に見られた波形の乱れについて

実験中に小型魚が通過した後に、ベース電圧が大幅に下がる現象が数回現れた(図 4-2-11).
このような波形が現れた時刻のビデオ映像を確認したが、稚アユは他の時間帯と同じようにセンサーユニットを通過しており、特に変わった動きはしておらず、流木や水草などの流下物も確認できなかった。このような波形は一定の時間内にまとまって生じていた。また、このような波形が現れた時は、同時に他の 3 つのセンサーユニットでも同じように異常な波形が生じていることがほとんどであった。

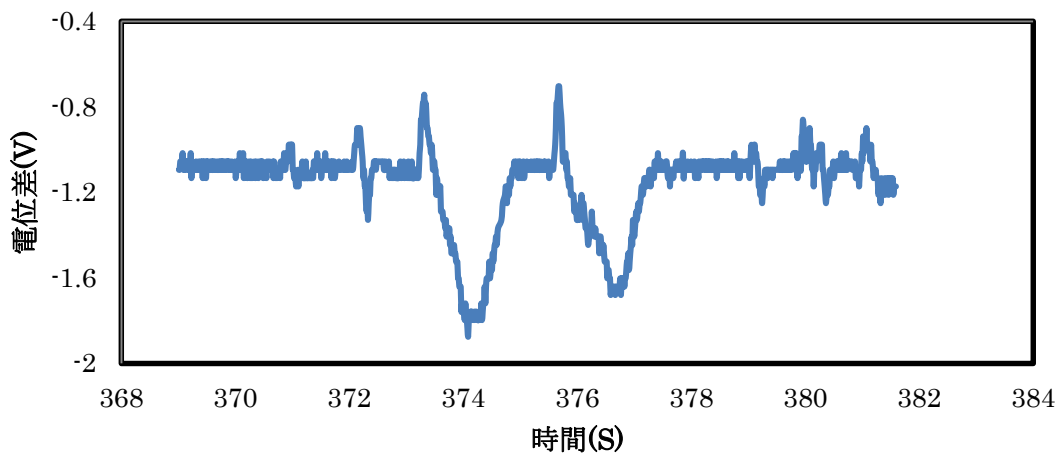


図 4-2-11 魚の通過後における波形の乱れについて

b) 不定期に現れる波形の乱れについて

図 4-2-12 に示したように、カウンターが応答しなくなり電位差が一定値のままになることが 10 回程度あった。この間に魚が通過しても、このような波形のままであり、数秒～十数秒間程度続きその後急に正常に戻った。その間をビデオ映像で確認したが、特に異常は

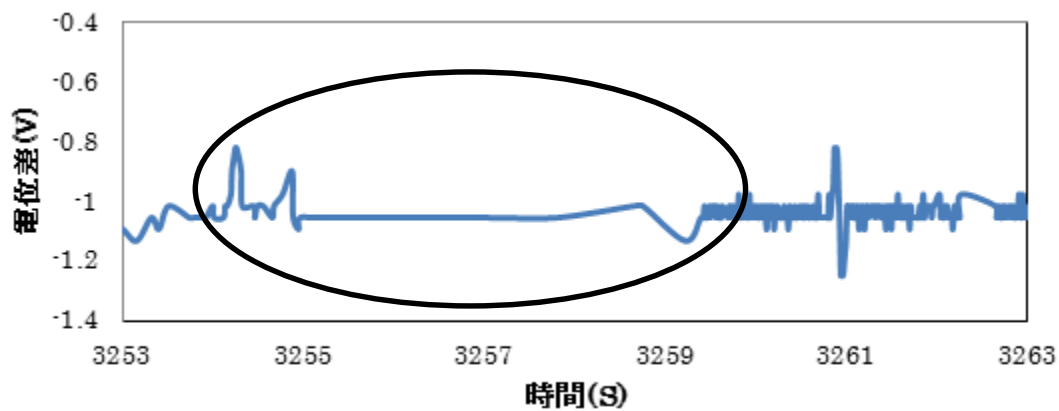


図 4-2-12 不定期に現れる波形の乱れについて

みられなかった。このような波形は一定の時間内にまとまって生じていた。

c)魚の非通過時に現れる波形の乱れについて

図 4-2-13 に示したように、電位差が変動しながら増大しその後減少していくような現象も数回確認された。この間のビデオ映像を確認したが、魚のセンサーユニットへの侵入や通過、流木等の流下物は確認できなかった。このような波形は、第 3 編第 1 章でサケを計数した際にも発生している。

d)魚の非通過時に現れるパルス波のような波形について

図 4-2-14 では、通常魚が通過した際に現れるパルス波と同じ形のパルス波が発生したが、この時刻のビデオ映像を確認したが、魚のセンサーユニットへの侵入や通過、流木等の流下物は確認できなかった。この波形は、通常魚が通過した際に現れるパルス波と振幅や形状が同じであった。また、稚アユがセンサーユニットに一度侵入したものの、途中で引き返し等の動きを行なった場合にもこのような波形が現れることがあった。このような場合、パルス波が現れていても魚は通過していないため、カウンターとビデオの計数に誤差が生

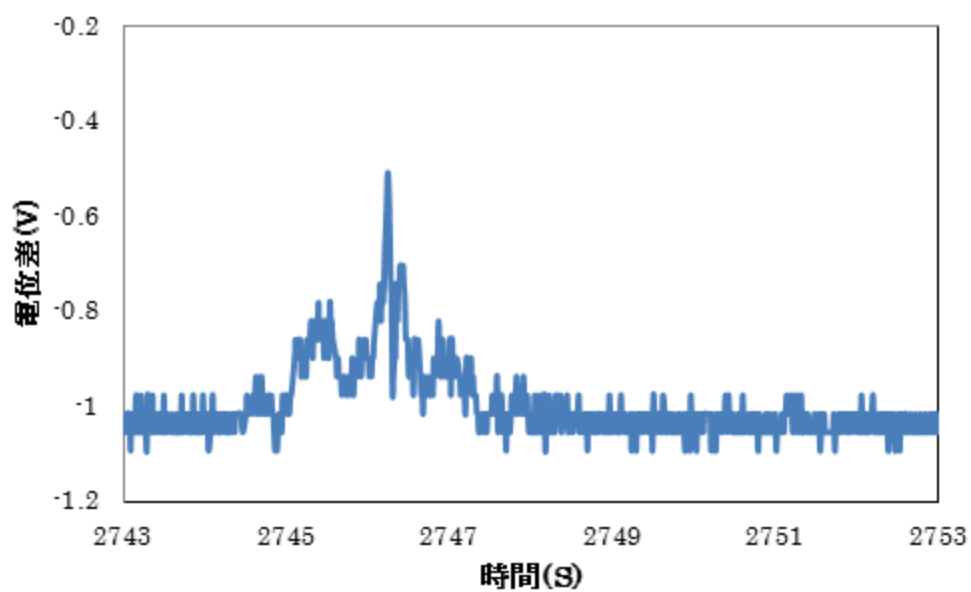


図 4-2-13 魚の非通過時に現れる波形の乱れについて

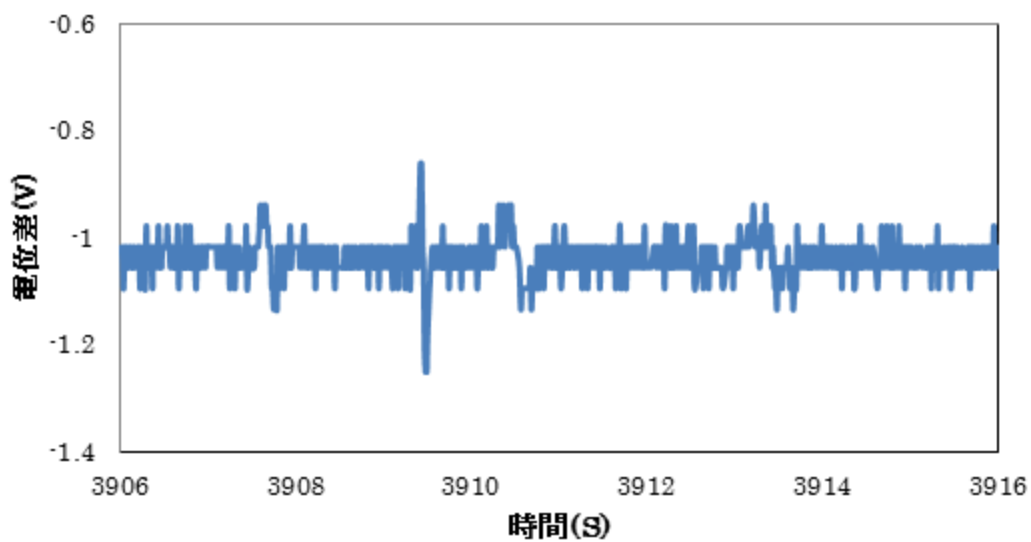


図 4-2-14 魚の非通過時に現れるパルス波のような波形について

じる。このような現象は今回の実験期間において 10 回程度発生した。

e)波形が乱れる原因について

波形の乱れの振幅が大きくパルス波として識別してしまう場合や、波形が乱れている間に魚が通過しパルスが識別できない場合は、誤計数につながる可能性が大いにある。d)のような波形は魚が通過していないにも関わらずパルス波として誤計数されてしまうため、カウンターの遡上数がビデオの遡上数を上回り、図 4-2-8 の 4 サンプル(サンプリング番号 2, 7, 10, 14)で CR_{PM} が 100%を超える結果となってしまった。不定期に発生する波形の乱れの原因には、波による水面の変化、水質の変化、電気回路の問題等が考えられるがはっきりした原因は特定されていない。今後、不定期に波形の乱れが発生する原因を究明し、安定して計数できるようにすることが求められる。

(5)補正式を用いたカウント率向上の検証

図 4-2-9, 4-2-10 のデータを合わせてプロットしたグラフを図 4-2-15 に示す。今回使用した魚カウンターを魚道に設置して遡上数を求めた場合、1 分間あたりの遡上数が多くなるほど、魚カウンターによる遡上数が実際の遡上数よりも小さくなる傾向が見られた。図 4-2-15 のデータの分布を表す近似式を最小自乗法により求めたところ、次式のようになった。この近似式の決定係数 R^2 は 0.98 と非常に高い。

$$y = 0.0044x^2 + 1.067x \quad (4-2-2)$$

ただし、 x : 1 分間毎の魚カウンターによる遡上数、 y : 1 分間毎ビデオによる遡上数

式 2 の x に魚カウンターによる 1 分間毎の遡上数を代入して得られた数値 y (推定遡上数) を用いて、次式により rCR_{PM} (補正後の CR_{PM}) を求めた。

$$rCR_{PM} = (rN_{cpm}/N_{vpm}) \times 100(\%) \quad (4-2-3)$$

ただし、 rN_{cpm} : 推定遡上数 (尾/分)、 N_{vpm} : ビデオ映像より計数した遡上数 (尾/分)

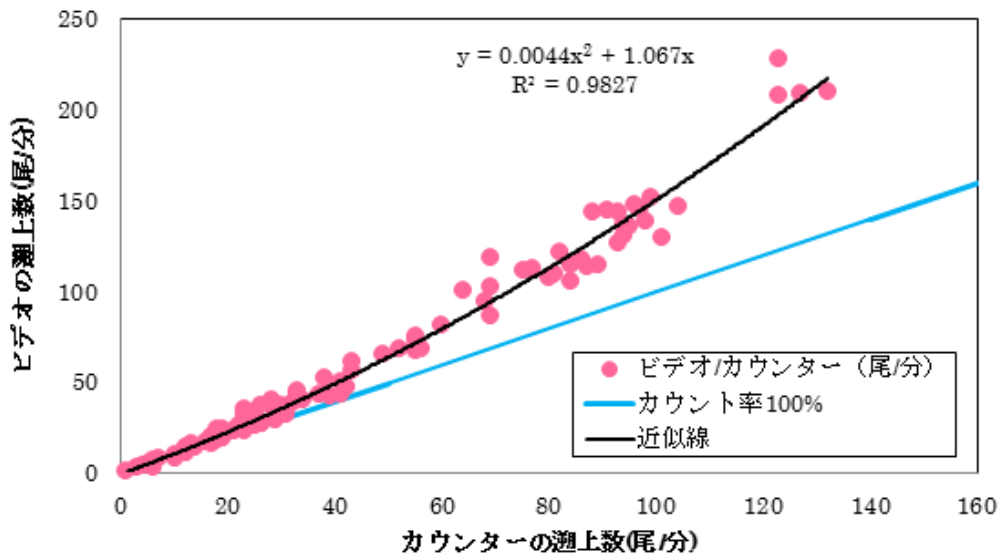


図 4-2-15 単位時間あたりの遡上数とカウント率の関係

その結果、1 分間あたりのビデオの遡上数が 1~50 尾程度の場合、 rCR_{PM} が 100%を超える傾向を示した(図 4-2-16)。また、単位時間当たりのビデオの遡上数が 51 尾以上において、補正後のカウント率 rCR_{PM} がおよそ $100 \pm 20\%$ の間で変動する傾向がみられた。

1 分間あたりの遡上数のデータを累積し、次式により累積遡上数のカウント率 ACR および推定値の累積遡上数のカウント率 $rACR$ を算出した結果を図 4-2-17 に示す。

$$ACR = (AN_c / AN_v) \times 100(\%) \quad (4-2-4)$$

$$rACR = (ArN_c / AN_v) \times 100(\%) \quad (4-2-5)$$

ただし、 AN_c :遡上数の累積値 (尾)、 AN_v :ビデオ映像より計数した遡上数 (尾/分)、 ArN_c :推定遡上数の累積値 (尾)

式 4-2-2 で補正した 1 分間あたりの遡上数 (推定遡上数) を用いた場合、累積時間が 40 分以上の範囲では、 $rACR$ がほぼ 100%を示している(図 4-2-17)。これは、推定遡上数の

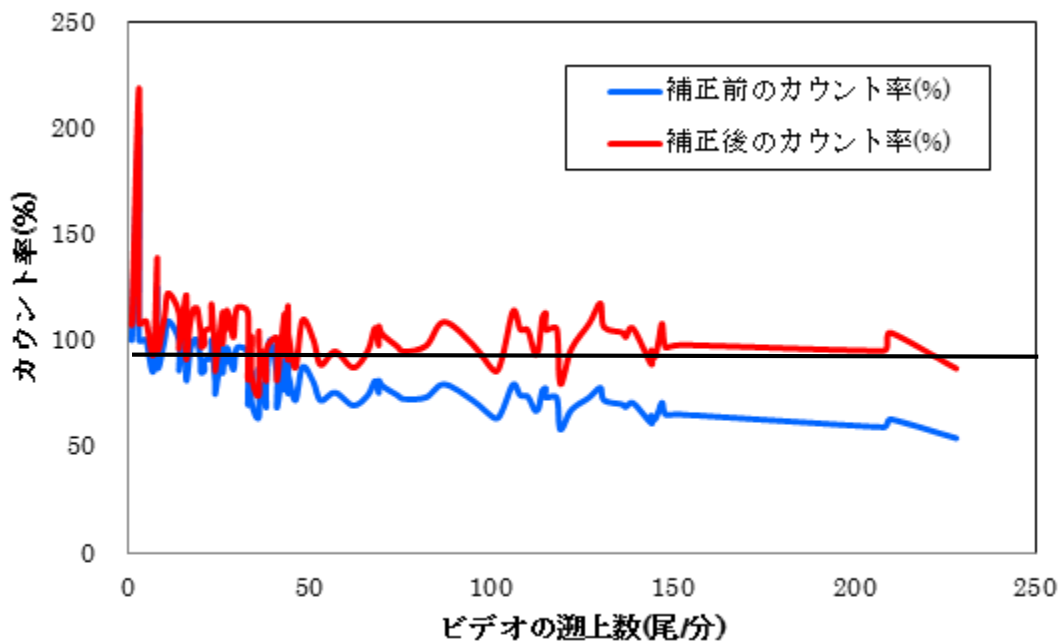


図 4-2-16 単位時間あたりの遡上数の増加に伴う補正前と補正後のカウント率の変化

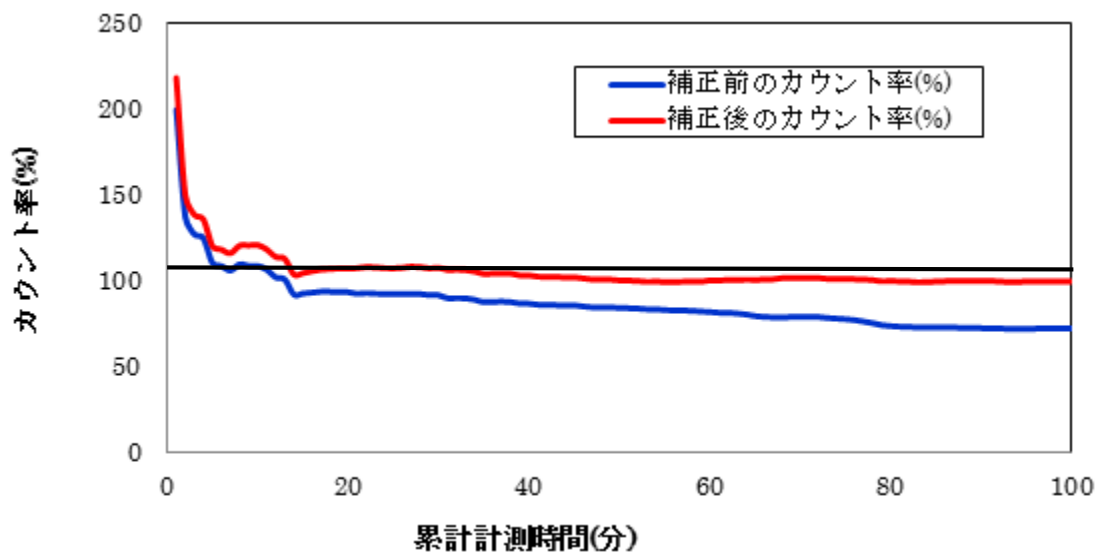


図 4-2-17 累計計測時間とカウント率の関係

カウント率 rCR_{PM} は $100\pm 20\%$ の範囲で変動する、つまり誤差を含んでいるものの、推定遡上数を累積することにより誤差が相殺され、 $rACR$ がほぼ 100% に向上したものと考えられる。この結果は、魚カウンター1 ユニットあたりの遡上・降下数が 50 尾/分以上の時間帯では1分間毎の遡上数を高い精度で求めることは難しいが、数10分間毎の遡上数であれば高い精度で計数できる可能性を示している。

第4節 まとめ

本章では、魚カウンターの現場での計数精度や設置・運用方法等を検討することを目的に、体長 10cm 程度の稚アユが多く遡上する時期に利根大堰の魚道に電極ユニットを使用した魚カウンターと計数精度検証用のビデオカメラを設置し、計数実験を行った結果、以下の結果を得た。

- ・小型魚（体長 $6.5\sim 8.5\text{cm}$ 程度の魚類）を計数対象とした場合、各電極ユニットの単位時間あたりの遡上数が 50 尾/分未満と少ない場合には、魚カウンターにより1分毎の遡上数がほぼ 100% の精度で計数可能であることが示された。
- ・単位時間あたりの遡上数が 50 尾/分以上と多くなった場合には、同時遡上が発生し、遡上数が増加するほど1分毎の遡上数の計数精度は低下するが、補正式により遡上数を補正することにより数10分毎の遡上数は、ほぼ 100% の精度で計数できる可能性が示された。
- ・1日に魚道を遡上する小型魚の遡上数を計数するといった用途であれば、小型魚用の魚カウンターが実用十分な計数精度を有していることが示唆された。

しかし、同時遡上が発生した場合に用いる補正式については以下の疑問が残る。

- 1) 本調査期間中以上に遡上数が増えた場合でも、補正式の精度は保証されるのか？

2) 魚種や魚の体長，魚がセンサーを通過する速度が変わっても，今回の補正式は適用可能であるのか？

電極ユニットを用いた魚カウンターを実用化するにあたり，今後は水理条件，魚種，魚の体長が異なる条件など，幅広い計数条件において，魚カウンターによる魚数の計数を行い，補正式を用いた補正法の有効性を検証する必要がある。

第3章 小型魚計数用魚カウンターのデータ処理方法の開発

第1節 実験目的

第4編では、電極の周囲を塩化ビニル板で囲った小型魚用電極ユニットを開発し、現地試験により、条件を満たしたパルス波を人間が計数することにより、体長約8cmの小型魚を高い精度で計数できることを示した。しかし、魚カウンターによる小型魚の自動計数を実現するためには、自動計数を行うプログラムが不可欠である。

魚カウンターにより大型魚を計数する際に使用されているプログラムでは、パルス波の頂点の値が一定値以上で、底点の値が一定値以下となっているパルス波を検出し、魚の通過数を計数している（図1-1-2）。小型魚が電極ユニットを通過した際のパルス波の一例を図4-2-5、4-2-6に示す。小型魚用の電極ユニットを用いた場合でも、体長約8cmの小型魚のパルス波の振幅は、ノイズの振幅と比較して大きくはなく、大型魚用の計数プログラムではパルス波とノイズを明瞭に識別することが難しく、高精度な自動計数が難しい。プログラムによりパルス波を自動計数できるようにするためには、パルス波の振幅とノイズの振幅の比であるS/N比を向上させる方法を検討するとともに、パルス波の検出方法を再考する必要がある。

そこで本章では、第4編第2章の現地実験で得られたデータを用いて、①バンドパスフィルター処理（以下フィルター処理）によるS/N比向上の可能性、②微分処理によるパルス波の検出の可能性について検討した。

第2節 実験に使用するデータ

本節では、平均体長7.9cmのアユを計数対象に実施した第2章の現地試験の際に計測されたデータを用いた。

第2章の計数結果から、魚カウンターは、魚が1尾ずつセンサーユニットを通過した場合は、パルス波が明瞭に識別できるため魚数を正確に計数できるが、複数の魚が同時にセンサーユニット内に侵入する「同時遡上」が発生した場合、パルス波が不明瞭になり魚数を正確に計数できないことが明らかになった。1分間当たりの遡上数が増加するに従ってカウント率CRが低下傾向を示したのは、遡上数の増加に伴い同時遡上が発生する割合が増加したことが主要因である。

本章では、「同時遡上」が生じていない場合を研究対象とすることとし、第2章で解析に使用した100分間のデータのうち、遡上数が50尾/分未満でCRが90%以上のデータ10分間分と、魚が通過しておらずノイズのみが記録されている2分間分（Aノイズが記録されている1分間、Bノイズが記録されている1分間）のデータを使用した。

第3節 フィルター処理によるS/N比の向上

(1) フィルターの設計

第2章で述べたように、計測データには常時、図4-2-5、4-2-6に示すようなノイズが含まれている。小型魚が通過した際のパルス波の振幅はノイズの振幅と同程度であることが、プログラムによるパルス波の自動計数を困難にしている。そのため、小型魚のパルス波をプログラムにより高精度で自動計数するためには、ノイズの振幅に対してパルス波の振幅を相対的に大きくし、S/N比を向上させる必要がある。

ノイズの周波数帯が魚の通過によるパルス波の周波数帯と異なる場合、特定の周波数帯（ノイズの周波数帯）のみを除去するバンドパスフィルター処理を施すことで、ノイズの振幅を減衰させS/N比を向上させることができる可能性がある。本章ではカウンター回路から出力される信号に、フィルター処理を施し、S/N比の向上を試みた。まずフィルターの

帯域を決定するために、ノイズ A、ノイズ B のみが記録されている計測データと、パルス波が記録されている計測データのスペクトル解析を行った。なお解析には、「SPECTRALANALYZER SPCANA Ver4.8」（鎌田，2013）を使用した。

結果を図 4-3-1, 4-3-2 に示す。ノイズ A, B のパワースペクトルには、34Hz 付近, 44Hz 付近, 46Hz 付近の帯域に大きなピークが存在する。一方、パルス波が含まれたデータのパワースペクトルには、0.2~10Hz, 22~24Hz, 40~42Hz の帯域に大きなピークが存在する。パルス波が含まれたデータのパワースペクトルは、パルス波とノイズ双方の周波数特性を反映していると考え、図 4-3-1, 4-3-2 のパワースペクトルに共通して存在する 30Hz 以上の周波数帯のピークは、ノイズに由来するものと考えられる。一方、図 4-3-2 のみに存在する 0.2~10Hz, 22~24Hz のピークは、パルス波の周波数帯域と推測される。

以上の結果を踏まえ試行錯誤の結果、この 2 つのピークのうち、パワースペクトルの大きな 0.2~10Hz のピークの主要な部分のみを通過させるように、フィルターの通過帯域を 0.5~12.0Hz（図 4-3-3）と決定した。

(2) フィルターの効果の検証

フィルターの効果を検証するために、第 4 編第 2 章で計測したデータに、前出の「SPCANA Ver4.8」を用いて、フィルター処理を施した。フィルター処理による計測データの変化を図 4-3-4 に示す。フィルター処理によりノイズが減少し、パルス波が明瞭になっているのがわかる。フィルター処理によるパルス波 6 サンプル、ノイズ 1 サンプルの振幅、S/N 比の変化を表 4-3-1 に示す。フィルター処理により、ノイズの振幅は 0.117V から 0.04V と 34% に減少しているが、パルス波の振幅はフィルター処理前の約 70%に維持されており、フィルター処理により S/N 比が約 2 倍になっている。計測データをバンドパスフィルター処理することでパルス波の S/N 比を向上させられることが示された。

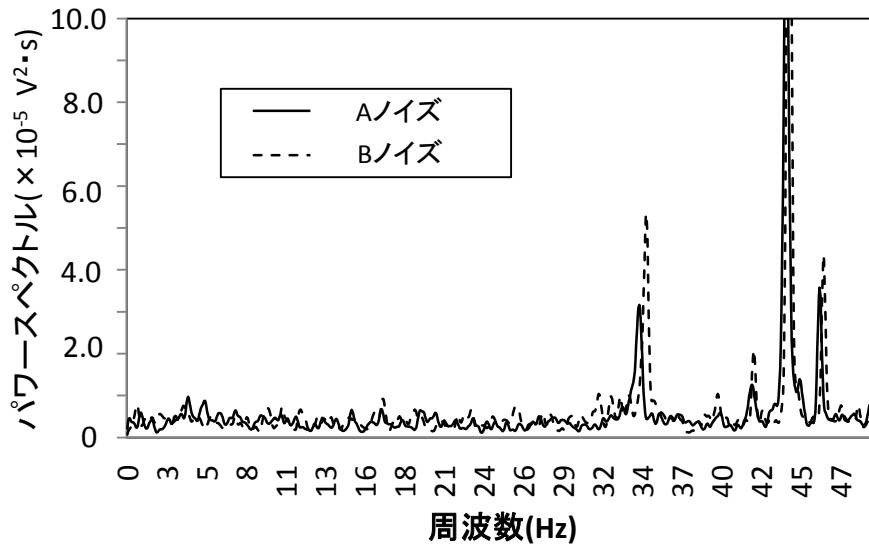


図 4-3-1 ノイズの周波数特性

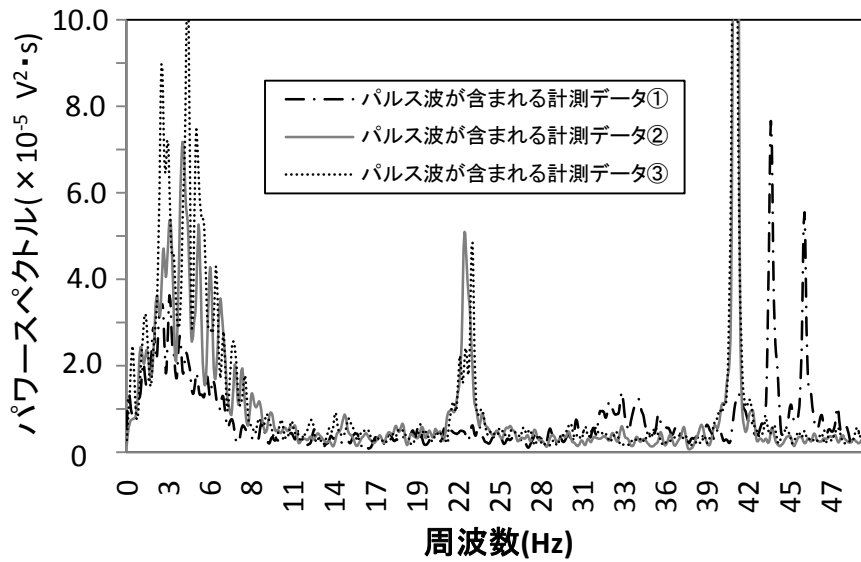


図 4-3-2 パルス波の含まれたデータの周波数特性

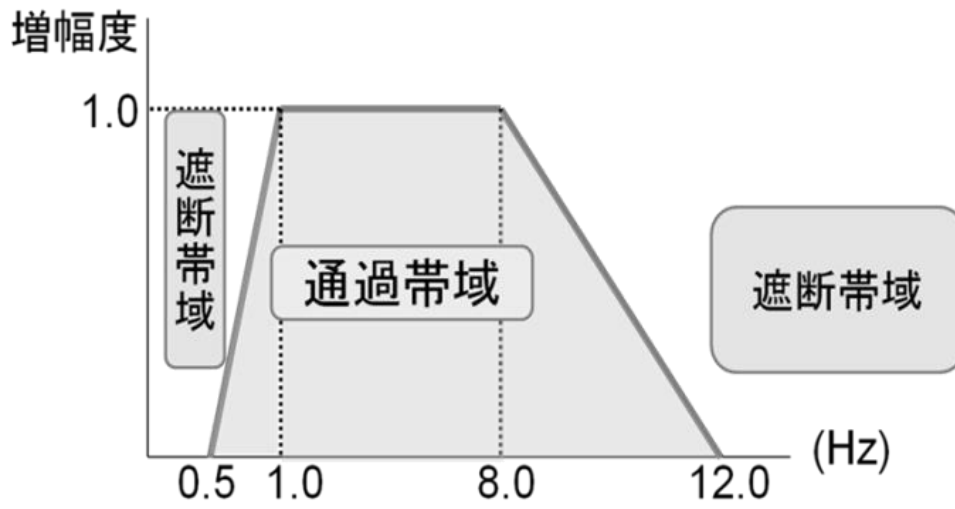


図 4-3-3 バンドパスフィルターの範囲

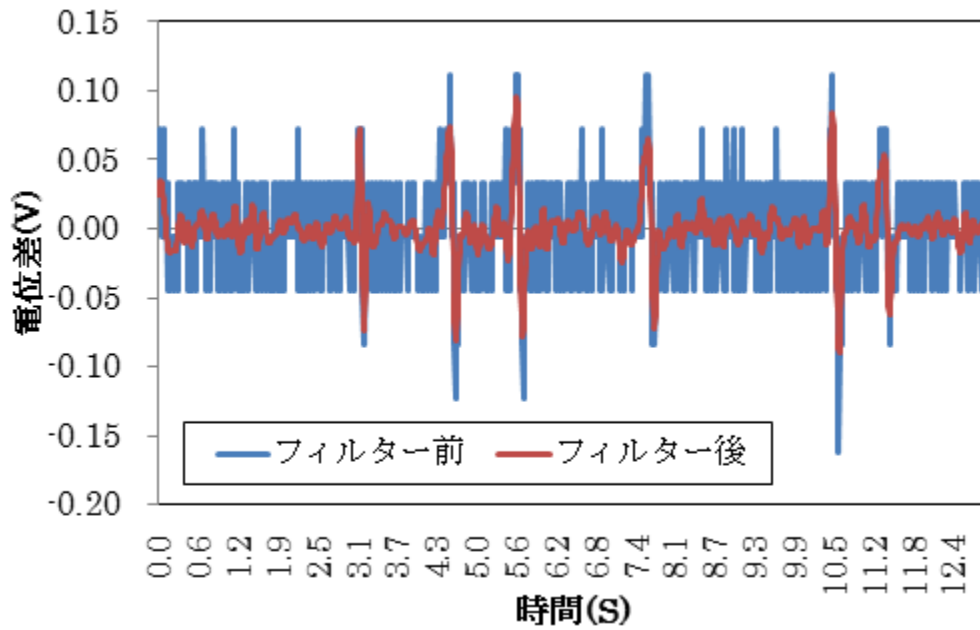


図 4-3-4 フィルター処理前後の波形

表 4-3-1 フィルター処理前後の振幅と S/N 比の比較

	フィルター処理前		フィルター処理後		フィルター処理後の 振幅の減少率	フィルター処理後の S/N比の増加率
	振幅(v)	S/N比	振幅(v)	S/N比	振幅(v)	S/N比
ノイズ	0.12	-	0.04	-	0.34	-
パルス波	0.16	1.33	0.15	3.65	0.94	2.74
	0.24	2.01	0.16	3.88	0.66	1.93
	0.24	2.01	0.17	4.30	0.73	2.14
	0.20	1.67	0.14	3.45	0.71	2.06
	0.27	2.34	0.17	4.32	0.63	1.84
	0.16	1.33	0.12	2.89	0.74	2.17

第 4 節 微分処理後の波形からパルス波を計数する方法の検討

信号を時間微分することにより信号の時間変化の大きな箇所（エッジ）を検出できることが一般に知られている（例えば、ローゼンフェルト・カク，1978）．遡上した魚のパルス波をフィルター処理した後の波形（図 4-3-5）とそれを時間微分した波形（図 4-3-6）を比較すると，パルス波の頂点から底点に変化する箇所で時間微分後の波形が下に鋭く凸になっていることがわかる．降下する魚のパルス波を微分した場合には，パルス波の底点から頂点へ変化する部分で時間微分後の波形が上に凸になる（図 4-3-7）．

そこで本章では，フィルター処理後の信号に時間微分を施し（以下，微分処理とする），下に鋭く凸になっている部分（底点）を検出することで，魚が通過した際に生じたパルス波の検出・計数を試みる．この方法によるパルス波の計数精度と，従来大型魚の計数の際に用いられている，パルス波の頂点の値が一定値以上で，底点の値が一定値以下となっている波形をパルス波として検出・計数する手法（図 1-1-2）を用いた場合の計数精度とを比較し，この方法の有効性を検討する．

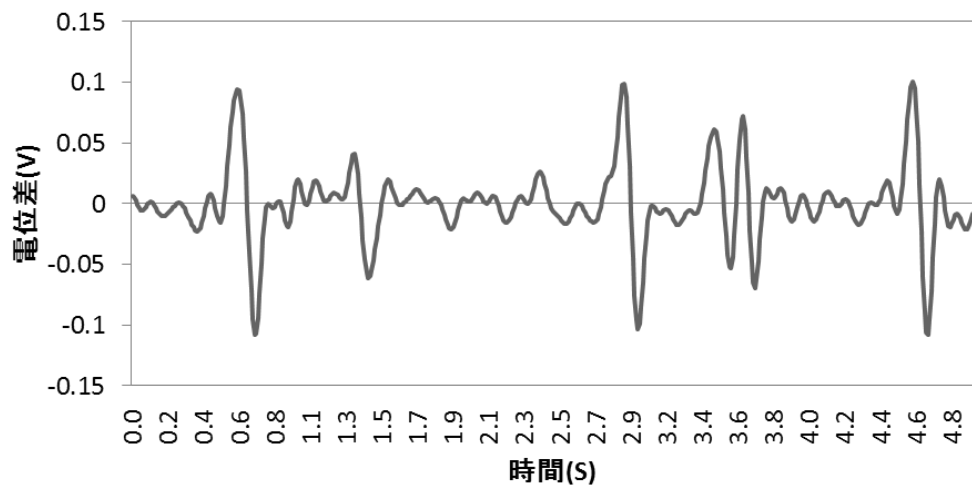


図 4-3-5 フィルター処理後の波形

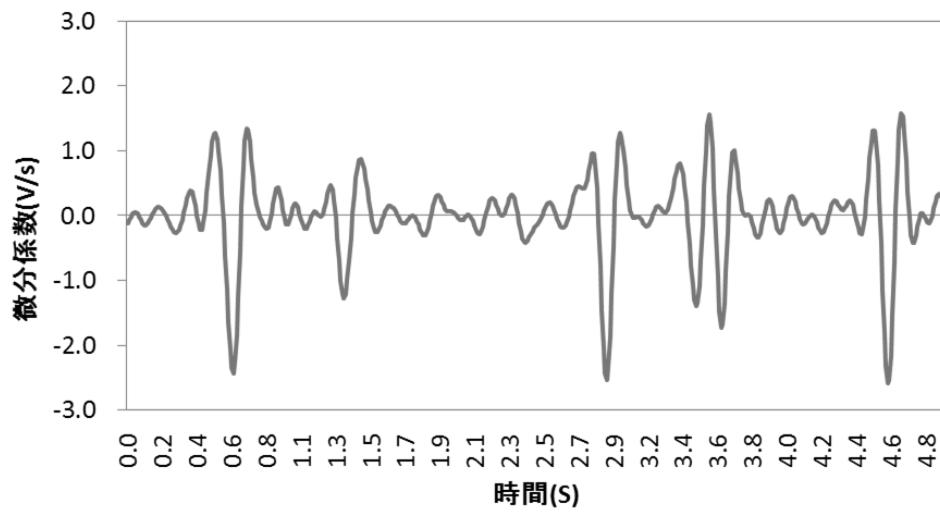


図 4-3-6 時間微分処理後の波形

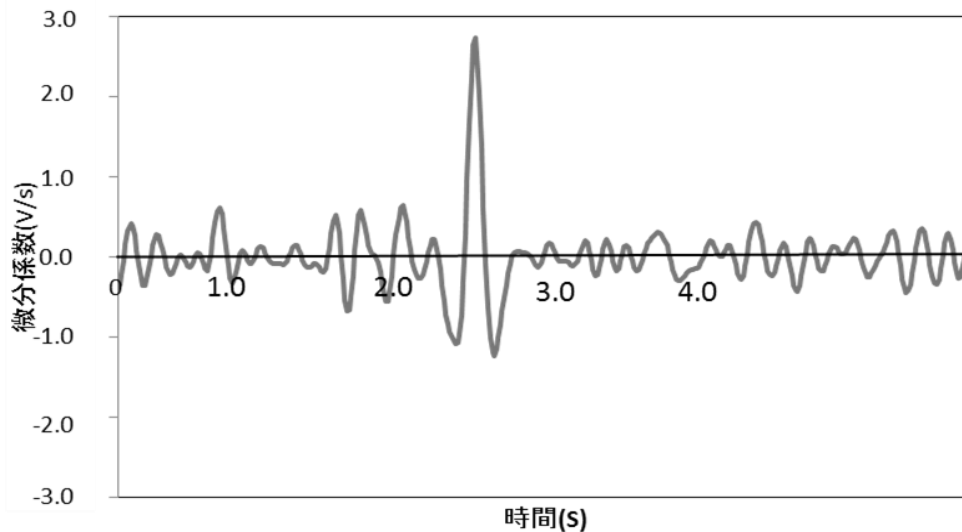


図 4-3-7 魚が降下時のパルス波を微分処理した波形

(1) 微分係数算出の際の Δt と下に凸な波形を検出する閾値が CA に及ぼす影響

信号に微分処理を行う場合、微分係数 $\Delta v / \Delta t$ を算出する際の分母 Δt が長くなるほど時間周期の長い (=周波数の低い) 時間変化が強調される。このため微分処理により強調しようとする時間変化の周期にあわせ Δt を選択する必要がある。本研究では、微分処理によりパルス波の頂点から底点に変化する部分が強調されるように、 Δt はパルス波の半周期 (図 1-1-2) 程度にするのが望ましいと推測される。

パルス波の頂部は魚が下流側の電極と中央の電極の間 (図 1-1-1 の b) を通過した際に、パルス波の底部は魚が中央の電極と上流側の電極 (図 1-1-1 の d) を通過した際に生じるため、パルス波の半周期は魚の遊泳速度と相関が高いことが分かっている。第 2 章の現地計数の際に使用した電極ユニットでは、電極が 6.5cm 間隔で設置されている。遡上する場合などに魚が発揮できる最大速度 (突進速度) は一秒間に体長の 10 倍程度であるとされている (ダム水源地環境整備センター, 1998)。第 2 章の現地調査時の小型魚の平均体長は 7.9cm であることから、突進速度は 0.79 m/s 程度と推測される。したがって、パルス波の半周期

は $6.5\text{cm} \div 0.79\text{m/s} = 82\text{ms}$ (ミリ秒) 程度と推定される。

本研究で使用したデータから抽出した 100 個のパルス波の半周期の頻度分布を図 4-3-8 に示す。パルス波の半周期の頻度は 81~120ms で高くなっており、電極間隔と突進速度から推定した半周期とほぼ一致している。

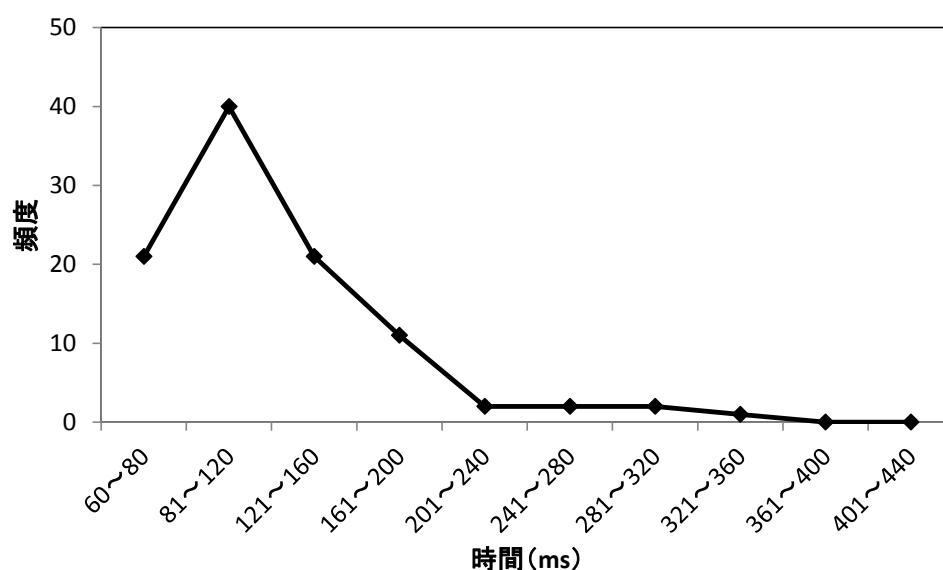


図 4-3-8 パルス波の半周期の頻度分布

そこで本項では、 Δt を 60ms, 80ms, 100ms, 120ms, 140ms の 5 通り設定し、計測データに微分処理を行った。さらに閾値を -0.8V, -1.0V, -1.2V, -1.4V の 4 通り設定し、下向きに凸な波形のうち底点が閾値を下回るものの発生時刻を記録した (図 4-3-9)。この結果を、カウンター部を撮影したビデオ画像と照合し、次式により計数精度 CA を求めた。

$$CA = \frac{X}{X+Y+Z} \times 100(\%) \quad (4-3-1)$$

ただし、X：魚が遡上した際にパルス波が計数された数、Y：魚が遡上した際にパルス波が計数されなかった数、Z：魚が遡上していないがパルス波が計数された数

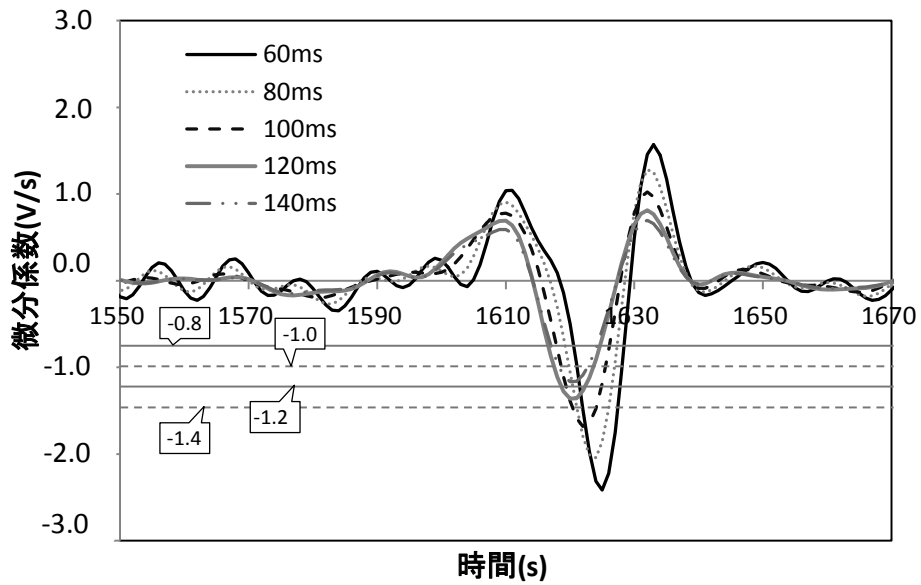


図 4-3-9 微分係数の計数精度の変化についての設定条件

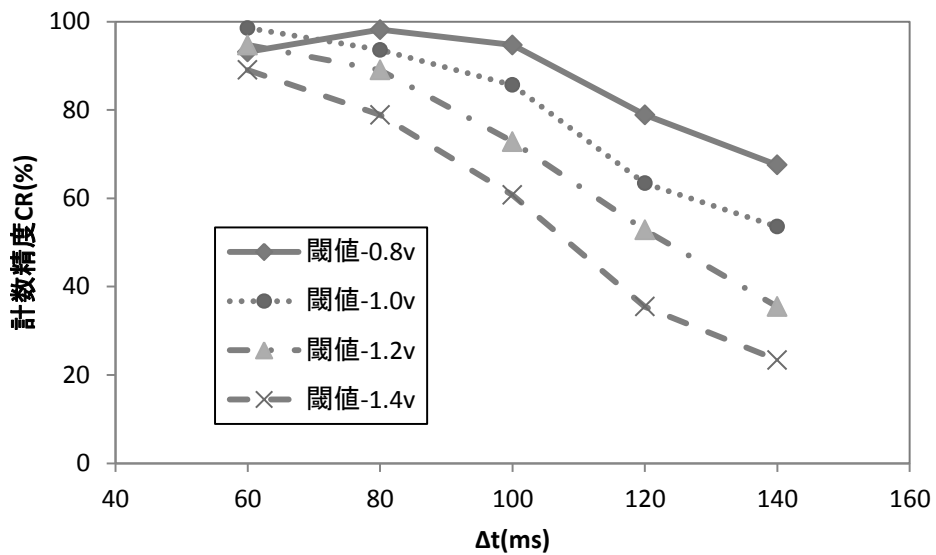


図 4-3-10 微分処理に用いる Δt , 微分波形の下向きに凸の箇所を検出するための閾値と

計数精度の関係

図 4-3-10 は Δt と微分波形の下向きに凸の箇所を検出する際の閾値が計数精度に及ぼす影響を示した図である。閾値が-1.0~-1.4v の場合、60ms~140ms の範囲では Δt が小さくなるほど計数精度は増加するが、閾値が-0.8v の場合、 Δt が小さくなるほど計数精度は増加するものの Δt が 80ms 以下では計数精度が減少している。これは Δt が小さくなるほど微分波形が鋭くなり、下向きに凸な波形のピークの値が小さくなり（図 4-3-9）、閾値を下回る波形の数が増加するが、閾値が大きな条件（例えば $\Delta t=60\text{ms}$ 、閾値-0.8v/s）では、魚の通過によるパルス波に加えて、ノイズの波形の一部も閾値を下回り誤計数されるようになり、計数精度が低くなるためである。第 4 編第 2 章で得られたデータの場合、 $\Delta t=60\text{ms}$ 、閾値-1.0V/s、または $\Delta t=80\text{ms}$ 、閾値-0.8V/s の条件で計数精度が約 100%であることから、これらが最適な Δt 、閾値の設定値であるといえる。

(2) 微分波形からパルス波を計数する方法と従来の方法の計数精度の比較

ここで、(1)で示された計数に最適な $\Delta t=60\text{ms}$ 、閾値-1.0V/s の条件で計数する方法と、第 2 編で採用した、計数条件を満たしたパルス波を目視で計数する方法、従来大型魚の計数の際に行われている、パルス波の頂点の値が一定値以上で、底点の値が一定値以下となっている波形をパルス波として検出する方法をそれぞれ用いた場合の計数精度 CA を比較する。

(1)で用いた計測データを用い、下記の i)~v)の方法で CA を求める。

- i) フィルター処理前のデータを使用し、第 4 編第 2 章の計数法に従ってパルス波を計数
- ii) フィルター処理後のデータを使用し、底点が-0.05V 以下で頂点が 0.05V 以上のパルス波を計数
- iii) フィルター処理後のデータを使用し、底点が-0.04V 以下で頂点が 0.04 V 以上のパルス波を計数

iv) フィルター処理後のデータを使用し、底点が $-0.03V$ 以下で頂点が $0.03V$ 以上のパルス波を計数

v) フィルター処理と微分処理 ($\Delta t=60ms$) を施したデータを使用し、底点が $-1.0V/s$ 以下の波形を計数

結果を表 4-3-2 に示す。それぞれの方法の計数精度は、 $v > i > iv > iii > ii$ となっており、底点が閾値を下回った波形からパルス波を計数する方法の有効性を示す結果となった。

表 4-3-2 計数方法による計数精度の違い

i) 近藤ら(2013)	ii) $0.05v <, -0.05v >$	iii) $0.04v <, -0.04v >$	iv) $0.03v <, -0.03v >$	v) 微分- $0.01v >$, 閾値- $1.0v/s$
0.94	0.796	0.891	0.872	0.985

第5節 微分波形からパルス波を計数する方法の課題

前章で、魚カウンターで計測されたデータに微分処理を施し、底点が閾値を下まわった下向きに凸の波形を計数する方法が、従来用いられてきたパルス波の計数方法（頂点の値が一定値以上で、底点の値が一定値以下となっている波形を計数する方法）よりも計数精度が高いことが示された。

しかし、この手法の運用には注意が必要である。パルス波の振幅が同じであっても、パルス波の半周期が異なれば、微分係数の値が異なる。(1)の結果から Δt は、カウンターの電極間隔を魚の突進速度の推定値で除した値と同程度に設定すればよいことが推測される。

しかし、魚がセンサー部を通過する速度は、魚道の流速、流量、勾配、センサー部の設置場所など様々な条件により変化することが予想されることから、 Δt や閾値については計測条件に応じて調整が必要であると考えられる。

また、パルス波の波形から、センサー部を通った魚の遡上と降下の識別ができることが魚カウンターの特徴である。計測された信号に微分処理を施した場合、遡上魚のパルス波は下に凸の波形へ、降下魚のパルス波は上に凸の波形に変換されるため、遡上魚と降下魚の双方の計数に対応した計数方法を作る場合、降下魚計数用の閾値も設定しなければならない。遡上魚と降下魚では、魚がセンサー部を通過する速度が異なると考えられる。降下と遡上でセンサー部を通過する速度が異なる場合、パルス波の周期が変化するため、振幅が同じパルスであっても微分処理後の凸波形の大きさが異なることになる。したがって、単純に遡上時の閾値 $-1.0V/s$ の符号を変えたものを降下魚計数の際の閾値に設定した場合、十分な検出精度が得られない可能性がある。今回は現地での魚の降下時の波形データがないため、降下魚計数の閾値について検討ができなかった。今後は、降下魚の計数方法の検討が必要だと考える。

第6節 まとめ

本章では、小型魚をプログラムによりパルス波を自動計数できるようにすることを目的に、①バンドパスフィルター処理（以下フィルター処理）による S/N 比向上の可能性、②微分処理によるパルス波の検出の可能性について検討を行った。その結果、カウンターから出力される信号（計測データ）にバンドパスフィルター処理と微分処理を施し、設置した閾値を下回る波形を機械的に計数する手法を用いると、高精度で体長 8cm 程度の小型魚が計数可能であることが示された。

今回は 1 尾遡上のデータを対象に、計数方法を検討した。したがって、同時遡上が生じた場合、計数精度が低下することが予想される。そのため、同時遡上発生時の計数に最適な閾値の設定の仕方や、第 2 章で提案した遡上数を補正する補正式の実効性についても検

討する必要がある。また，降下魚の計数方法についても総合的に検討することが必要だと考える。

第5編 結論

第1章 各編で得られた成果

第1編では、魚カウンターを日本で実用化するにあたり、以下の4つの課題があることが提示された。

課題1 魚カウンターの設計・製作および日本の魚道等での使用を想定した場合の魚カウンターの基本的な性能の把握

課題2 魚カウンターセンサー部の構築方法の研究

課題3 欧米では研究事例の無い、小型魚計測に適したセンサー部の研究開発

課題4 小型魚自動計数のためのデータ処理方法の開発

第2編では、課題1に焦点を当てて研究を行った。

第1章では、魚カウンターセンサー部の回路を設計し、魚カウンターを用いた計数に必要なシステムを構築した。

第2章では、日本の魚道や小河川で、欧米で対象とされている体長50cm以上のサケよりも小さな体長20cm以下の魚を計数することを想定し、小型水路（幅20cm～100cm）を使用した室内実験を行い、計測条件とパルス波の振幅の関係を検討した。その結果、水路幅、電圧、遊泳高度、魚の大きさとパルス波の関係については従来の欧米での研究で得られた知見と同様であった。しかし、電極間隔については、欧米の研究事例では魚の体長と同程度の場合パルス波が最大となるとされていたが、本実験では魚が電極付近を遊泳する場合は、電極間隔が体長の1/2～体長程度に振幅が最大となり、電極から離れた場所では電極間隔が大きくなるほど振幅が大きくなる結果となった。さらに、振幅が0.1V以上のものを魚

カウンターで計数可能と仮定して、計数可能な条件について考察した。その結果、欧米でサケの計数に用いられている 5v の電圧を筆者が開発した魚カウンターに印加した場合、体長 20cm 以上の魚は計数可能であるが、体長 20cm 未満の魚は計数できないことが明らかになった。5v 以下の電圧で体長 20cm 未満の魚を計数しようとする場合には、新たなセンサーを開発する必要があることが明確になった。

第 3 編では、課題 2 に焦点を当てて研究を行った。

第 1 章では、魚カウンターのセンサー部プラットフォームを魚道の水理条件が設計指針を満足するように既設の魚道の越流部に後付けで構築し、遡上するサケを計数した。その結果、この方法でセンサー部プラットフォームを構築した場合、計数精度 96% という高精度でサケを計数可能であることが示された。また、魚カウンターを用いた調査に必要なコストを算出した結果、従来の計測方法よりも低コストで調査が可能であることが示された。

第 2 章では、小河川の一般の河川区間の河床や、実河川の河床形を模倣した多自然型魚道の河床に魚カウンターのセンサー部プラットフォームを設置し、河川を移動（遡上または降下）するサケやサクラマスを計数し、計数精度やセンサー部プラットフォームの構築方法について検討した。その結果、この方法では概ね 70% の精度で計数が可能であることが示された。計数精度を低下させる要因が明らかにされ、計数精度の低下を防ぐ、センサー部プラットフォームの構築方法が提案された。

第 4 編では、第 1, 2 章で課題 3 に、第 3 章で課題 4 に焦点を当てて研究を行った。

第 1 章では、体長 10cm 程度の魚の計数を目的とした小型魚計数用のセンサーユニットが開発され、小型魚が計数可能なセンサー部の電極の形状、電極間隔等の条件が明らかにさ

れた。

第 2 章では、第 1 章で開発したセンサーユニットを設置可能なプラットフォームを考案し、既設の魚道に後付けで構築し、魚道を遡上する小型魚（アユ）の数を計数した。その結果、各電極ユニットの単位時間あたりの遡上数が 50 尾／分未満と少ない場合には、1 分毎の遡上数がほぼ 100%の精度で計数できることが示された。単位時間あたりの遡上数が 50 尾／分以上と多くなった場合には、同時遡上が発生し、遡上数が増加するほど 1 分毎の遡上数の計数精度は低下するが、補正式により遡上数を補正することにより数 10 分毎の遡上数は、ほぼ 100%の精度で計数できる可能性が示された。

第 3 章では、第 2 章で得られたデータを用いて、バンドパスフィルター処理を行った後に、微分処理を行い下向きに凸な波形を計数する方法を開発した。この方法により、従来の方法より高精度で計数可能であることが示された。

本論文では、魚カウンターを日本で実用化するにあたっての 4 つの課題に取り組んだ結果、上述のような成果を得ることができた。

大型魚に関しては、利根大堰において 2007 年度から 8 年間にわたり、毎年 10 月から 12 月までの 3 ヶ月間、管理者による業務委託により、第 3 編第 1 章で開発した魚カウンターを用いてサケの計数が継続して行われており、遡上数結果も管理者 HP で公開されている（水資源機構利根導水総合事業所、2015）。また、新潟県十日町市の宮中取水ダムの魚道において、2013 年度から 3 年間にわたって、9 月から 10 月まで 2 ヶ月間、魚カウンターによるサケの試験計数が行われており、2016 年度から魚カウンターが正式な計数方法として採用される見込みである。

小型魚に関しては、第 4 編第 1 章で考案した小型魚計数用のカウンターユニットを第 4 編第 2 章で考案したプラットフォームに設置して行った試験計測により、第 4 編第 3 章で

示したデータ処理方法を用いると、同時遡上が発生しない条件下では 99%という高い精度で計数可能であることが示された。

以上のことから、本論文の目的である魚カウンターの開発は、実用性を十分見込める段階まで達成されたと考えられる。

第2章 今後の課題

今後、魚カウンターが低コストで魚類への負荷の小さな利用実態調査法として、より多くの魚道、河川において利用されるようになるためには、以下の課題の解決が必要だと考えられる。

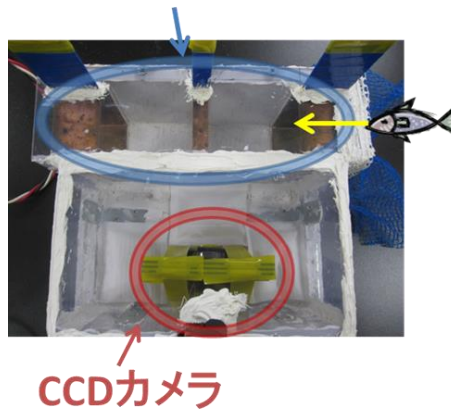
(a)複数魚種が混在する場合の計数方法の検討

本研究ではサケ等の大型魚、アユの小型魚に分けて計数試験を行ったが、河川や魚道によっては、多くの魚種、様々な体長の魚が混在して生息しており、魚種別の移動量を把握したいといったニーズもあると考えられる。

しかし、魚カウンターは、パルス波の数で魚の移動数を計数するため、魚種の判別ができない。また、魚体が大きいほどパルス波の振幅が大きくなる特徴があるため、移動している魚のおおよその大きさを把握することができるものの、魚体が電極に近いほど同じく振幅が著しく大きくなる特徴があるため、電極から離れた位置を通過した大きな魚と電極付近を通過した小さな魚の区別がつかない可能性がある。このため通過魚の体長を厳密に識別することはできない。魚道を移動する大部分が単一の魚種で同程度の体長の魚で占められる場合は、その魚の体長にあわせて、魚カウンターのセンサー部やデータの解析法を選択すれば、高精度で移動魚数を計数できると考えられるが、様々な魚種、体長の魚が混在している場合に、魚種別の移動数を計数するのは魚カウンター単体では難しい。

阿部(2014)は、体長が同程度で種類の異なる魚が混在する場合の魚種の識別方法として、魚カウンターのセンサーユニットの側面に CCD カメラを設置し、センサーユニット内を通過する魚を撮影し、パルス波の発生した時刻の映像を検索し魚種を識別する方法を提案している(図 5-2-1)。この手法では、夜間や濁水時は難しいものの、日中水中が十分に明るい時間帯であれば魚種の判別が可能になると推測される。魚カウンターの利用可能性を広げ

センサーユニット



平面図

図 5-2-1 CCD カメラを側面に設置した魚カウンターのセンサーユニット (阿部, 2014)

るためにも魚カウンターと CCD カメラを連動させるソフトウェアの開発が必要となる。

また、大型魚と小型魚が混在するような場合には、流れの流速が大きな場合、小型魚は流速が相対的に小さな水路壁面付近を好んで遊泳する性質を利用し、底面付近に小型魚用カウンターを設置し、小型魚用カウンターの上に大型魚用のカウンターを設置するといった方法により、それぞれの魚数を計数出来る可能性がある。今後は計数箇所魚種の分布を考慮したセンサー部の設置方法とデータの解析方法を検討する必要がある。

(b)同時遡上発生時の計数精度低下を抑える方法の検討

第 4 編第 2 章により魚カウンターのセンサーユニット内を通過する魚数が一定以上になると、センサーユニット内に複数の魚が同時に存在する同時遡上が起こり、計数精度が低下することが分かった。しかし、同時遡上が発生した場合の計数精度の低下の割合には一定の傾向があるため、補正式を求めることができれば計数精度を補正することが可能であることもわかった。補正式を用いることで、従来の主流となっている捕獲用トラップを用

いた計数方法では難しい、1時間毎といった短い時間間隔の遡上数の変化を高い精度で計数可能となることが示された。今後、魚カウンターを用いて、稚アユ等の群れを成して移動する傾向の強い魚の遡上数を計数する場合には、補正式が不可欠であると考えられる。

しかし、補正式の関数形はセンサーユニット内を通過する魚の体長や、通過速度、センサーユニットの形状によって変化する可能性があるが、それらの因子が具体的に式形にどのような影響を与えるか分かっていない。また、第4編第3章では同時遡上が生じていない場合のデータを用いて、小型魚を精度良く自動計数するためのデータ処理方法を検討しているが、同時遡上が発生した場合このデータ処理方法がどの程度有効なのかわかっていない。

今後は、同時遡上が発生する条件での計数を積み重ねることにより、センサーユニット内を通過する魚の体長や、通過速度、センサーユニットの形状が補正式に及ぼす影響を明らかにするとともに、同時遡上起きた場合でも高い精度で自動計数が可能になるようなデータ処理方法の検討が必要である。

(c) 野外での長時間自動計数を容易にするための魚カウンターの省電力化

現在の魚カウンターは、センサー部から送られてくるデータをPCに全て記録し、後処理によりパルス波を計数することで魚の通過数を求めているため、長期の運用には商用電源が欠かせない。魚カウンターは、頭首工や砂防堰堤の魚道への設置を想定しているが、砂防堰堤周辺では商用電源が利用できない場合が多い。このような場所で、魚カウンターによる長期自動計数を可能にするためには、魚カウンターを省電力化し、太陽電池やバッテリーで駆動できるように改良することが必要である。具体的には、魚カウンターのセンサー回路にマイコンを実装し、マイコンによりデータをAD変換し、パルス波の数をリアルタイムで計数し、通過数のみをバッテリー駆動のデータロガーに記録するようにするなど装置

の改良が必要となる.

これらの課題が解決され, 魚カウンターが広く普及することを期待する.

引用文献

阿部舞(2014) : 小型魚計測用魚カウンターの現地運用における汎用性の向上及び魚種判別機能の追加, 平成 25 年度新潟大学卒業論文, 24p

浅石理子, 権田豊, 川邊洋, 近藤康行 (2010) : 小型魚計測に適した魚カウンター用センサーの検討, 平成 22 年度砂防学会研究発表会概要集, p.168-169

Beaumont, W. R., Mills, C. A. and Williams, G. I. (1986) : Use of a microcomputer as an aid to identifying objects passing through a resistivity fish counter, *Aquaculture and Fisheries Management*, 17, p.213-226,

Bussell, R. B. (1972) : A review of the development of fish counting equipment, *Association of River Authorities Year Book 1972*, p.131-139

ダム水源地環境整備センター (1998) : 最新 魚道の設計—魚道と関連施設, 信山社サイテック, 581p

傳田正利, 天野邦彦, 辻本哲郎 (2005) : 魚類行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, p.459-464

Dunkley, D. A., Shearer, W. M. (1982) : An assessment of performance of a resistivity fish counter, *Journal of Fish. Biology*, 20, p.717-737

Dunkley, D. A., Shearer, W. M. (1989) : Swimming height of Atlantic salmon, *Salmo salar L.*, crossing a Crump weir, *Aquaculture and Fisheries Management*, 20, p.193-198

権田豊, 近藤康行, 高橋直己, 宮江介 (2014) : 小規模河川を移動するサケおよびサクラマス の自動計数の試み, *水産技術*, 7 (1), p.1-16

羽田野義勝 (2012) : 利根川に大量のサケ -魚道改築の効果-, *農村工学研究所メールマガジ*

ン 23 (2012 年 2 月号) , http://www.naro.affrc.go.jp/nkk/mail_magazine/files/mm23_02-01.pdf

(2012.10.7 閲覧)

林田寿文, 渡邊和好, 矢部浩規 (2014) : バイオテレメトリーを用いた小型魚の降下行動調査事例の紹介, 寒地土木研究所月報, 730, p.45-48

今井智, 大本謙一, 高橋昌也, 宮本幸太, 小野郁夫, 大熊一正 (2010) : 北海道千歳川に遡上するサクラマス産卵親魚の由来と移動様式, 日本水産学会誌, 76 (4), p.652-657

石崎大介, 淀太我, 吉岡基 (2010) : 三重県加茂川におけるウグイの降海時期と降海時の体長, 日本水産学会誌, 76 (5), p.920-925

岩見聡 (2005) : 魚道遡上魚数リアルタイム自動計数システムの開発, 全国魚道実践研究会議 2005in 岐阜論文集, p.92-95

泉完, 工藤明, 東信行, 佐藤正一 (2000) : ハイブリッド式魚道のプールタイプの流況におけるウグイの遡上行動実験, 河川技術論文集, 第 6 巻, p.131-136

泉完, 高屋大介, 工藤明, 東信行 (2003) : 赤石第 2 頭首工のアイスハーバー型魚道隔壁における魚類の遡上行動, 水工学論文集, 第 47 巻, p.763-768

神野忠弘, 岩田幸雄, 関谷明 (2004) : 急勾配斜路式魚道の現地遡上実験報告, 河川技術論文集, 第 10 巻, p.429-434

河林百江 (2009) : 遡上するサケへの配慮とコスト縮減を両立した魚類遡上調査手法の検討, 水とともに 水がささえる豊かな社会, 2009 年 8 月号, p.26-30

岸野底, 四宮明彦 (2004) : 奄美大島の河川におけるリュウキュウアユ遡上個体の出現状況, 日本水産学会誌, 70 (2), p. 179-186

小出水規行 (2002) : 長良川河口堰魚道の遡上魚類群集に関するモニタリングデータの解析, 河川技術論文集, 第 8 巻, p.331-336

- 国土交通省河川局 (2005) : 魚ののぼりやすい川づくり手引き, 160p
- 近藤康行, 権田豊 (2008) : 砂防堰堤魚道における魚カウンターの研究について, 河川技術
論文集, 第 14 巻, p.469-472
- 近藤康行, 寺井啓之, 権田豊 (2009) : 小型魚計測を目的とするマルチセンサー型魚カウン
ターの研究, 平成 21 年度砂防学会研究発表会概要集, p.470-471
- 近藤康行, 権田豊 (2012) : 魚カウンターによるサケの遡上数計測に関する研究, 土木学会
論文集 G, 68, p.1-12
- 近藤康行, 権田豊, 野村愛 (2013) : 小型魚用魚カウンターを用いた魚道での小型魚計数実
験, 農業農村工学会論文集, 286, p.301-307
- 久保田仁志, 中村智幸, 丸山隆, 渡邊精一 (2001) : 小支流におけるイワナ, ヤマメ当歳魚
の生息数, 移動分散および成長, 日本水産学会誌, 67, p.703-709
- 國宗義雄, 平松祐介, 米山一良, 松田征也, 光永靖, 山根猛 (2008) : 超音波テレメトリー法
を用いた琵琶湖固有種ニゴロブナ, ゲンゴロウブナの繁殖期における行動生態, 平成 20
年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.29
- Lethlean, N. G. (1953) : An investigation into the design and performance of electric fish-screens
and an electric fish-counter, Transactions of the royal society of Edinburgh 62, p.479-526
- McGrath, C.J. (1975) : A report on fish counting installations in Ireland, EIFAC Technical Paper,
(23) Suppl. 1, vol.2, 447-65
- 前川光司 (2004) : サケ・マスの生態と進化, 文一総合出版, 335p
- 前川光司, 高橋剛一郎 (1997) : 溪流魚と砂防工事, 砂防学会誌, Vol.50, No1, p.61-66
- 牧口裕也, 今野義文, 新居久也, 中尾勝哉, 永田光博, 上田宏 (2008) : 標津川の蛇行復元
がカラフトマスの遡上行動に与える影響, 平成 20 年度日本水産学会春季大会講演要旨集,

p.178

森誠一（1998）：自然への配慮としての復元生態学と地域性応用，生態工学 1（1），p.43-50

森口博文（1990）：利根大堰を遡上するサケ，ダム技術，40，p.63-73

森口博文（1991）：利根大堰の魚道遡上調査について，ダム技術，59，p.62-75

宮腰靖之，鷹見達也，春日井潔，大森始，竹内勝巳，永田光博（2007）：小河川での標識再捕によるサクラマス遡上尾数の推定，北海道水産孵化場研報，61，p.11-18

水資源機構長良川河口堰管理所(2015)：アユ・サツキマスの遡上情報，

http://www.water.go.jp/chubu/nagara/15_sojou/（2015.8.14 閲覧）

水資源機構利根導水総合管理所(2007)：平成18年度利根大堰サケ遡上量調査業務報告書，
p. 2-19

水資源機構利根導水総合事業所（2012）：利根導水の諸元，

http://www.water.go.jp/kanto/tono/07sizenn_daisuki/02ayu/ayu4.html（2012.10.7 閲覧）

水資源機構利根導水総合事業所（2015）：サケ・アユの遡上データ，

http://www.water.go.jp/kanto/tono/08sojyo_data/sojyo_main.html（2015-06-20 閲覧）

中村俊六（1997）：砂防ダムの魚道，砂防学会誌，Vol.50，No.3，p.52-57

中村智幸，糟谷浩一（2004）：栃木県那珂川における両側回遊型アユの遡上日と遡上群数の予測，日本水産学会誌，70，p.288-296

新村安雄（2000）：長良川河口堰の呼び水式魚道とせせらぎ魚道—稚アユの遡上からみた機能比較—，応用生態工学，Vol.3，p.169-178

酒井明久（2010）：琵琶湖産アユにおける河川への遡上開始日と遡上尾数の予測，日本水産学会誌，76（4），p.670-677

佐藤良三・東 照雄・武藤光司（2006）：PIT tag を用いた個体識別法による日光系ニジマス

- (*Oncorhynchus mykiss*) の成長率に関する遺伝率の推定, 水研センター研報, 16, 1-7
- 笹浩次, 後藤浩一, 実松利朗, 嶋田啓一, 井口謙, 和田清 (2005) : 長良川中下流における稚アユの遡上特性と遡上量調査の効率化に関する一考察, 河川技術論文集, 第 11 巻, p.453-458
- 佐藤尚之, 権田豊, 川邊洋, 山本仁志 (2006) : 砂防ダム魚道における魚カウンターの実用化に関する研究, 平成 18 年度砂防学会研究発表会概要集, p.436-437
- Simpson, D. (1978) : Electrical resistivity fish counters, Rhythmic Activity of Fishes, J. E. Thorpe ed., Academic Press, London, p.259-268
- Smith, I. P., Johnstone, A. D. F. and Dunkley, D. A. (1996) : Evaluation of a portable electrode array for a resistivity fish counter, Fisheries Management and Ecology, 3, p.129-141
- Smith, I. P., Johnstone, A. D. F. and Smith, G. W. (1997) : Upstream migration of adult Atlantic salmon past a fish counter weir in the Aberdeen shire Dee, Scotland, Journal of Fish Biology, 51, p.266-274
- 田子泰彦 (2000) : 神通川と庄川におけるサクラマス親魚の遡上生態, 日本水産学会誌, 66, p.44-49
- 高橋剛一郎 (2000) : 魚道の評価をめぐって, 応用生態工学, Vol.3, p.199-208
- 高崎忠勝, 土屋十圀, 大竹義男 (1999) : 秋川における複合型魚道の効果, 河川技術に関する論文集, 第 5 巻, p.165-170
- 竹門康弘 (2000) : 長良川河口堰におけるモクズガニ *Eriocheir japonica* (de Haan) の遡上量分析に基づく魚道の評価, 応用生態工学, Vol.3, p.153-168
- 上田宏 (2004) : サケの母川回帰を解明するバイオテレメトリー, 海洋理工学会誌, 9 (2), p.191~199
- 和田清, 小出水規行, 大掘文彦 (2004) : 長良川河口堰の魚道における塩水遡上の動態と水生

- 生物の生息分布・遡上行動に関する一考察, 河川技術論文集, 第 10 巻, p.423-428
- 和田清, 小出水規行, 今村和志, 志村俊輔 (2003):長良川河口堰「せせらぎ魚道」における
モクズガニの着底・生息分布に関する現地調査, 河川技術論文集, 第 9 巻, p.493-498
- 山本聡, 故松宮義晴 (2001) : 千曲川における DeLury 法によるアユの資源尾数推定, 日本
水産学会誌, 67, p.30-34
- 柳瀬勝久 (2005): 紀の川大堰の魚道における遡上状況について,全国魚道実践研究会議
2005in 岐阜論文集, p.48-51
- 安田陽一, 大津岩夫, 浜野龍雄, 三矢泰彦 (2001) : 多様な水生生物の遡上・降河可能な魚道
の提案, 河川技術論文集, 第 7 巻, p.221-226
- 安田陽一, 大津岩夫, 三矢泰彦, 浜野龍雄 (2003) : 多様な水生生物の遡上・降河に配慮した
スリット砂防堰堤に設置する魚道の提案とその効果, 河川技術論文集, 第 9 巻, p.487-492
- 安田陽一, 大津岩夫, 高橋正行 (2006) : V 字溝型魚道の流況特性 —原型と模型からの経
験—, 河川技術論文集, 第 12 巻, p.385-390
- 安田陽一, 大津岩夫, 高橋正行, 森永正則, 三村進二 (2005a) :透過性パイプを用いた小段式
台形断面魚道の提案とその効果, 河川技術論文集, 第 11 巻, p.441-446
- 安田陽一, 大津岩夫, 高橋正行, 三村進二, 原口哲幸 (2005b) : 長崎県千綿川に設置された
台形断面魚道の特徴と魚道設置の効果, 河川技術論文集, 第 11 巻, p.435-440
- 横山雄哉, 越野陽介, 宮本幸太, 工藤秀明, 北田修一, 帰山雅秀 (2010) : 知床半島ルシヤ
川におけるカラフトマス *Oncorhynchus gorbuscha* の産卵遡上動態評価, 日本水産学会誌,
76, p.383-391
- 吉川智朗 (2005) : 魚遡上の調査システム (魚数自動計測数システム), 全国魚道実践研究
会議 2005in 岐阜論文集, p.58-61

謝辞

本博士論文の作成および研究にあたり，終始一貫してあたたかいご指導と激励を賜りました新潟大学農学部権田豊准教授に心から感謝の意を表します。師弟の関係であり，時に共同研究者であった権田豊准教授の励ましにより，二人三脚で0から始めたこの研究において，ここに一つの成果を残すことができました。海よりも深く，山よりも高い，言葉では言い尽くせぬ感謝を捧げさせていただきます。

新潟大学農学部川邊洋教授，岩手大学農学部井良沢道也教授には研究に関して多大なるご指導をいただきました。新潟大学農学部森井俊広教授，吉川夏樹准教授，鈴木哲也准教授，新潟大学災害復興研究所福岡浩教授には，博士論文の取りまとめ方に関して貴重なご助言をいただきました。深く感謝いたします。

新潟大学農学部砂防研究室の先輩，同輩である崎岡健児氏，西井洋平氏，香川高等専門学校の高橋直己助教，北海道栽培漁業振興公社の中尾勝哉氏，新居久也氏，テルモ株式会社の小寺岳彦氏には研究の進め方について親身に相談に乗っていただきました。心からお礼を申し上げます。

そして本研究は，佐藤尚之氏，人見伸也氏，寺井啓介氏，浅石理子氏，野村愛氏，中村香穂氏，赤羽悠氏，阿部舞氏，嶺出湧太氏をはじめとする新潟大学農学部砂防研究室の皆様のご協力があって達成することができました。ここに感謝の意を表します。

最後に、長い間研究生生活を支えてくれた近藤まゆみ・晋作，素晴らしい学びの機会を与えてくださいました近藤竹文・君江両氏に，感謝を捧げさせていただきます．