

原著論文

小規模河川内を移動するサケおよびサクラマスの自動計数の試み

権田 豊^{*1}・近藤康行^{*2}・高橋直己^{*3}・宮 江介^{*4}

Trials of resistivity fish counters for automatic counting of chum *Oncorhynchus keta* and masu *O. masou* salmon migrating in small rivers

Yutaka GONDA, Yasuyuki KONDO, Naoki TAKAHASHI and Kousuke MIYA

Resistivity fish counters were installed on simple platforms built on the beds of two small rivers and on a fishway to count migrating chum *Oncorhynchus keta* and masu *O. masou* salmon. Counters were captured with video camera from directly above, and the accuracy of the counters was evaluated by comparison with the numbers of fish counted by video observations. Chum salmon greater than 60 cm in body length were counted with considerable accuracy when we used a fish counter equipped with electrodes shorter than 3.2 m to apply a voltage of 5 V, and when the platform was less than 20 cm below the surface. We also examined factors decreasing the accuracy of the fish counters and suggested suitable designs for riverbed platforms to improve the accuracy of the fish counters.

2013年4月30日受付, 2014年6月5日受理

1997年の河川法の改正により, 河川環境(水質, 景観, 生態系等)の整備と保全が河川管理の目的に加わった。このため治水・砂防事業を実施する際には, 河川内での魚類の生息状況や産卵のための移動の実態を把握した上で, それらに極力影響の無いように配慮することが必要とされるようになった。実際, 多くの河川において河川改修後に魚類の生息環境調査などが行われるようになりつつあるが¹⁻⁶⁾, 魚類の生息環境調査を十分な頻度で実施するためには以下に述べるような問題がある。

河川改修における環境評価および, 河川内の魚類の移動や生態を調査する既往の研究においては, 魚類の計数方法には主に網や電気ショックを用いた捕獲調査, 潜水調査や目視調査, ビデオカメラを用いた調査などが用いられている¹⁻¹⁵⁾。ところが, 現在主流となっている方法の多くは調査・解析に人手を要するため, 運用コスト

に占める人件費の割合が高く, 調査費用が割高になる。そのため, 事業のたびに十分な調査を行うことは調査費用の点から難しい^{14, 15)}。

最近では, 魚の行動を把握するために, 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¹⁶⁻¹⁸⁾。バイオテレメトリーを用いた方法には, 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, 発信機を装着するため魚体を一度捕獲する必要があるため, 手間がかかるだけでなく, 発信機の値段が高価なため, 一般的な河川での計数方法として用いるのは難しい。また, 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¹⁹⁾。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

*1 新潟大学農学部 〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐二の町 8050

Faculty of Agriculture, Niigata University, 8050, Ikarashi-2-no-cho, Nishi-ku, Niigata, 950-2181, Japan
gonda@agr.niigata-u.ac.jp

*2 エコ・パワー株式会社

*3 香川高等専門学校建設環境工学科

*4 NPO 法人ジャパン・フォレスト・フォーラム

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。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。

河川内を移動する魚類を簡易的かつ低コストで計数する方法を開発することは、治水・砂防事業が魚類等の河川生態系に及ぼす影響を検討するための基礎データの蓄積を容易にし、河川環境に配慮した治水・砂防事業の伸展に貢献することが期待される。また従来、サケ *Oncorhynchus keta* やアユ *Plecoglossus altivelis* 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調査や生態調査等についても、同様に主に人力に頼った魚数調査方法により行われており²⁰⁻²⁹⁾、簡易的かつ低コストで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、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。

筆者らは、魚道を遡上する魚数を自動計数する「魚カウンター」の研究・開発を行っており、利根川の利根大堰に設置された魚道において、体長 50cm 以上のサケの遡上数を 96% の高精度で計数した実績を持つ^{14,15)}。

魚カOUNTERのセンサー部は、水中に等間隔に沈めた三本一組の電極と、電極間の電気抵抗の変化を計測・解析するセンサー回路で構成される。魚が通過する際に電極間の電気抵抗の変化が生じると、センサー回路からパルス状の電圧信号（以下パルス波とする）が出力される。このパルス波の数と形状から、通過魚の数、通過方法を計数する装置である³⁰⁾。魚カウンターには、魚の通過時間を詳細に記録できる他、運用コストが低い、魚の遡上・降下を妨げないという特徴がある。

前述したように、魚カウンターは7年間（2007～2013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¹⁴⁾ および河林¹⁵⁾ により、魚道でのサケの遡上数の計測に有用であることが実証されている。しかし、魚の生息域や産卵期における移動範囲の実態を把握するためには、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測ができるようになることが望ましい。そのためにはまず、比較的水位・川幅の小さい小規模な河川における魚カOUNTERの実用性の試験研究が必要であるが、魚カOUNTER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ことが必要と考えられる。

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OUNTERを利用するためには、センサー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、木製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、魚数を精度良く計測するためには、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：川幅が広が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OUNTER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。近藤・権田³⁰⁾ が実験水路で行った実験結果によると、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OUNTER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 *O. masou* の計数を行った。

材料および方法

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淵川（2009年12月12日8:00～17:00、13日8:00～14:00:計15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）

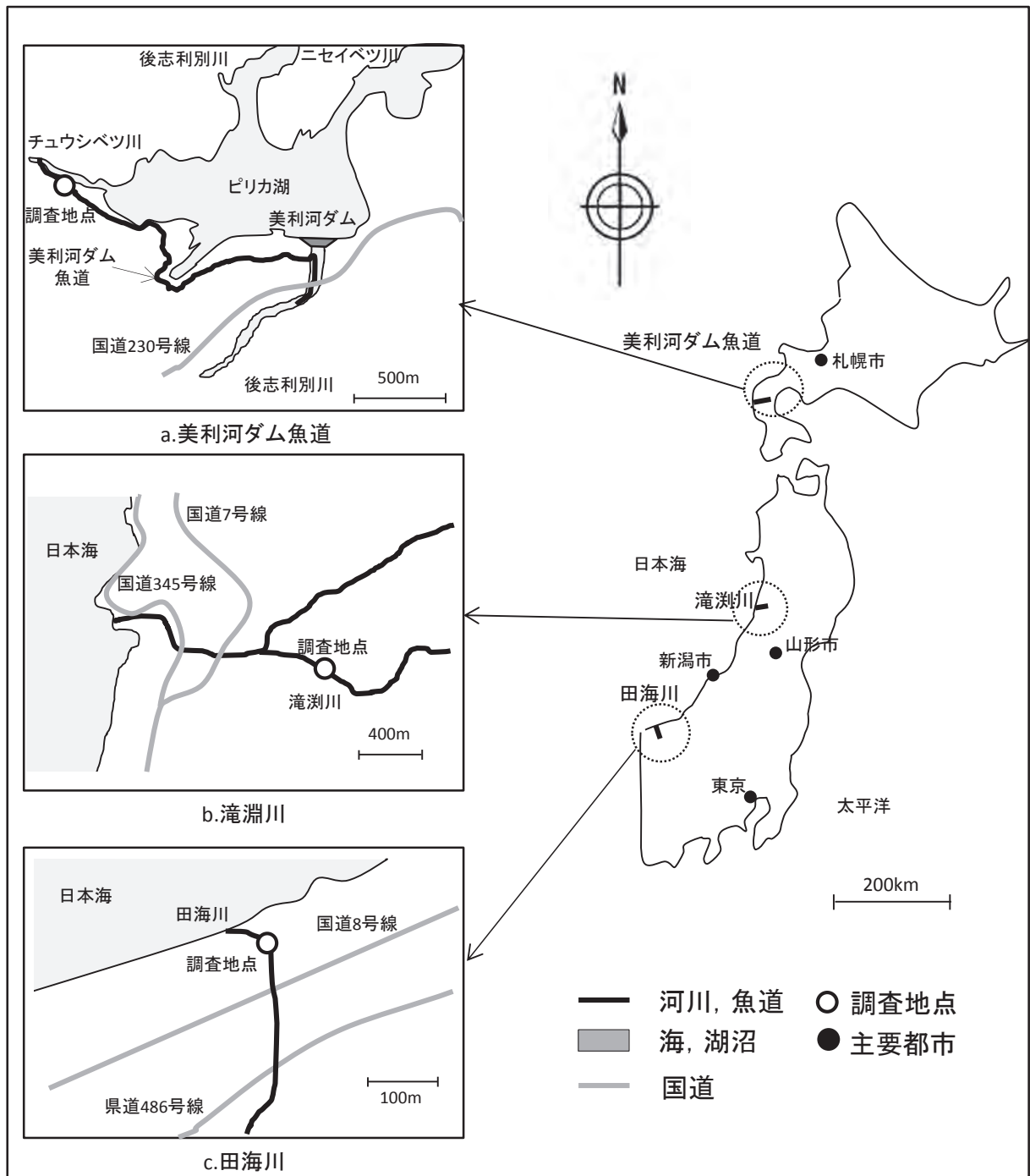


図1. 調査地点位置図

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上流の場所で行った。調査地点の100m上流にウライが設置されており、実験期間中はウライの付近で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

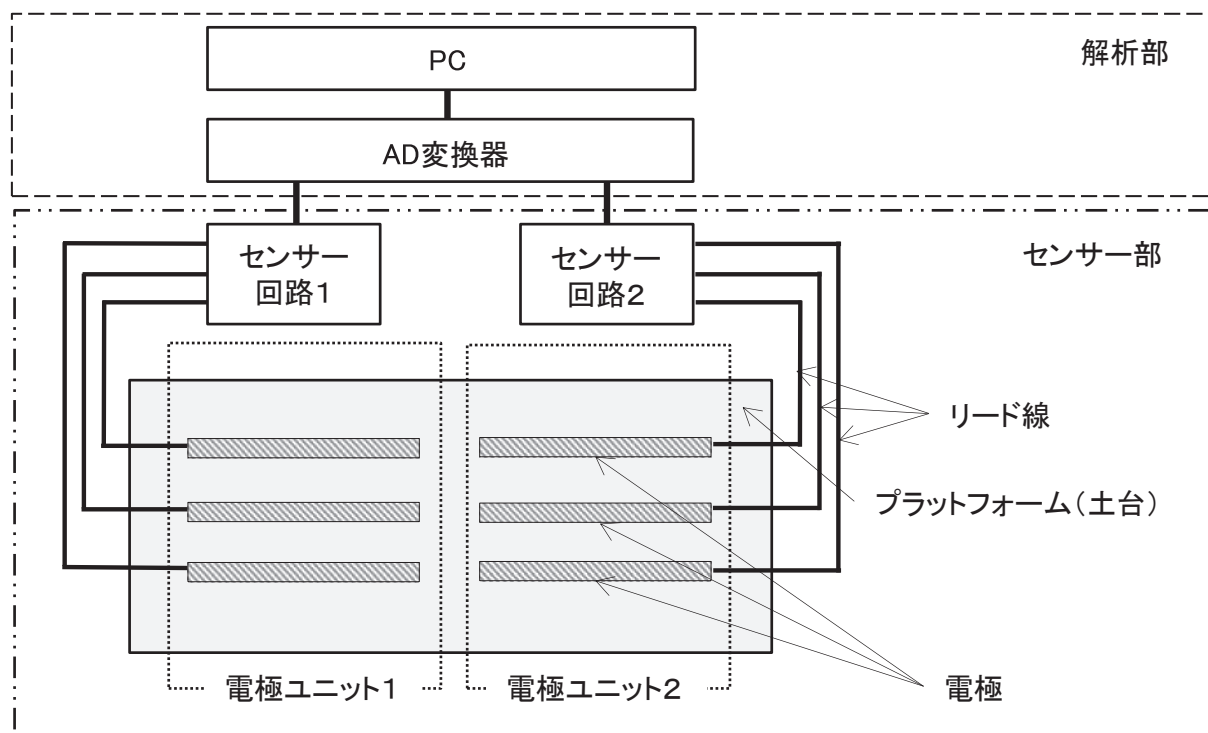


図2. 魚カウンターの構成

表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 | 滝淵川 | 美利河ダム魚道 |
|---------------|--------------|-----------------|---------|
| 電極上の流速 | 80, 160cm | 80, 160, 320cm | 80cm |
| 電極間隔 | 30cm | 30cm | 20cm |
| 印加電圧 | 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 | 滝淵川の河口から 1,500m | 美利河ダム魚道 |
| 対象魚 | サケ | サケ | サクラマス |

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。

プラットフォームの作成・設置 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2)。今回の一連の調査では、耐水ラワンベニヤ板(コンクリートパネル、以下コンパネ、縦90cm、横180cm)・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、各電極ユニットを別々のセンサー回路に接続した。既往の研究²⁹⁾によれば、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。田海川と

滝淵川では、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1)。各調査地点でのカウンターの設置状況を図3~5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。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。

田海川では、プラットフォーム上に、電極ユニットA(幅80cm)・電極ユニットB(幅160cm)を、滝淵川では、2009年12月12日には電極ユニットA(幅80cm)・電極ユニットB(幅160cm)を、2009年12月13日に

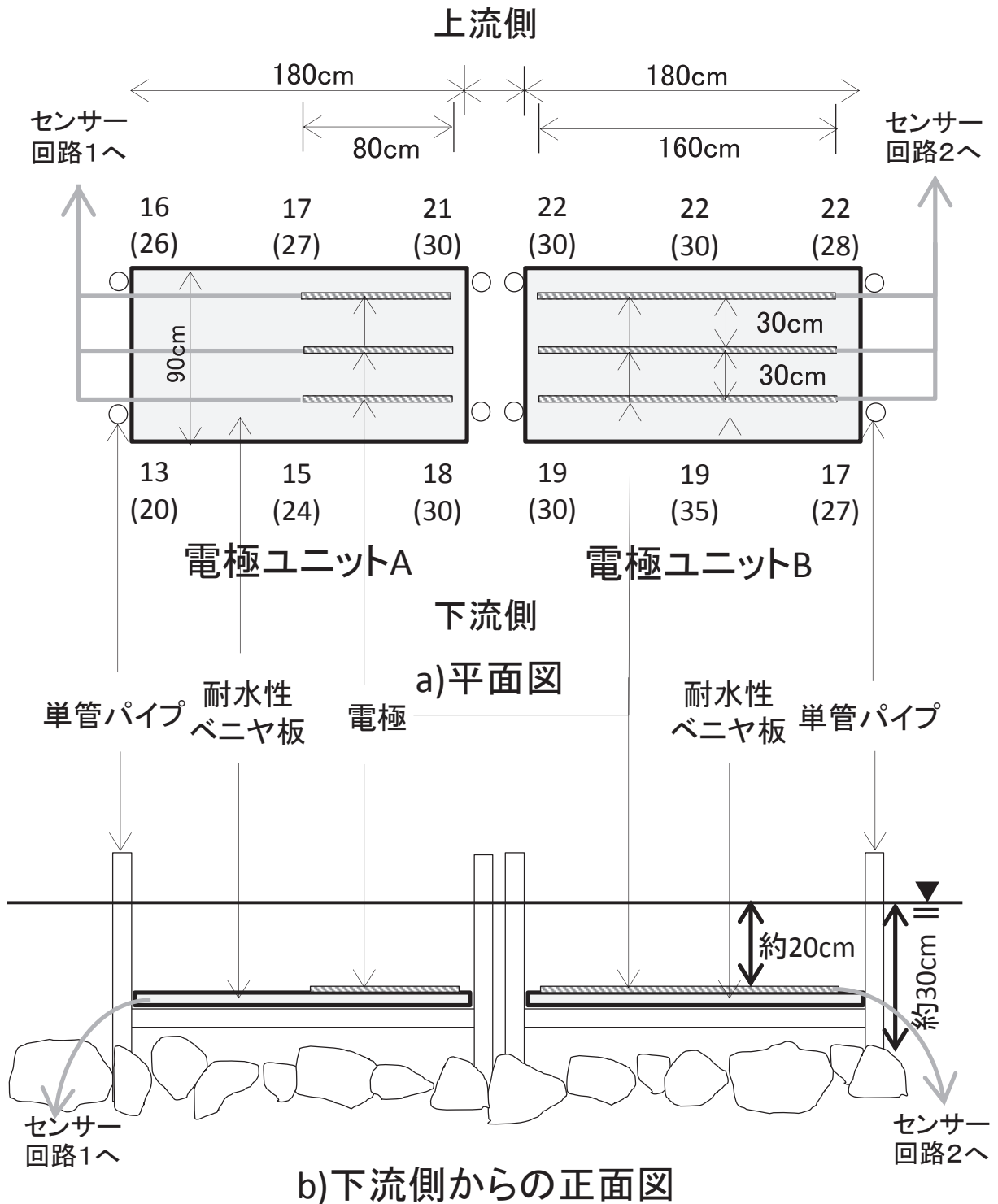
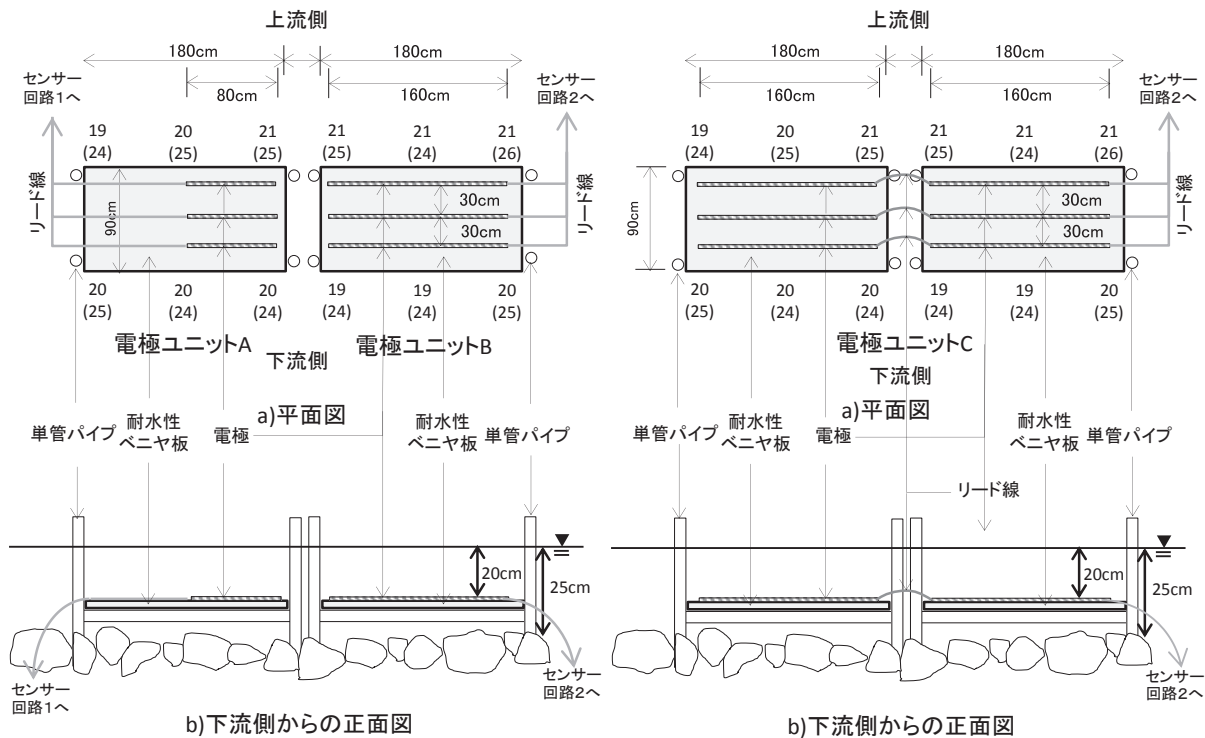


図3. 田海川に設置したプラットフォームの構造
 (図中の数字は耐水ベニヤ板上の水深, 括弧内は河床の水深, 単位 cm)



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)

は電極ユニット B を 2 つ連結した電極ユニット C (幅 320cm) を, 美利河ダム魚道では電極ユニット A1, A2 (それぞれ幅 80cm) を設置した。

各電極ユニットに印加する電圧は, 利根大堰の魚道でサケを計数した際と同様に 5V とした。魚カウンターの電位の計測には 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。

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。

データ解析方法 センサー回路から出力される電圧信号を PC で記録・解析し, 魚類の通過によりパルス波が発生した時刻を求めた。パルス波の振幅がノイズの振幅の 2 倍以上の場合, パルス波を容易に識別できることが経験的にわかっていることから¹⁴⁾, 計測ノイズの 2 倍以上の振幅のパルス波のみをパルス波として取り扱うこととした(表 2)。また, 魚の通過方向(遡上または降下)によって, 発生するパルス波の形状が左右反転する性質を利用し, 魚の通過方向を区別した。また, 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)を求めた。

$$\text{カウント率} = \frac{\text{魚カウンターにより計数された遡上数}}{\text{ビデオ映像から計数した遡上数}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

結果

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・滝淵川ではサケ, 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 6a), 降下したケース(図 6b), 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 6c), 通過中に滞留したケース(図 6d), 通過途中で滞留し U ターンしたケース(図 6e) の他, 複数が同時に遡上または降下し, パルス波が歪な形状となったケース(以下同時通過(図 6f))があった(表 3 - a ~ 3 - c)。遡上したケース, 降下したケースの場合は, パルス波が

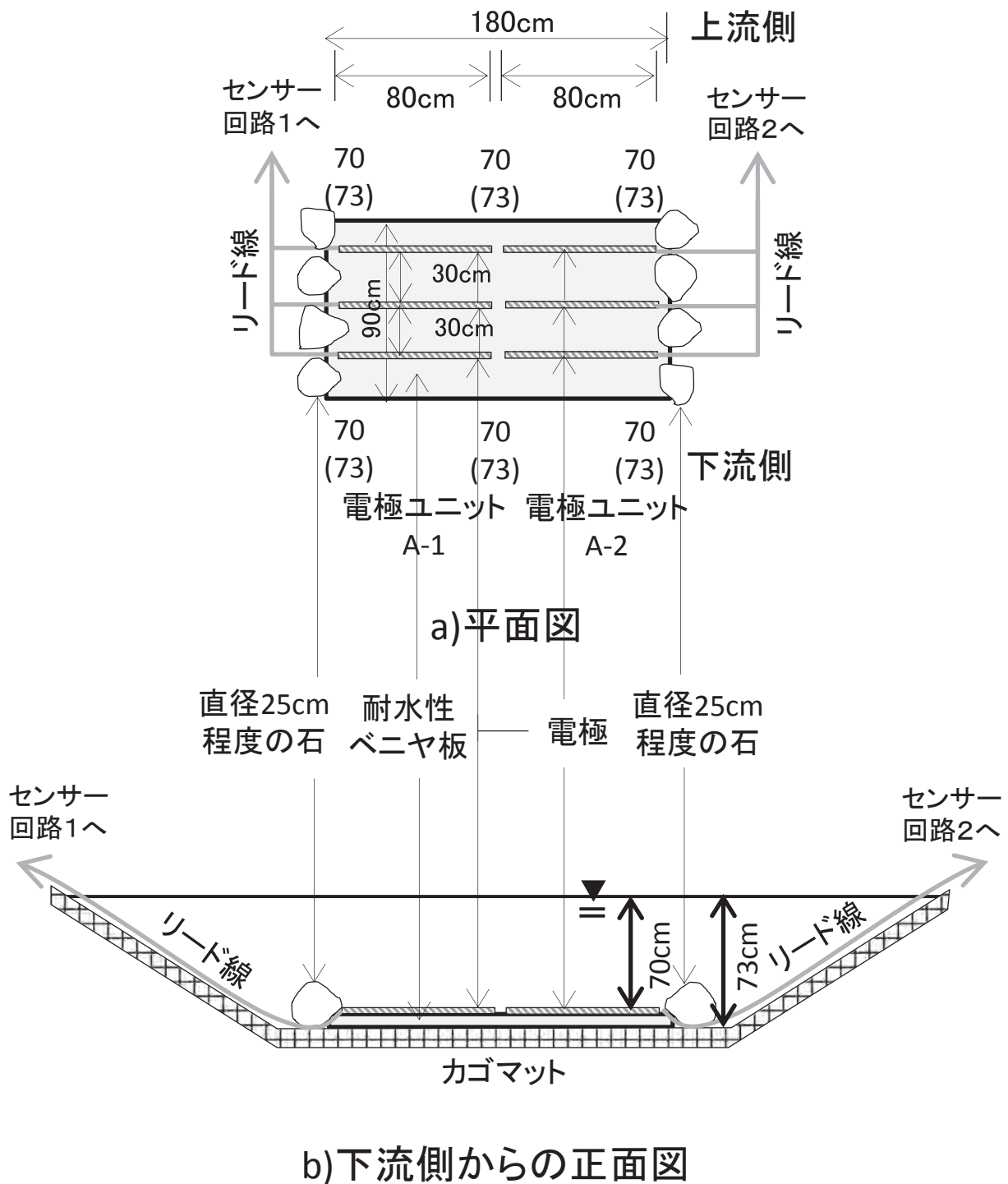
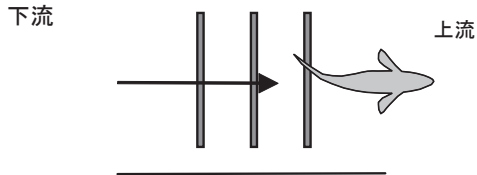
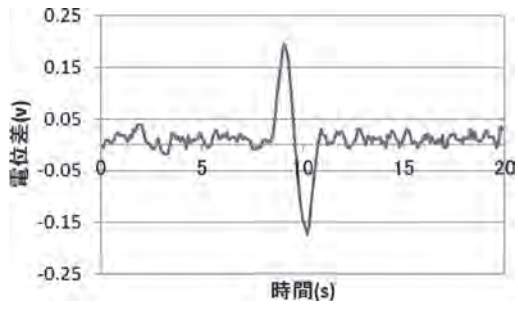


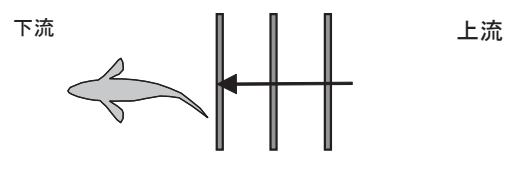
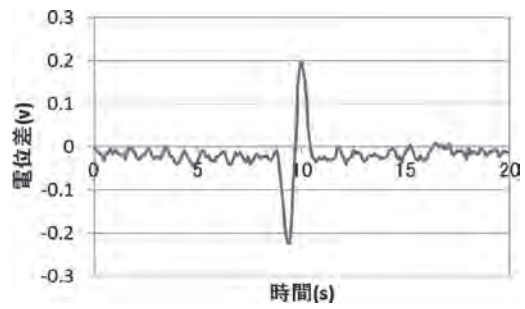
図5. 美利河ダム魚道に設置したプラットフォームの構造図
(図中の数字は耐水性ベニヤ板上の水深, 括弧内は河床の水深, 単位 cm)

表2. 各実験河川における電極長さ別の計測ノイズ振幅と計数対象としたパルス波の振幅

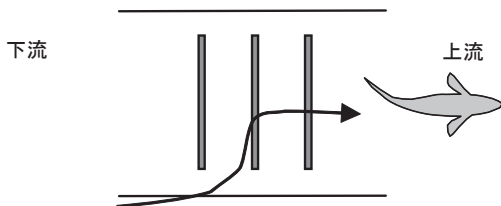
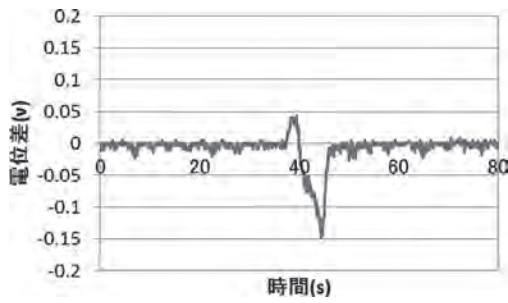
| 対象河川・魚道 | 電極の長さ | | | | | |
|---------|--------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|
| | 80cm | | 160cm | | 320cm | |
| | ノイズの振幅 | 計数対象としたパルスの振幅 | ノイズの振幅 | 計数対象としたパルスの振幅 | ノイズの振幅 | 計数対象としたパルスの振幅 |
| 田海川 | 0.06v | 0.12v 以上 | 0.03v | 0.06v 以上 | - | - |
| 滝瀬川 | 0.03v | 0.06v 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 | - | - | - | - |



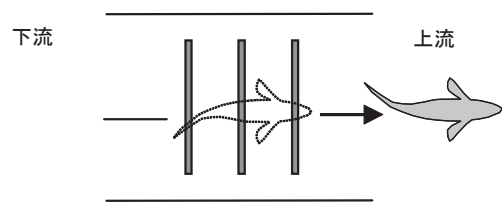
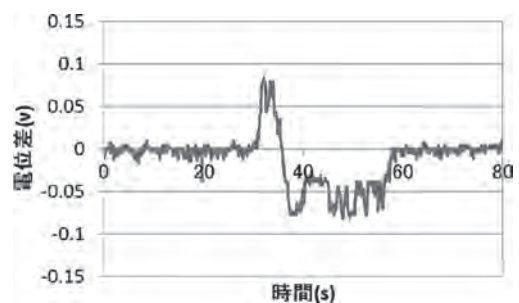
a 遡上したケース



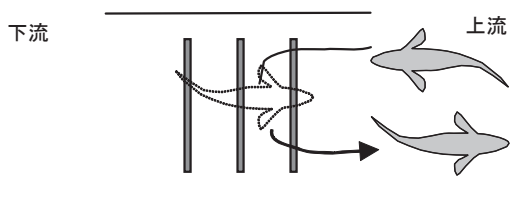
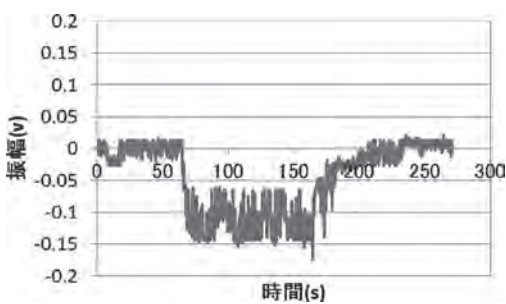
b 降下したケース



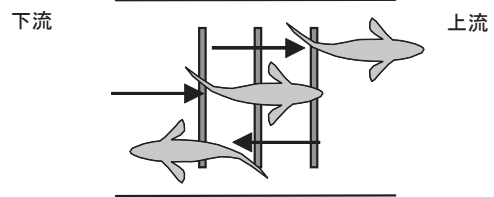
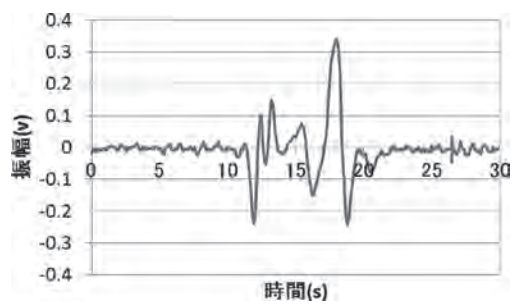
c 側面から侵入したケース



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-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-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-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

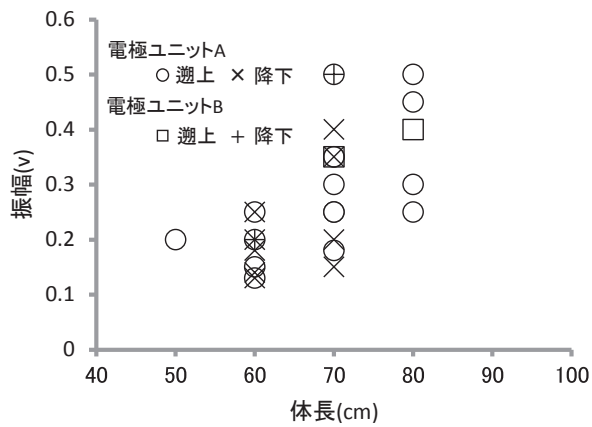
| | 電極の長さ | | | | | |
|-----------|---------|-----|---------|-----|---------|---|
| | 80cm | | | | | |
| | 体長 70cm | | 体長 30cm | | 体長 20cm | |
| 総尾数 | 計数可能尾数 | 総尾数 | 計数可能尾数 | 総尾数 | 計数可能尾数 | |
| | 4 | 4 | 2 | 0 | 14 | 0 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 |
| | 4 | 4 | 2 | 0 | 20 | 0 |
| 計数精度 | 100.0% | | 0.0% | | 0.0% | |
| 計数精度 (合計) | 15.4% | | | | | |

(サクラマス 26 尾)

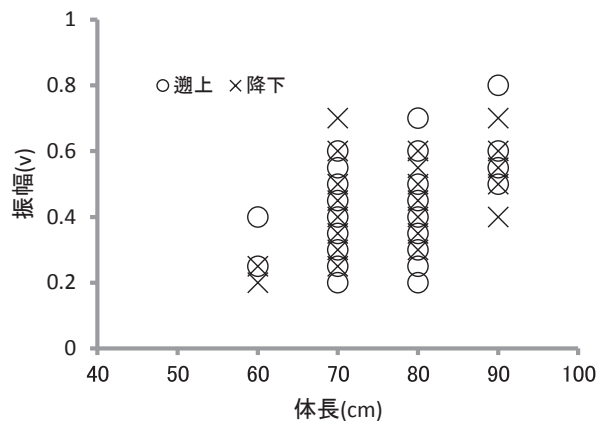
明瞭で魚類の通過方向の識別は容易であった。しかし、側面から進入したケース、通過中に滞留したケースの場合はパルス波が歪になり、パルス波としての識別が困難であった。また、通過中に滞留したケースのうち、特に田海川のケースでは、センサー上流側での滞留することが多く、台形状の波形が生じた (図 6e)。複数が同時に遡上・降下をしたケースでは、ビデオ映像からは通過尾数の計数は可能であったが、パルス波が歪な形状となり、

魚カウンターでは計数が困難であった。

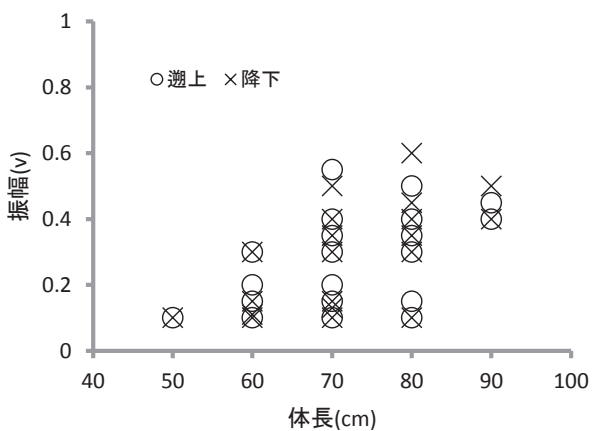
計数精度について 田海川での調査において、ビデオ映像により確認された、電極ユニット上を通過した魚はサケのみであった。今回の調査では幅の狭い電極ユニット A で計測されたノイズの振幅が電極ユニット B の約 2 倍であった (表 2)。ビデオ映像から求めた魚の体長と魚カウンターで計測されたパルス波の振幅との関係を図



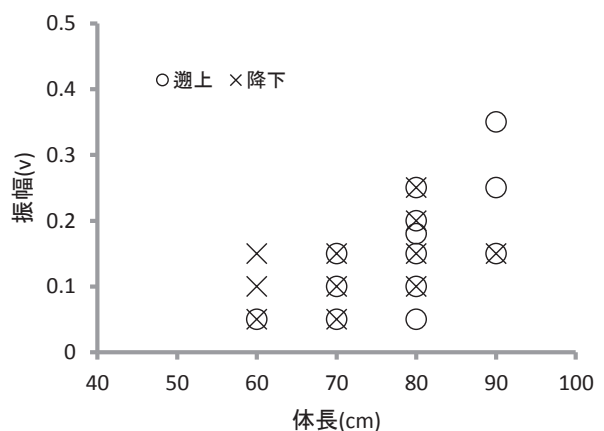
a 田海川 電極ユニットA(80cm),B(160cm)



b 滝淵川 電極ユニットA(80cm)



c 滝淵川 電極ユニットB(160cm)



d 滝淵川 電極ユニットC(320cm)

図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

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-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，利根大堰の魚道で行った近藤らの調査結果¹³⁾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こと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7a）。この結果は既往の研究結果^{14,30)}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2）。電極ユニットA（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（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（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-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：61%，ユニットB：51%，ユニットC：56%で，全ユニットを合わせたサケの計数精度は55%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 7b~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測期間中、ビデオ映像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-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。

考 察

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。

滝淵川では、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、近藤・権田³⁰⁾が電極の幅を変えて行った室内実験の結果と一致していた。

滝淵川の調査結果より、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測可能であることが示唆された(図 7、表 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、計測期間中 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。

近藤・権田³⁰⁾の室内実験の結果から、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てる。

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ことにより、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。

今回の計測できなかった、体長 20~30cm 程度の小

型の魚類を計測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、それに加えて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。近藤らが魚道で行った調査¹⁴⁾では、電極の長さ 85cm、電極ユニット上の全水深 27cm の条件で体長 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 未満の魚を計測するためには、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。

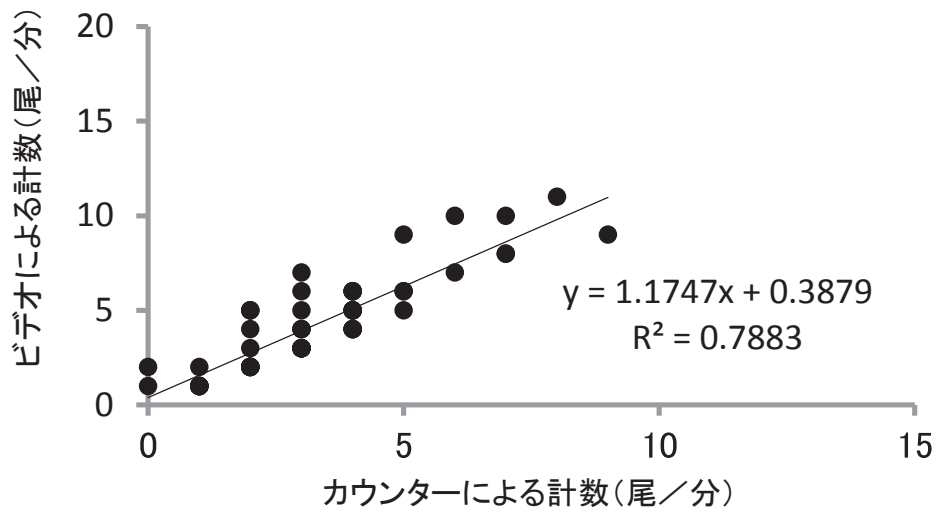
また、電極間隔については、既往の研究³⁰⁾によると電極間隔は対象とする魚類の体長の 1/2 程度が望ましいとされている。しかし、今回の調査対象地のように、計測対象とする魚種が複数存在し、その体長が異なる場合での最適な電極間隔については検討されていない。

今後は、対象魚種の体長に合わせた最適な電極の長さとして最適な全水深、最適な電極間隔についての検討し、その成果をもとに複数種の魚を計測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。

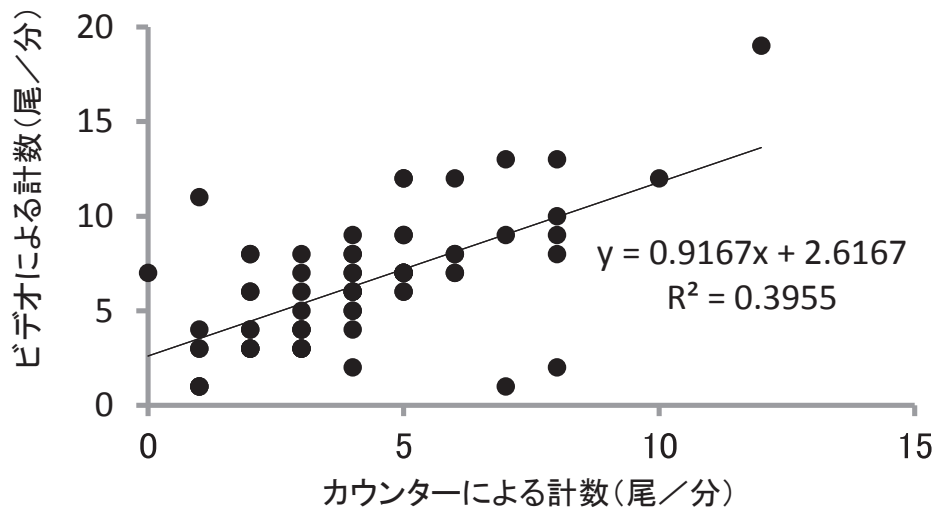
計数精度を上げるための対策 滝淵川では、複数尾の魚が同時に電極ユニット上を通過すること(以下同時通過とする)が、最も大きく計数精度を低下させる原因となった。近藤ら³¹⁾が行った、アユの稚魚を対象とした魚カウンターによる計測実験でも、同時通過が発生し計数精度が低下する結果となった。近藤ら³¹⁾は、同時通過による計数精度の低下を抑えるための対策として、次のような補正方法を提案している。1) 1 分間あたりの通過数が 30 尾未満の範囲ではカウント率(式(1))がほぼ 100% のため、カウンターの計数値をそのまま用いる。2) 単位時間あたりの通過数が 30 尾以上の場合、カウンターで計数される通過数と実際の通過数(=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。

近藤ら³¹⁾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、高い精度で計測できるとしている。

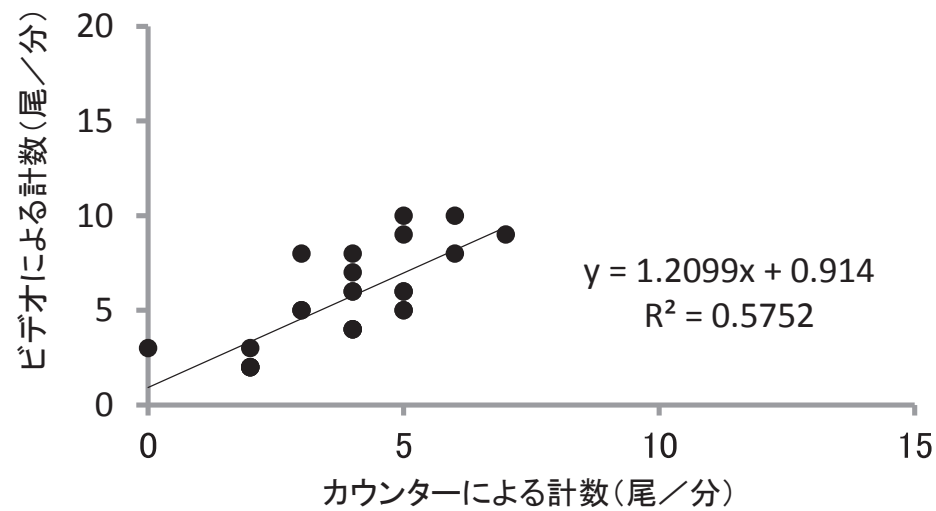
ここで、滝淵川のケースでも近藤ら³¹⁾の補正法が適用可能かどうか検討することにする。図 8 にカウンターの遡上数の計数値とビデオ映像から求めた通過数の計数値の関係を示す。近藤ら³¹⁾のアユの稚魚を対象とした研究では、1 分間あたりのビデオの通過数が 50 尾未満の範囲では、ほとんど同時通過は発生せず、補正前のデータを用いた場合でも平均カウント率は 90% 程度であり、データの分布を表す近似式の決定係数 R^2 は 0.98 と非常に高い結果であった。これに対し、本研究では、ビデオから求めた 1 分間あたりの遡上数が 12 尾未満と少ない範囲でも同時通過の占める割合は高く、カウント



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

表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(%)

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

率は、電極ユニット A (幅 80cm) の場合 77.2%, 電極ユニット B (幅 160cm) の場合 64.6%, 電極ユニット C (幅 320cm) 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。近藤ら³¹⁾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、計測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4に示す。電極ユニットの幅が広がるほど同時通過の割合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幅を 80cm 程度にすることが適当と推測されるが、電極ユニットの最適幅については、計測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、近藤・権田の利根川での調査¹⁴⁾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る (図 9a)。また、滝淵川では、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る。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、①電極ユニットを河川の流速が速い箇

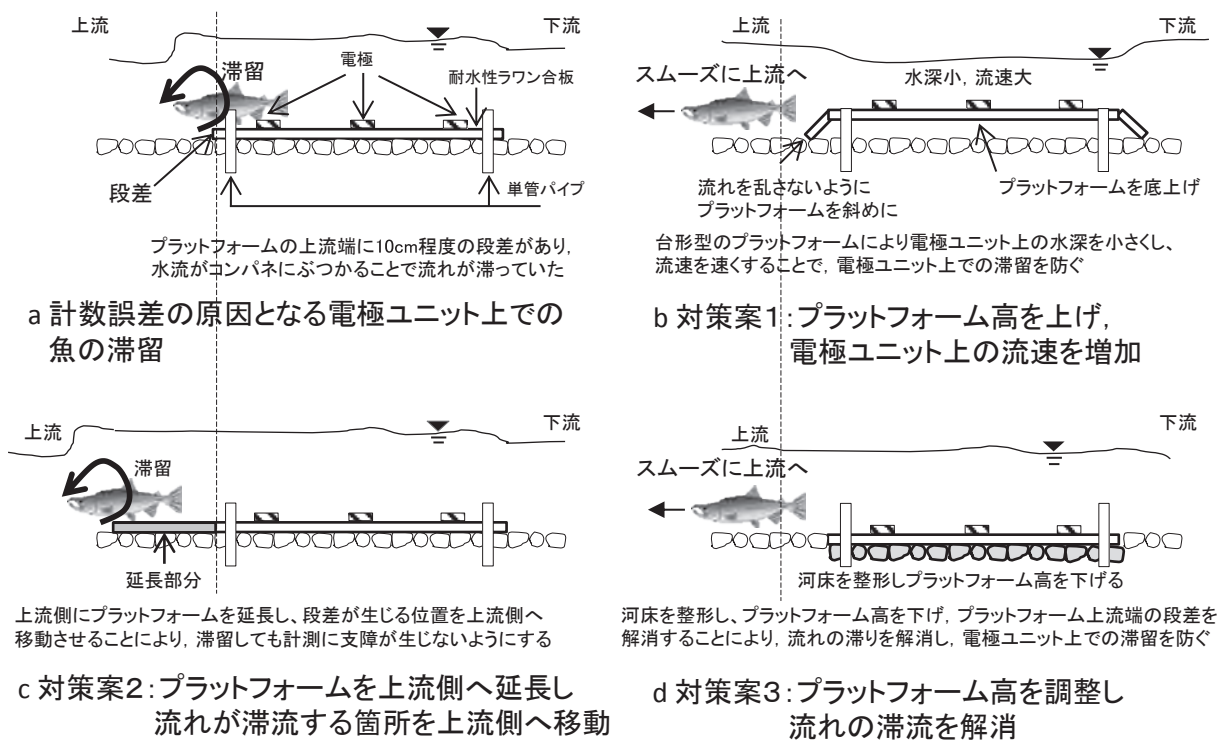


図9. 魚の滞留を防止計数精度を向上させるための対策

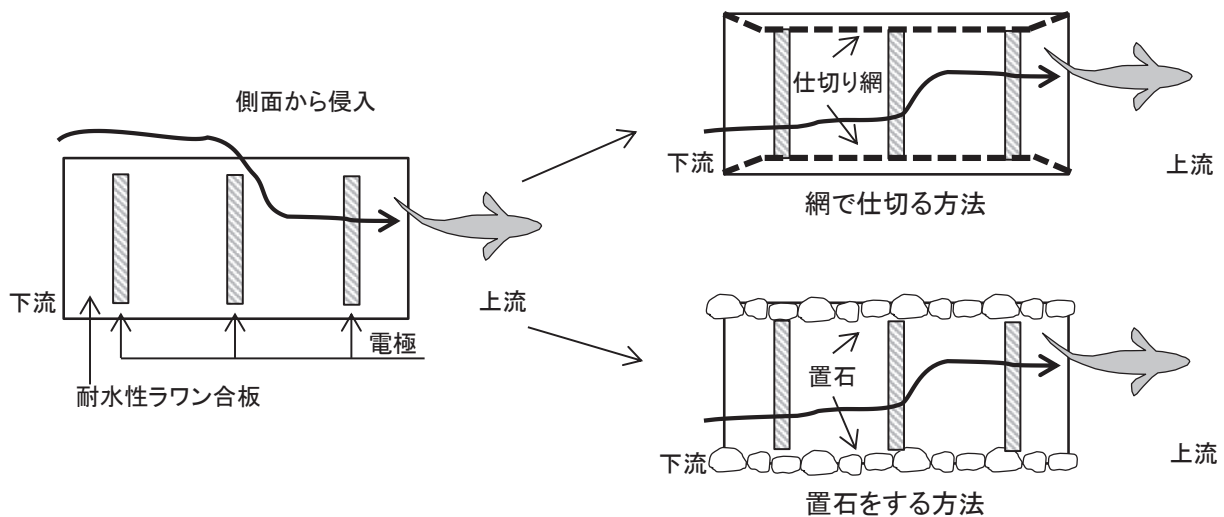


図 10. 魚の側面からの進入を防ぎ計数精度を向上させるための対策

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 9b)、②プラット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 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 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、現地計測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 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。近藤らの研究³⁰⁾により、電極に印加する電圧が大きい方が、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^{14,15,31)}。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測するためには、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。

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、今回の計測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、安定して計測することができた。つまり今回のプラットフォームの設置方法は、短期間の計測であれば、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測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、今回の計測よりも長期にわたって計測を継続する場合、河川の流況が変化し、それにもなつ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測が困難になる、プラットフォームが流失・破壊される等の問題が生じる可能性がある。今後は長期計測を見据えて、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。

総括

本研究では、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測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を設置し、河川を移動するサケやサクラマス数を計測し、魚カウンターの計数精度、現地計測の際に生じる問題を検討した。

現地計測で、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が侵入した
- ・センサー上、センサー周辺で魚が停滞した
- ・複数の魚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
- ・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、サクラマスを計測対象とした場合、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ォ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。

今後、魚カウンターによる長期計測を実現するためには、河川水位の変動にともなう計数精度の低下、プラットフォームの流出・破壊への対策を検討するとともに、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、設置方法を検討する必要がある。また、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、後処理により魚の通過数をもとめているため、長期の運用には商用電源が欠かせない。魚カウンターの野外での長期計測を実現するためには、現地での電源確保と装置の保守を容易にすることが必要であり、そのためには、魚の通過数をリアルタイムで解析

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の装置の改良を検討する必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、北海道栽培漁業振興公社の中尾勝哉氏、新居久也氏、栃木市役所の磯崎将人氏、任意団体東京大学庭師倶楽部および升川鮭孵化漁業組合の関係各位にご指導、ご協力をいただいた。ここに記して感謝申し上げます。

文献

- 1) 渡辺恵三・中村太士・加村邦茂・山田浩之・渡邊康玄・土屋進 (2001) 河川改修が底生魚類の分布と生息環境におよぼす影響. 応用生態工学, 4, 367-380.
- 2) 河口洋一・中村太士・萱場祐一 (2005) 標津川下流域で行った試験的な川の再蛇行化に伴う魚類と生息環境の変化. 応用生態工学, 7, 187-199.
- 3) 知花武佳・松崎浩憲・玉井信行 (1998) 多自然型河川整備のための魚類生息環境評価. 河川技術論文集, 4, 201-206.
- 4) 杉尾 哲・村上啓介・神田 猛・森田哲夫・西脇亜也・伊藤 哲 (2003) 千野川における河川改修に伴う生態系の復元に関する研究. 河川技術論文集, 9, 445-450.
- 5) 庄司 崇・福井吉孝・青木宗之 (2004) 河川中流部における魚類の生息分布とその評価法について～荒川水系小畔川を例にして～. 河川技術論文集, 10, 345-350.
- 6) 朴崎 燦・河口洋一・久岡夏樹・島谷幸宏・澤田尚人 (2007) 板櫃川における魚類の生息環境を考慮した河道設計に関する研究. 河川技術論文集, 13, 95-100.
- 7) 矢部浩規・中津川誠・卜部浩一・中島美由紀 (2005) サクラマスの生息環境向上のための河川物理環境の評価. 河川技術論文集, 11, 477-482.
- 8) 石山信雄・渡辺恵三・永山滋也・中村太士・剣持浩高・高橋浩揮・丸岡 昇・岩瀬晴夫 (2009) 河床の岩盤化が河川性魚類の生息環境に及ぼす影響と礫河川の復元に向けた現地実験の評価. 応用生態工学, 12, 57-66.
- 9) 山下彰司・渡邊和好 (1995) 北海道河川の魚類生態調査について. 河川技術論文集, 2, 21-26.
- 10) 馬場仁志・巖倉啓子 (1998) 魚類等の生息環境における流れの多様性に関する研究. 河川技術論文集, 4, 195-200.
- 11) 萱場祐一・千葉武生・力山 基・尾澤卓思 (2003) 中小河川中流域における魚類生息場所の分布と構造. 河川技術論文集, 9, 421-426.
- 12) 鬼束幸樹 (2012) 魚道の流れ特性と魚の遡上特性との関係. ながれ, 31, 19-28.
- 13) 渡辺恵三・中村太士・加村邦茂・山田浩之・渡邊康玄・土屋進 (2001) 河川改修が底生魚類の分布と生息環境におよ

- ほす影響. 応用生態工学, 4, 133-146.
- 14) 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, 1-12.
 - 15) 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, 26-30.
 - 16) 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, 11, 459-464.
 - 17) 有賀 誠・津田裕一・藤岡 紘・本多健太郎・光永靖・三原孝二・宮下和士 (2009) 石狩川におけるシロザケ *Oncorhynchus keta* の遡上行動-テレメトリーシステムの利用. 応用生態工学, 12, 119-130.
 - 18) 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, 191-199.
 - 19) 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.
 - 20) 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. 日水誌, 66, 44-49.
 - 21) 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. 日水誌, 76, 652-657.
 - 22) 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) 知床半島ルシャ川におけるカラフトマス *Oncorhynchus gorbuscha* の産卵遡上動態評価. 日水誌, 76, 383-391.
 - 23) 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, 11-18.
 - 24) 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. 日水誌, 67, 703-709.
 - 25) 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. 日水誌, 70, 179-186.
 - 26) 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. 日水誌, 70, 288-296.
 - 27) 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, 30-34.
 - 28) 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. 日水誌, 76, 670-677.
 - 29) 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. 日水誌, 76, 920-925.
 - 30) 近藤康行・権田 豊 (2008) 砂防堰堤魚道における魚カウターの研究について. 河川技術論文集, 14, 469-472.
 - 31) 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, 301-307.