

土砂動態の観測・調査について (2)

澤田豊明¹⁾

1. はじめに

流域における土砂災害を防止・軽減するためには、山から海までの場の条件および気象などの外力によって発生する土砂移動現象を総合的に把握することが非常に重要であるとして、平成10年7月に河川審議会総合土砂管理小委員会において「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」が答申された¹⁾。しかし、このように土砂移動現象の実態の把握が防災事業において必要不可欠な事項であるが、これらの現象が複雑多岐に及ぶことから十分に土砂移動の量と質、および時間的な成果が得られていないのが現状である。

その理由の一つとして、観測・調査の目的が明確にされていないこと、および現象を時間的・空間的に把握するための手法が十分でなかったことが考えられる。つまり、流域の場の特性、降雨観測、水位流量観測、河床特性調査等のデータが揃っていて流砂観測のデータが生かされるのであって、流砂量の観測の成果は総合的に評価されるものである。もし、そうでなければ貴重な流砂の資料は、観測が行われただけで生かされない。前報⁷⁾において観測・調査の問題点について、その成果を紹介しながら問題点について述べた。ここでは、焦点を新しい流砂計測技術の中から「デジタルカメラによる粒径分布測定法」および「ハイドロフォンによる流砂観測法」の二点に限定して、その現状の一部を紹介したい。

2. 観測・調査の概要

2-1 デジタルカメラによる粒度分布計測

対象流域において斜面や河床の粒度分布を計測することは流域の場の特性（斜面勾配、植生の種類と樹齢等、地質および土壌層など）と共に非常に重要である。しかし、流域の種々の地点において、多数の粒度分布調査を行うことは非常に困難である。デジタルカメラによる粒度分布計測は、現地における土砂の採集

が不要であること、小粒径から大粒径まで連続的に計測が可能であること、勾配が急な斜面においても測定が可能であること、現地での計測が省力化されているために測定地点の数を増やすことが可能であること、さらに透明であれば水中においても測定が可能となることなどから非常に将来が期待される手法である⁶⁾。

2-2 ハイドロフォンによる流砂計測法

流砂観測は流域の対象とする地点の河床を通過する土砂量を測定するもので、その移動形態は浮遊砂、掃流砂および土石流に大別される。観測の目的によって流砂形態や観測地点が選定され、観測地点の条件等も考慮して観測手法などが決定される。ここに述べるハイドロフォンによる計測法は掃流砂を対象としており、掃流砂の衝突音を計測して流砂量を求めるもので間接的に流砂量を自動的に計測するシステムであることが特徴である。また、直接法に対して若干精度が劣ると思われるが、装置の設置や維持管理や測定の継続性に優れていると思われる。

音響法による計測による初期の観測は1991～1994年にかけて常願寺川水系称名川支流人津谷の砂防堰堤で実施された²⁾。その後、改良されたハイドロフォン・システムが開発されて常願寺川津之浦砂防堰堤において実施された³⁾。さらに、ピット式掃流砂計測装置によるハイドロフォン信号のキャリブレーションが行われた^{4)、5)}。ここでは、写真1に示される穂高砂防観測所の足洗谷観測局において総合的に流砂観測が実施されている足洗谷観測水路における観測事例を紹介する。この水路に設置されたピットはピット内に設置された水中加重計によって掃流砂量を計測するもので、ピットが土砂で満砂となるまで継続的に計測され、ピット内の砂礫の除去によって再計測が継続可能なシステムである。

1) NPO 法人 山の自然文化研究センター

3. 観測・調査の事例

3-1. 観測・調査地の概要

ここに紹介する観測流域は、写真1に示すように活火山焼岳を源流とする足洗谷（7.2 km²）である。この流域は昭和37年6月の焼岳の噴火以降、土石流が頻発しており観測の自然条件は十分である。この流域は焼岳を源流とする白水谷・黒谷流域と古生層・花崗斑岩等が分布する割谷・ヒル谷に分けられる。土石流の観測は前者の流域でその拠点として白水谷観測局としている。浮遊砂や掃流砂等の観測は後者の流域でヒル谷観測局および足洗谷観測局を拠点としている。現在、これらの観測局と観測所はオンラインで結ばれており、モニタリングやデータの収集は観測所で行われている⁷⁾。

デジタルカメラによる現地調査は写真1に示すヒル谷出口、割谷出口および黒谷出口において実施された。ハイドロフォンによる計測土砂流出の観測は足洗谷観測局にある観測水路、割谷出口の砂防堰堤、ヒル谷試験堰堤、および黒谷出口の砂防堰堤において実施され、その信号は光ファイバー・ケーブル等によって穂高砂防観測所に送られパソコンに記録されている。

3-2. デジタルカメラによる粒度分布計測⁶⁾

現地計測は種々の条件の場を対象とする目的で、足洗谷流域における河床材料、溪岸材料、裸地斜面にお

いて実施された。デジタル・カメラによる粒度分布計測の成果の検証のため、現地における土砂の採集と実験室における篩分析も実施されている。現地実験目的は以下のとおりである。

①画像解析装置の有効性の評価

(システムの有効性と限界の評価)

- 1) 現地作業の操作性・作業性の評価
- 2) 山岳地域における可搬性と調査環境

(日中、夕刻、雨、水濡れ等の影響評価)

②画像処理法と篩手法との比較評価

- 1) 篩分析作業の削減
- 2) 篩分析と同等以上の分析精度
- 3) 小粒子から大粒子までの分析の連続性

現地調査は種々の土砂流出観測や調査が実施されており、比較評価などの検証が他の地域より有利であることなどを考慮して、京都大学防災研究所附属流域災害研究センター穂高砂防観測所の試験流域で実施されている。

この流域は神通川水系蒲田川支流（焼岳西山麓）の足洗谷（6.5 km²）にあり、白水谷（2.1 km²）、ヒル谷（0.8 km²）が含まれている。

撮影対象場は河床、溪岸および斜面とし、被写体との撮影距離を約1 mとして、分解能（理論上：0.3 mm）を向上させることを考慮されている。



写真1 観測流域の概要と観測局の位置

3-3. ヒル谷出口における試験について

ヒル谷における土砂は数cm程度が掃流形態で流出し、平均年間土砂流出は約 40 m³である。ヒル谷出口に設置された試験堰堤の貯水池の堆積面で、図1および写真2に示すような方法で撮影が実施された。開発された装置は、デジタルカメラ1台、ストロボ4台、および発光制御器から構成され、カメラ等は地表から約1mの高さになるように三脚で調整され、地表に試験範囲を示す白色の枠が置かれる。1地点での撮影は4方向からの順次ストロボ撮影を行い4枚1セットで4画像を撮る。このことで同一粒子に対して4方向からの影が映しこまれることによって砂礫粒子の境界が認識され、これらの画像はパソコンで処理され、粒子境界を抽出して面積を求め、同じ面積を有する円(球の投影)と見なし、更にその球体の体積(重量)が求められる。この結果から粒子の通過百分率が求められ、篩による粒度分析との比較から画像解析による粒度分布の分析が行われ、本装置の有効性について検討された。

写真3はヒル谷出口右岸の河床の画像を示す。表層と表層の砂礫を除去した画像を比較しており、下位の画像は各画像を拡大したものである。写真4はヒル谷左岸河床の撮影画像の一例である。

デジタルカメラの光学的な最小分解能は、カメラレ

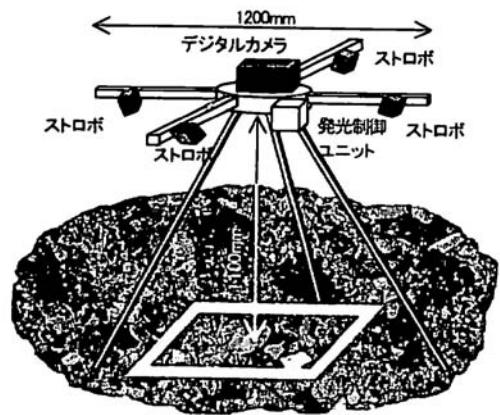


図1 装置の構成および仕様



写真2 デジタルカメラによる河床の撮影の様子

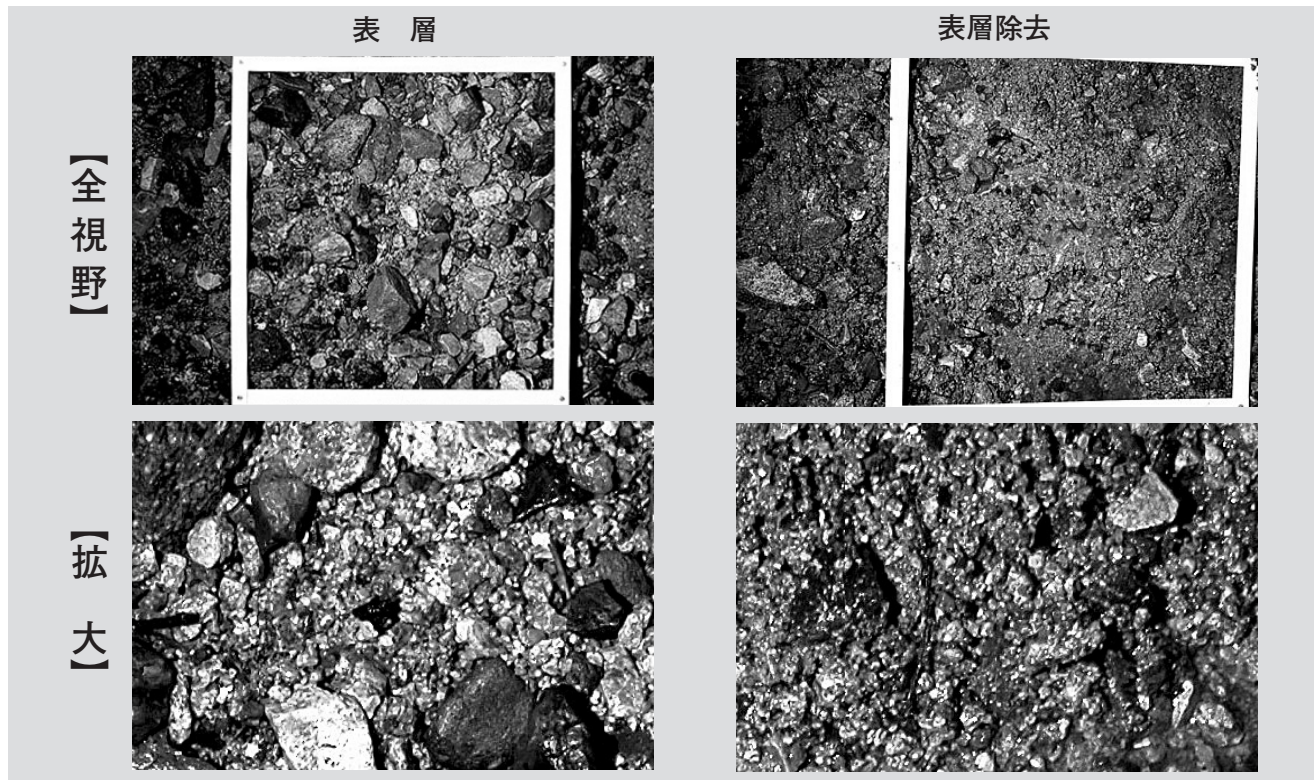


写真3 撮影画像の一例 (ヒル谷右岸の河床)

レンズと対象までの距離、カメラレンズの焦点距離、画像素子のサイズ、および画素数に支配される。ここで使用されたカメラの画素数は600万画素、焦点距離24mmの一般的な市販カメラであるが、被写体距離が1mで0.33mmの光学的分解能を有しており、砂礫の複雑な形状・色調を考慮しても最小2mm程度の分解能

を得ることが実験室で確認された。したがって、写真3、4および5に示すように実用化において問題は無いと考えられた。

写真5はヒル谷より砂礫が大きな白水谷（土石流堆積域）において撮影を実施したものである。

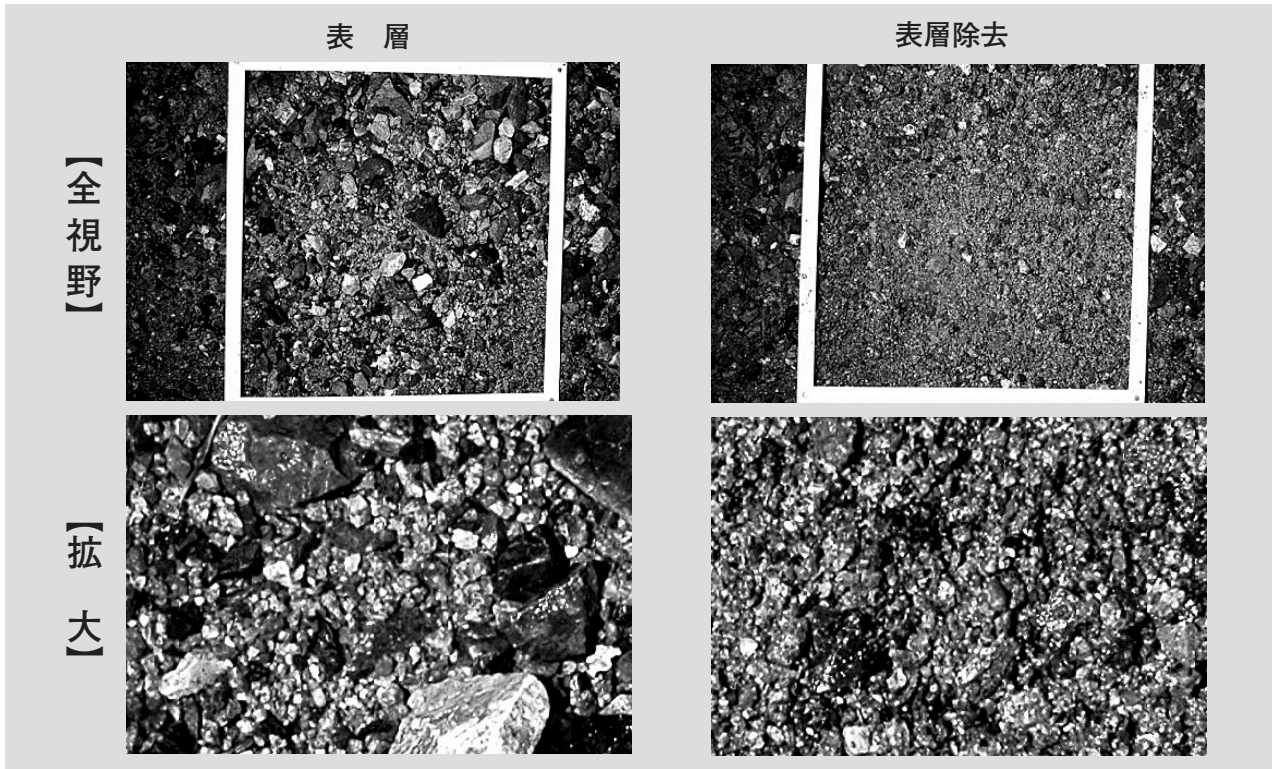


写真4 撮影画像の一例（ヒル谷左岸の河床）

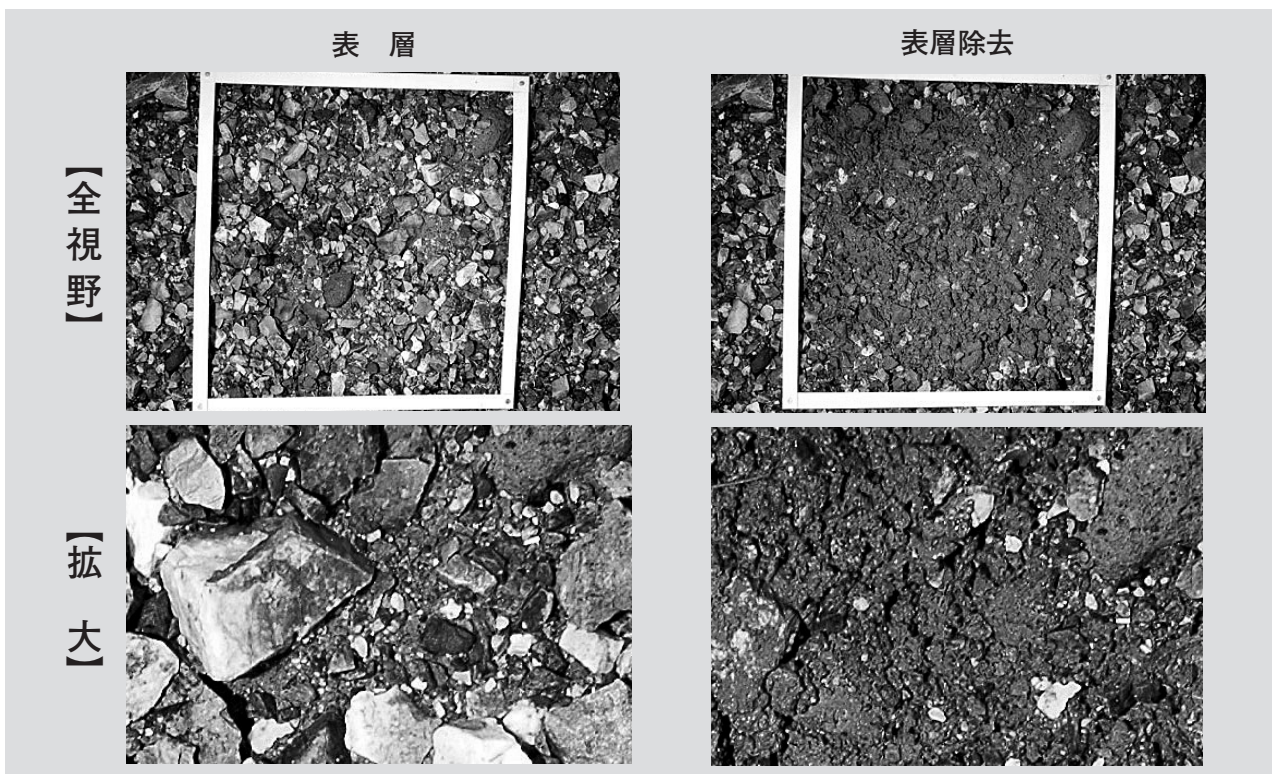


写真5 撮影画像の一例（白水谷下流の河床堆積物）

3-4. 粒子を面積で評価した場合における画像解析と篩分け分析の比較

ここでは2mm以上の粒子について、JAC 河川砂礫粒度分析・解析手法に基づき次のように粒度分析について検討する。

- ①不規則な形の砂礫の直径を図2に示すように円相当とする。
- ②砂礫の直径は砂礫の面積算出後に同一面積の円の直径として算出する。

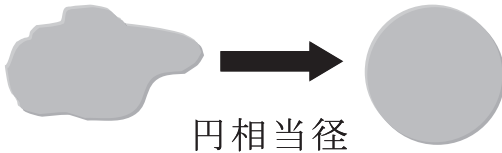


図2 砂礫の直径の評価

- ③砂礫の分布が深さ方向に変化しないものとして仮定すれば、砂礫重量は図3に示すとおり粒径の2乗に対応する。

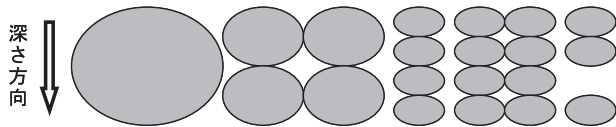


図3 模式化された砂礫の状態

図3に示すように砂礫の堆積状態が表面と同じと仮定すれば、下記の(1)および(2)式に示すように投影面積と体積比率は同じである。

面積比率

$$\pi [(4r)^2 \times m : (2r)^2 \times n : r^2 \times z] = 16m : 4n : z \quad (1)$$

体積比率

$$3/4\pi [(4r)^3 \times m : (2r)^3 \times 2 \times n : r^3 \times 4 \times z] = 64m : 16n : 4z = 16m : 4n : z \quad (2)$$

この仮定に基づいて、白水谷 No.1 表層試料、白水谷 No.3 表層試料、ヒル谷左岸表層試料およびヒル谷左岸表層除去試料について、画像計測と篩分け分析の比較が図4から図7に示されている。

図4から図7に示されているように、画像処理による分析と篩による分析において、ほぼ同様の結果が得られた。しかし、詳細に見ると、20～100mmの粒子において相違が認められる原因として40mmの篩目を通過するかしないかの問題があると考えられる。

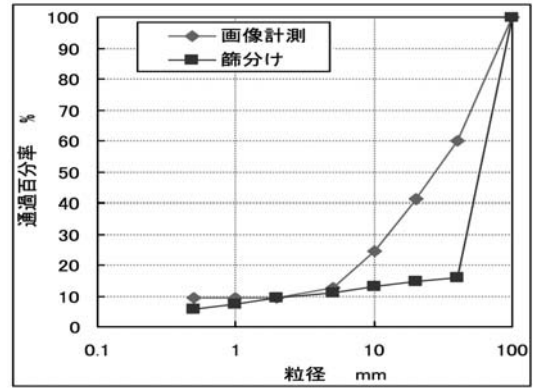


図4 白水谷No.1表層試料

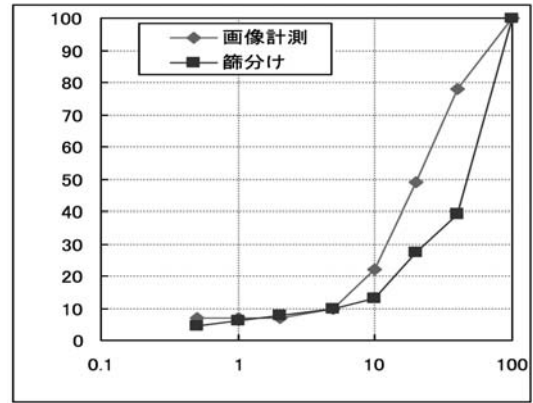


図5 白水谷No.3表層試料

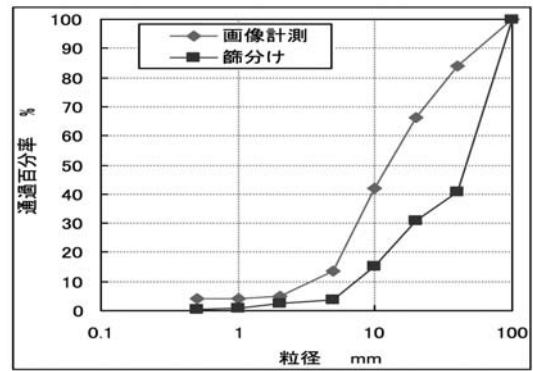


図6 ヒル谷左岸表層試料

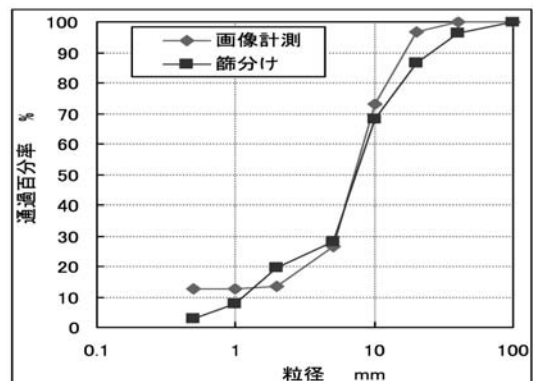


図7 ヒル谷左岸表層除去試料

3-5. 粒子を体積で評価した場合における画像解析と篩分け分析の比較

前述した篩目の通過・不通過の問題について、JAC河川砂礫粒度分析・解析手法に基づき砂礫を体積で評価する粒度分布について検討する。

①砂礫の直径は円相当径と仮定し、砂礫の直径は砂礫の面積算出後に同一面積の円の直径として算出する。

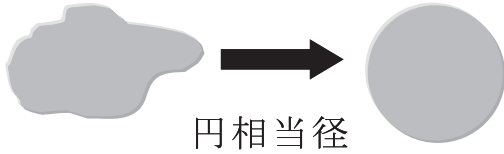


図8 砂礫の直径の評価

②砂礫重量は径の3乗に対応：体積相当で評価

前記のように砂礫を円相当径と仮定して、その投影面積で評価しているが、現実には砂礫の堆積状態は図9の様に表層下に同一で堆積していない。このような点を考慮すると、表層に現れている粒径をもって、粒径の3乗で評価することが妥当と考えられる。

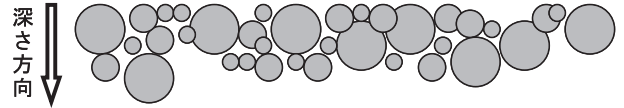


図9 模式的な深さ方向の砂礫分布



写真6 白水谷No.1の表層画像

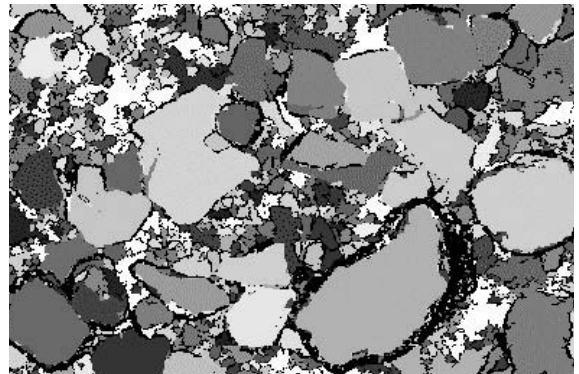


写真7 白水谷No.1白水谷表層の処理画像

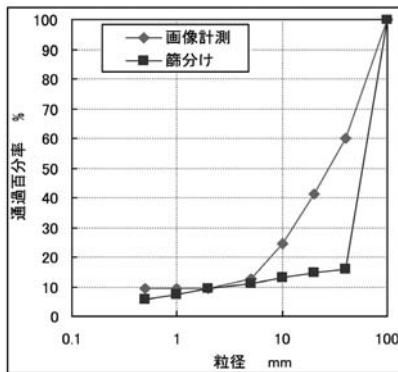


図10 画像計測粒径の2乗基準と篩わけの比較 (白水谷No.1)

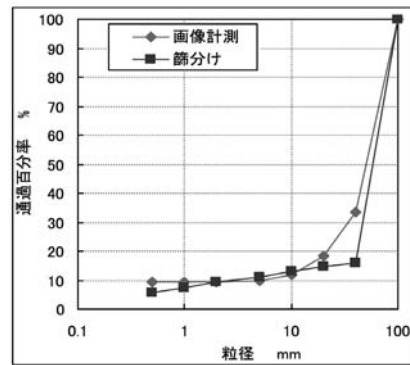


図11 画像計測粒径の3乗基準と篩わけの比較 (白水谷No.1)

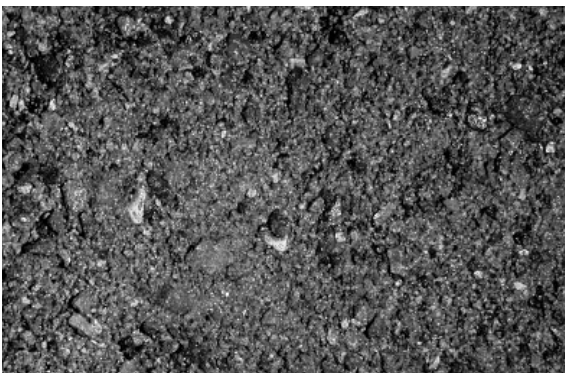


写真8 切り出し画像1600×1200画素

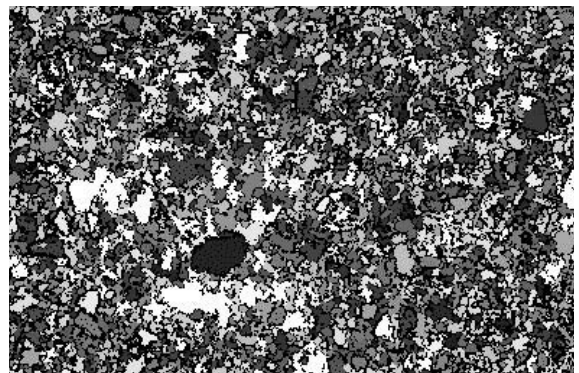


写真9 解析結果

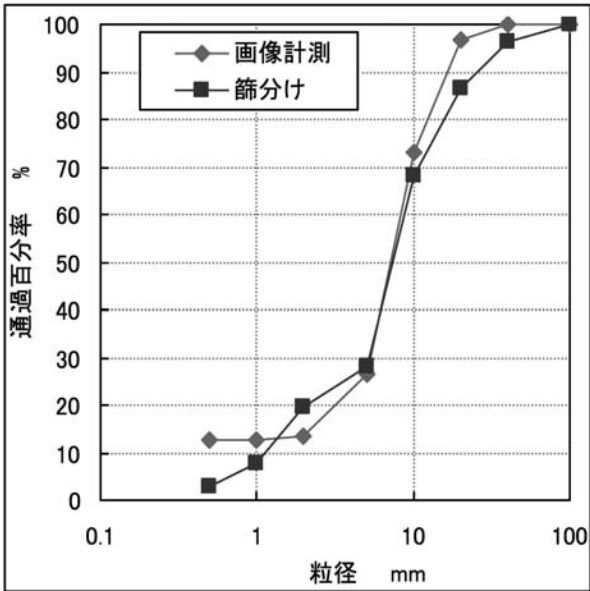


図12 粒径の2乗基準 (ヒル谷左岸表層除去試料)

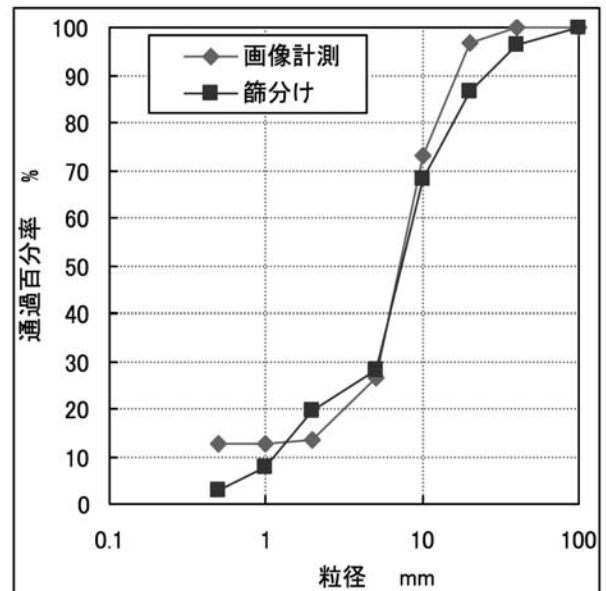


図13 粒径の3乗基準 (ヒル谷左岸表層除去試料)

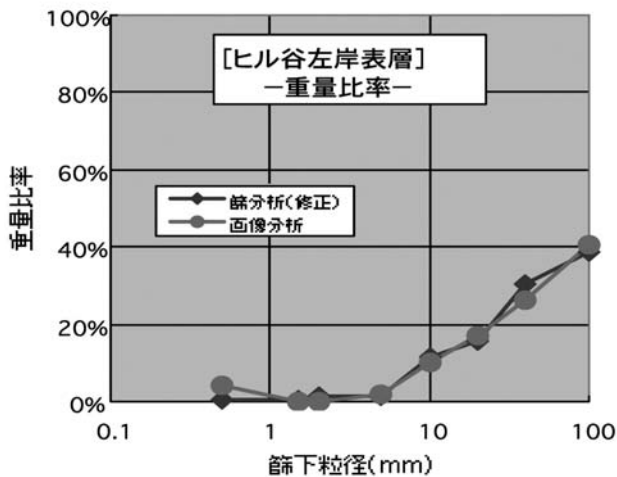


図14 重量比率による比較

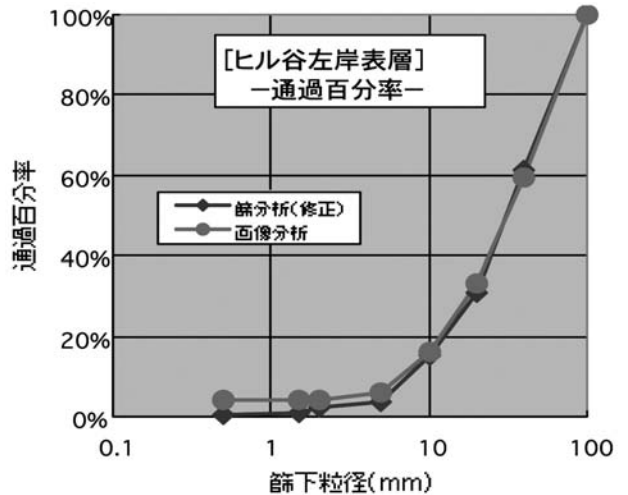


図15 通過百分率による比較

写真6に示す表層画像は画像処理によって、写真7のように砂礫粒子が識別される。この砂礫粒子の粒径の2乗基準と3乗基準による粒度分布と篩分け分析の粒度分布の比較が図10および図11である。

重量比率と通過百分率について、篩分析と画像分析の比較検討を実施した。その結果は図12および図13に示す。これらの結果から、画像分析には粒径の3乗基準の妥当性が認められた。

さらに、上記の画像分析と篩分析との差異について検討するために、同一地点のサンプルについて、20mm～100mmの篩目に分類された粒子を対象として、再評価を実施した。

ヒル谷左岸表層の粒子において、篩分析で40～

100mmと判定された粒子の総数は38個、総重量は2,432gである。それらの粒子画像に40mmの升目を被せて目視により判定した結果、20～40mmの粒子は23個、852g、40～100mmの粒子は15個、1,580gであり、40～100mmに分類されて粒子38個の内、23個の粒子は40mmを通過することが認められた。これらの結果を考慮して篩データ補正の結果、画像処理による分析結果は重量比率および通過百分率においても、図14および15に示されるように非常に良い一致が認められた。

4. まとめと今後の課題

現地河床材料の測定結果および実験室における画像処理による分析手法が、従来の篩分析法に劣らないことが認められた。従来、山地溪流において河床材料の調査を行う場合、大きな礫は現地で短径・長径等を計測し、細粒分を採集して篩分析によって粒度分布を求めていたが、小粒径と大粒径の分析には不連続が生じる。さらに、これらの作業は困難を伴うことから多くの地点での調査には限界があった。

この撮影手法は雨濡れ、撮影時刻、天候等の変動に拘わらず、画像解析手法による粒度解析において非常に精度高い測定が可能であり、これらの特徴は以下のようなものである。

- 1) 本装置の有効性は 2～100mm の粒の観測には精度の高い測定が出来る。(撮影距離：1m)
- 2) そのために 0.3mm 分解能のカメラを使用し、重量推定は、礫の表面偏析を考慮して体積重量推定が有効である。
- 3) 篩と画像解析では、篩作業の不足と思われる乖離があったが、目視による弁別分離をする事により、画像解析の結果とよい一致を見る事ができた。これはマスキングに小粒の引っかかりが原因と思われる。

今後の粒度分析の発展のためには、以下の課題が上げられる。

- 1) 水中における粒度測定手法の開発（完全水没と不完全水没）
- 2) 実験水路等対応機種の開発

なお、この手法は京都大学・JFE アドバンテック(株)共同特許出願中である（2004）。

5. ハイドロフォンによる流砂観測

神通川水系高原川上流の蒲田川支川の足洗谷において、種々の土砂流出観測が穂高砂防観測所の施設で実施されており、ハイドロフォンの検証等にとって良好な条件が揃っている。

足洗谷支流のヒル谷流域出口の流砂観測装置は、写真 10 に示すように観測用貯水池の上流端に設置され貯水池の堆砂測量によって 1 出水毎の検定が可能である。観測結果は観測所に有線で送り、観測所では降雨、水位等のデータと同時にパーソナルコンピュータに記録されている。

流出土砂量の検定等に使用できる試験堰堤は、写



写真10 ハイドロフォンによる流砂計測



写真11 ヒル谷試験堰堤の貯水池

真 11 に示す貯水池（幅:6.6m、長さ:14m、深さ:1.5m）を有しており、堆砂等の測量が行いやすいように改良されたもので、移動式の計測用足場が設置されている。

写真 10 に示す水路幅は 1m で、その下流端にはハイドロフォンと電磁流速計が設置されている。なお、ハイドロフォンの検証は貯水池の堆砂量を参考にして行われている。

試験堰堤の堆砂容量には限界があり、このヒル谷試験堰堤では約 70 m³の土砂が堆積した場合、土砂出しが必要であり、ほぼ 1 年毎に堰堤の土砂だしゲートから土砂出しが実施されている。

ここでは、足洗谷観測局に設置された観測水路における流砂観測とその成果の一部を紹介し、種々の問題について検討する。写真 12 は観測所の横を流れる足洗谷の試験水路を示している。この地点の上流域の面積は 6.5 km²で、付近の平均河床勾配は約 1/20 である。自然流路の幅は約 30 m で、通常の流路幅は約 3m で、河床材料の平均粒径は約 10 cm で、河床のアーマーコートの平均粒径は約 30 cm である。



写真12 足洗谷観測水路と各種センサーの配置



写真14 ハイドロフォン検証用の流砂計測ピットの砂礫の堆積状況（右岸下流より撮影）



写真13 ハイドロフォンと検証用流砂計測ピット



写真15 流砂計測ピット内の砂礫の除去と水中加重計の点検状況（右岸上流より撮影）

足洗谷観測水路におけるハイドロフォンによる計測は写真12に示されるような足洗谷の観測水路において実施されている。その水路は幅：5 m、長さ：15 m、深さ：1 m、水路床勾配：1/20である。ハイドロフォンは写真13に示されるようにコンクリート水路の下流端に設置されている。ピット流砂計はコンクリート水路下流端に設置されたハイドロフォンの下流側河床に埋設されている。

流砂がピットに堆積した場合、その後の計測が出来なくなるので、ピットの上蓋を取り外し、かつピットの下流側の壁（3段セット）を取り外して土砂を除去する必要がある。写真14はピットの上蓋と下流側壁の上段を取り外した状況を示している。

写真15および16はピット上流側に遮水板を設置してピット内の点検等を実施している様子を示している。図16はハイドロフォンとピットによる計測の一例である。この図の青色実線はピット内の土砂重量（縦軸）を示す。カラーで示された線はハイドロフォンの信号の強弱（縦軸）を示している。この図の横軸は左から右へ、時間の経過を表している。この図の前半において、ピットの加重計の値は600 kgに達しており、ピットが満砂状態になったことによるものと考えられる。



写真16 砂礫の除去と水中加重計の点検後のピット（ピットのカバー前の状況）

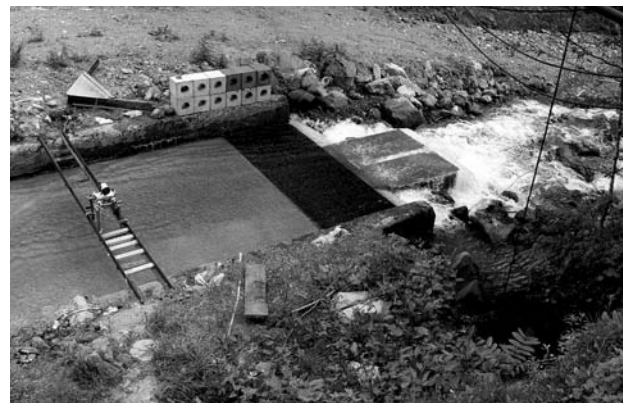


写真17 ピット内の砂礫の除去と点検後の水路の状況（右岸より撮影）

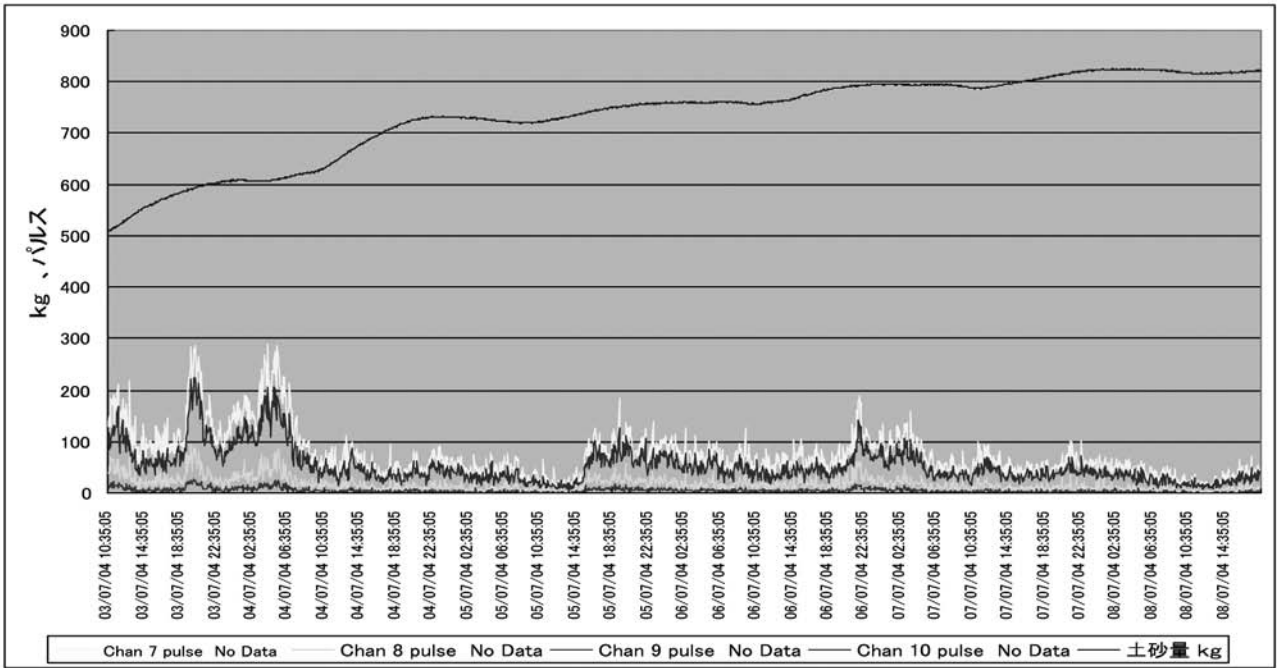


図16 足洗谷観測水路におけるハイドロフォンとピットによる流砂計測の一例（2004年7月3日～8日）

図17は2004年7月10日頃にピット内の土砂の除去後、7月14日～22日に観測されたハイドロフォンとピットによる計測の一例である。この図の青色実線はピット内の土砂重量（縦軸）を示す。カラーで示された線はハイドロフォンの信号の強弱（縦軸）を示している。この図の横軸は左から右へ、時間の経過を表している。この図の前半において、ハイドロフォンとピットの関係は良好であるが、後半からハイドロフォンの信号が強く現れているのに対して、ピット内の土

砂量が増加しないのは、ピットが満砂状態になったことによるものと考えられる。この図から、ピットが満砂になるまでは、ハイドロフォンの信号とピットの土砂量との関係は、このような現地観測においては良好であると考えられる。また、ピット内の堆積物の粒径分布の調査も実施している。ピットは約700kgの土砂の堆積で満砂となり、このような状態になるとピット内の除石が必要となる。除石は期間内に3回実施された。その他、ピットの蓋のスリット幅を狭くする改良も行われた。

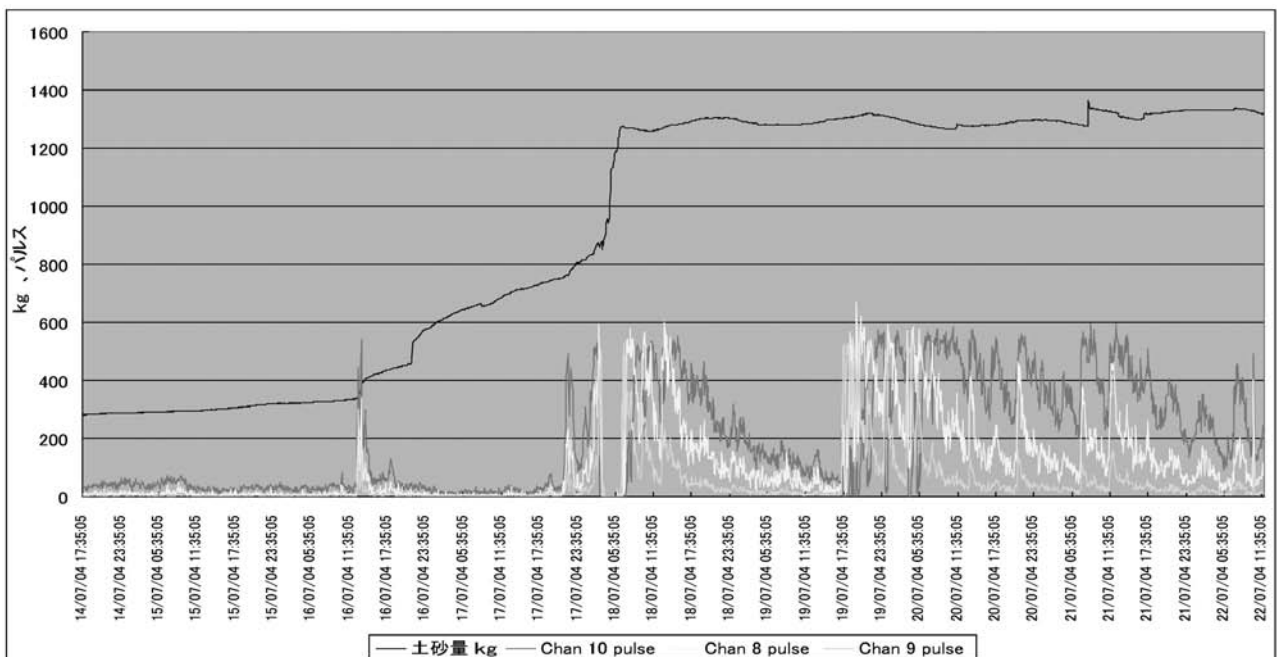


図17 足洗谷試験水路におけるハイドロフォンとピットによる流砂計測（2004年7月14日～22日）

ハイドロフォンの有効性を確認するために設置されたピット流砂量計の計測値によるハイドロフォンのキャリブレーションは図18を参考に実施される。この図において、横軸はピット流砂量 (kg)、縦軸はパルス数 (5分間) を示しており、ピット流砂量とハイドロフォンのパルス数が高周波数領域の ch.7 および ch.10 において良好な関係が示されている。

図19は2005年6月28日～7月1日に足洗谷試験水路におけるハイドロフォンによる流砂計測を示している。この図において、縦軸はパルス数 (5分間) と水位 (m、ピット床底より)、横軸は左から時間の経過を示している。パルス数と水位の関係は出水の前半は対応が良いが、後半では水位が低下して安定しているにも関わらず顕著なパルスの発生が認められるが、このような山地溪流ではこのような流砂の発生は特異なことではなく、従来より認められていることである。

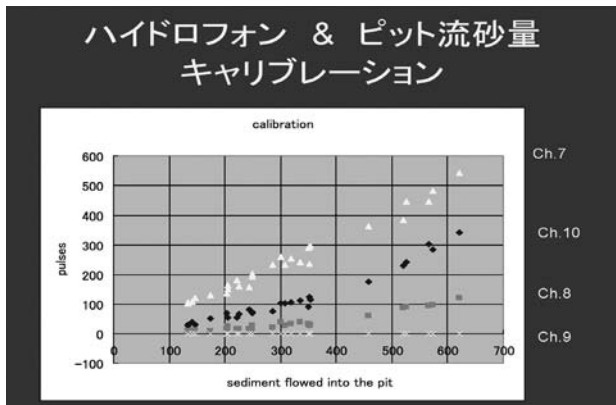


図18 ピット流砂量によるハイドロフォンの検証

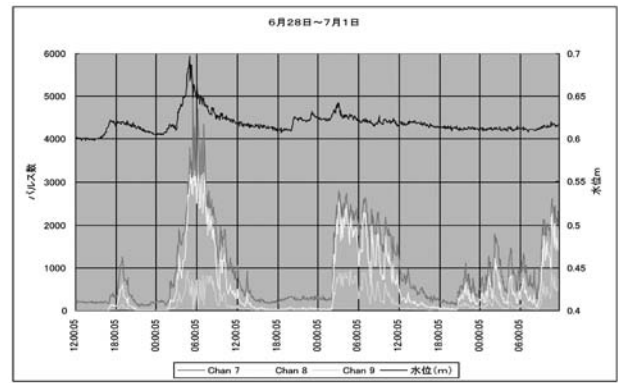


図19 足洗谷試験水路におけるハイドロフォンによる流砂計測 (2005年6月28日～7月1日)

図20は2005年6月28日～7月1日の出水に引き続いて発生した出水において観測された事例である。この出水においても前半にハイドログラフに対応したパルスの発生があり、出水の後半の安定した減水期においてパルスのピークが発生しておりこのことから土砂流出の発生が推定される。

図21は2005年7月2日にピットから採集された砂礫の粒度分布を示している。6月28日～7月1日の出水により移動してピットに堆積した砂礫である。このピットは70cmの深さがあり、土砂は表層から10cm毎に採集され篩分析されたものである。この図に示されるように流出砂礫の平均粒径は約10mmで、足洗谷の河床材料(100mm)より小さい傾向を示している。なお、表層に近い10cm、および20cmにおいて粒径が大きい傾向にあるのは、ピット内に土砂が堆積するに従い水深は浅くなり、水深が10から20cm程度になる

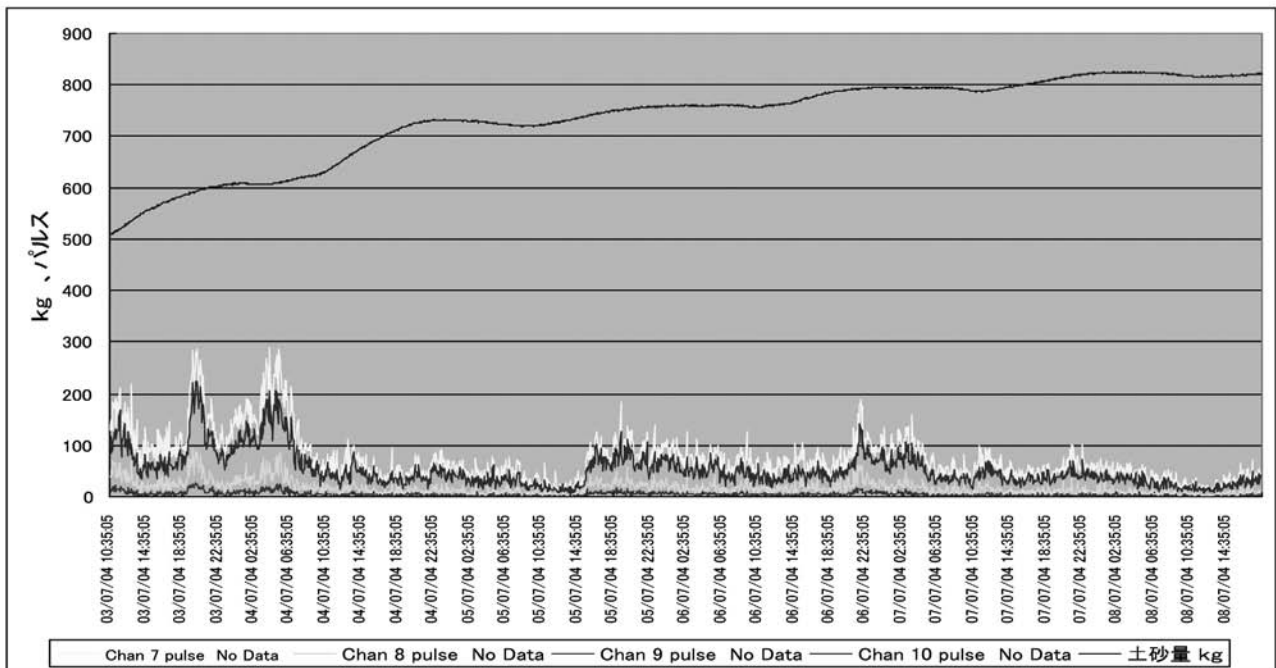


図20 足洗谷試験水路におけるハイドロフォンによる流砂計測 (2005年7月3日)

とピットに一旦堆積した細粒成分が再流出したことによるものと考えられる。

図22は2005年7月3日の出水によってピットに堆積したもので、7月30日にピットから採集された砂礫の粒度分布を示している。この図のNo.1は表層から20cm、No.2は表層から40cm、No.3は表層から60cmに堆積した砂礫の粒度分布を示している。この場合も表層に近い砂礫の粒径が大きい傾向を示しており、ピットの大きさや構造に起因するものと思われる。

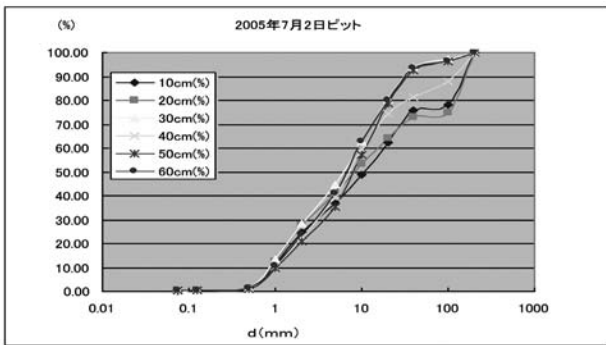


図21 ピット内の土砂の粒径分
(2005年7月2日、足洗谷試験水路)

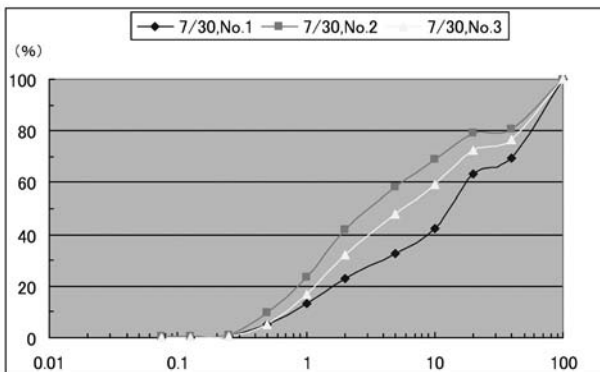


図22 ピット内の土砂の粒径分布
(2005年7月30日、足洗谷試験水路)

6. おわりに

本文において、穂高砂防観測所の試験流域の観測水路において、鉄製のパイプ内に設置されたマイクロフォンによって砂礫の衝突音を計測し、簡便に流砂量を推定するハイドロフォンの計測事例を紹介して、その有効性を示した。この装置では比較的大きな粒径(10cm程度)の砂礫の移動も計測できること維持管理を含めて経費が安く、砂防堰堤などを利用して設置が容易であり、同じ溪流の上下流や支川などに系統的に設置することで土砂動態を把握するシステムとして大いに役立つものと考えられる。この装置と併用して濁度計等を設置することによって、流量、浮遊砂量、掃流砂量などが測定され総合的に土砂動態の実態の解明が可能になるものと期待したい。

参考文献

- 1) 中野公章、笹原克夫：流砂の計測—今、なぜ流砂の計測か—、砂防学会誌、第54巻、第1号、pp.90-97.2001.
- 2) 高濱淳一郎、渡部文人、右近則男、安養寺信夫：音響法による流砂計測、砂防学会誌、第54巻、第6号、pp.59-63.2002.
- 3) 水山高久、野中理伸、藤田正治：常願寺川津之浦下流砂防堰堤におけるハイドロフォンによる流砂観測、砂防学会誌、第55巻、第3号、pp.56-59.2002.
- 4) 水山高久、里深好文：ピット掃流砂計測装置のハイドロフォンのキャリブレーションへの適用、砂防学会誌、第56巻、第3号、pp.55-56.2003.
- 5) 星野和彦、酒井哲也、水山高久、里深好文、小杉賢一郎、山下伸太郎、佐光洋一、野中理伸：流砂等計測システム(六甲住吉型)と観測事例、砂防学会誌、第56巻、第6号、pp.27-32.2004.
- 6) 内尾政人、中川 一、澤田豊明、横山康二、上杉満昭、福田義徳：画像処理方式による礫床河川の粒度分布測定装置の開発、砂防学会誌、第58巻、第2号、pp.26-31.2005.
- 7) 澤田豊明：土砂動態の観測：立山カルデラ砂防博物館研究紀要、第8号、pp.37-52.2007.