

手取川上流域でのハイドロフォンを用いた流砂量観測及び解析

Sediment discharge observation and its analysis by means of a hydrophone in the upper Tedorigawa river basin

中谷 洋明*1

鶴田 謙次*2

吉村 暢也*2

Hiroaki NAKAYA

Kenji TSURUTA

Nobuya YOSHIMURA

Abstract

Operational observation of sediment discharge in steep ravines is pivotal to make timely flash flood warnings as well as to build robust erosion control plans for effective disaster mitigation. A hydrophone sediment discharge measuring system (hereafter “hydrophone system”) has been installed in a 200km²-scale river basin in order to develop a practical method for bed load observation. The hydrophone system counts the times that bed load sediments strike the acoustic sensor of the system. Five amplification levels (hereafter “channel”) can be tuned simultaneously to the same sound signal from the acoustic sensor to examine an appropriate set of the amplifications. A direct sediment discharge sampling apparatus was installed at the right upstream of the hydrophone acoustic sensor to calibrate its measuring. The observation of flood-induced sediment discharge shows that sediment discharge behaves in variance with water discharge as floods come about each season. In one example, sediment discharge fell in spite of steady rising water level, while it spiked sharply with water level plummeting at the latter part of the flood. Sediment supply in the river channel seems to be used up during the snow melt season, which reduced the sediment discharge in response to the rising water level. The relationship between sediment discharge and water level/discharge changes significantly as sediment supply is recharged at the outset of the flood season. A way of quantitative estimation of sediment discharge from the hydrophone system was suggested and compared with that of theoretical estimation based on hydraulic variables. Our result indicates that amplification level 16 for sediment discharge and amplification level 1024 for suspended load are proper for the upper Tedorigawa river basin.

Keywords: hydrophone, bed load, sediment discharge, monitoring

1. はじめに

河道内の土砂流送には、上流域において見られる重力の作用を直接受けて運搬されるものから、下流域で見られる流水の作用を通じて運搬されるものまで様々な形態がある(芦田ら, 1983)。この内、急勾配で土石流状の土砂流送と掃流状の土砂流送とが混在する区間は両者の遷移領域に当り、活発な土砂生産と相俟って、現象の観測資料に基づく解明が充分に進んでいない。この区間は土地利用が高度な地域の上流側に位置するため、監視体制が確立できれば防災上効果が高いと思われる。また、流域全体の安全を効率的に確保するため、中下流域の施設と相乗的に効果を発揮する砂防施設等の整備が必要とされる。従って、急勾配な上流域を持つ河川においては、①洪水等の危険性を早期確

実に把握するため、また、②砂防施設の効果を河床変動計算によって適切に評価・予測するため、流砂の観測・解析を進める必要がある。

掃流砂の挙動に関しては、理論や実験によるものは数多くの蓄積がある。一方、観測によると、山地溪流では流量と流砂量が1対1に対応せず、タイミングがずれ、流砂の生起時間は限定的であることなどが報告されている(水山ら, 1996; 川村ら, 1997; 水山ら, 1998; 水山ら, 2002; 星野ら, 2004)。これらの事例では、流域面積数十~100km²程度での実河川での観測も幾つか報告されている。しかし、実務的に流域監視や施設計画の検討を行うためには、より広い流域面積を対象に、安定的・継続的に流砂をモニタリングする必要がある。そこで、200km²弱程度のより広い流

域での実用的な流砂量観測及び解析手法を確立するため、実河川への適用例もあり、安定して観測できる、間接法の一つの音響センサーを用いたハイドロフォンシステム(以下、特に誤解のおそれのない場合には「ハイドロフォン」と略す)による流砂量観測を水位・流量観測と組み合わせて実施した。本稿では、集中的な流砂観測の事例とその解析結果を報告する。

2. 調査流域の概要

流砂量等の土砂流送特性を計測調査する地点としては、河道レジーム、地形・地質等の点で代表性があり、既設の水位観測所やCCTVカメラによる画像監視が可能であることが望ましいことから、一級河川手取川上流右支川尾添川(おぞがわ)の瀬戸砂防堰堤地点を選定した。尾添川は出水の度に土砂を流出させ、また濁りを発生させる河川であり、古くは濁澄川(にぎりすみがわ)とも呼ばれた。同地点は尾添川の手取川本川合流点から約1400m上流にあり、元河床勾配は1/58と急勾配である。約1700m上流には高さ41mの御鍋砂防堰堤が、約900m下流には大暗渠・透過型の尾添川第一砂防堰堤が設置されている。瀬戸地点で河道は右へ緩く湾曲しており、曲率半径は約80mとなっている。湾曲の影響による左右岸の水位差を考慮するために、調査にあたっては左右岸両方に水位計を設置した。左岸側のものが継続的に使用されていることから、特に断りなしに水位を記述する場合には左岸のものである。尾添川流域では、出水のない通常期は基底水位が0.1m以下となる。しかし、上流域まで豪雪地帯であるため、4~6月の融雪期には基底水位も0.4mまで上昇する。調査流域及び調査地点の概要を図-1及び表-1に示す。

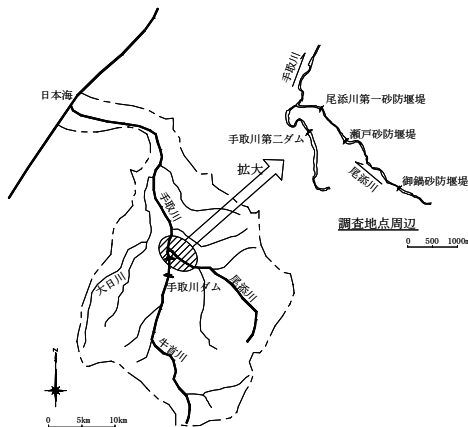


Fig-1 Location of the observation site
図-1 設置地点位置図

Table-1 Quantities related to the observation site
表-1 調査流域の概要

尾添川の流域面積	現況堆砂勾配	平均河幅	近年の最高水位
189.52km ²	1/325	約50m	3.99m(2005.7.12)
調査地点上流流域面積	(下流河道)河床勾配	河床材料d ₅₀	
186.98km ²	1/83	30mm	

※堆砂域中間部のもの。堰堤直上流では10mm。

3. 調査方法

河川における掃流砂等の土砂流送特性は、水量との関係において理解される。そこで、基礎的な水量となる水位を観測地点両岸で測定し、H-Q式を用いて流量に換算した。H-Q式の設定は、2004年10月から2005年10月の期間に実施した流量観測結果をもとに行い、河床測量結果を用いた二次元不等流解析も参考にしている。なお、不等流計算の抵抗則にはマンニングの流速式を用い、粗度係数は0.05が使用されている。H-Q式は式-(1)a、bの通りである(図-2)。

$$Q = 47.56H^2 \quad (H \leq 1.25m) \quad \text{式-(1)a}$$

$$Q = (5.609H + 1.5709)^2 \quad (1.25m < H < 4.0m) \quad \text{式-(1)b}$$

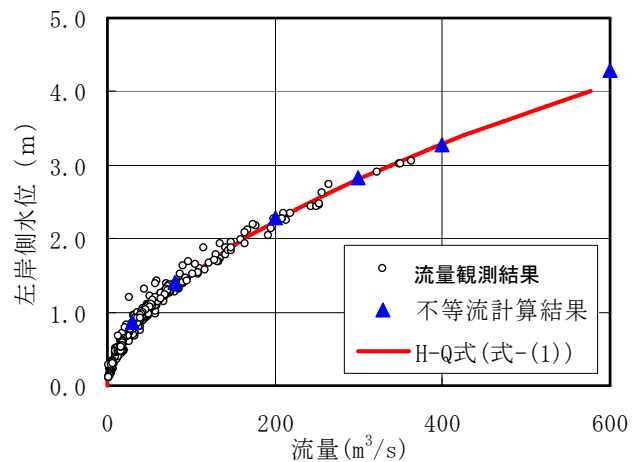


Fig-2 Relationship between water levels and discharges at the observation site
図-2 観測地点での水位・流量関係

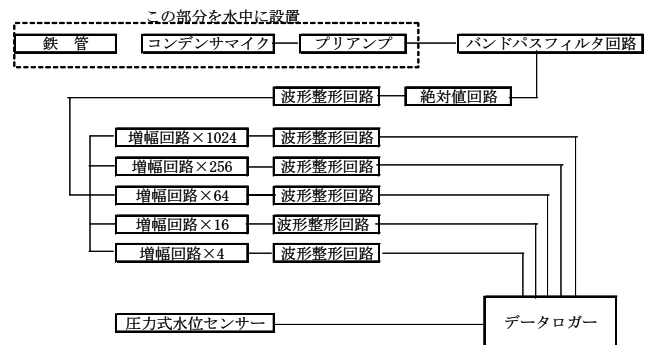


Fig-3 Configuration of the measuring system
図-3 計測システム構成図

ハイドロフォンシステムは、河床や堰堤水通し等に設置した音響センサーに流砂が衝突する音をパルスとして数えるものである。ハイドロフォンシステムの構成図を図-3に示す。観測のためには流下する土砂の衝突による音響エネルギーに応じた増幅率(チャンネル、以下誤解のおそれのない限り「ch」と略す)を設定する必要がある。ハイドロフォンでは音響センサーのコンデンサマイクで集音した波形をバ

ンドパスフィルタで処理した後に増幅したエネルギーが閾値(本調査では 0.1V)を超えているものを波形整形回路で矩形波に整形した後に 1 パルスとして計数している(水山ら, 2002)。例えば「ch16」は増幅率 16 倍を意味する。増幅率が小さい場合には、相対的に大粒径の土砂が音響センサーに衝突する際に生じる大きな音のみをカウントすることになる。一方、増幅率が大きい場合には粒径の大きい粒子のみならず小さい粒子をも含めた土砂の衝突により生じる音までカウントすることになる。計測に最も適した増幅率は個別の河川ごとに試行錯誤で見出すことになる。本調査では、他河川での事例を参考に、ch4、ch16、ch64、ch256、ch1024 の 5 つを検討対象とした。ハイドロフォンの音響センサー部は瀬戸砂防堰堤水通し天端中央付近に設置した。堰堤水通し天端をダム軸方向に幅 120mm、深さ 20mm 切削してセンサー部を埋め込み、水通し面までエポキシ耐摩耗モルタルを用いてセンサー部が半埋設となるように整形し、センサーを固定する周辺部を補強した。ハイドロフォンの計測機器の諸元を表-2 に、設置位置写真を図-4 に示す。

Table-2 Size of the installed hydrophone acoustic sensor
表-2 設置されたハイドロフォン音響センサーの諸元

管径	管厚	管長(感部)	センサー部埋め込み深さ
48.6mm	2mm	2.0m	20mm

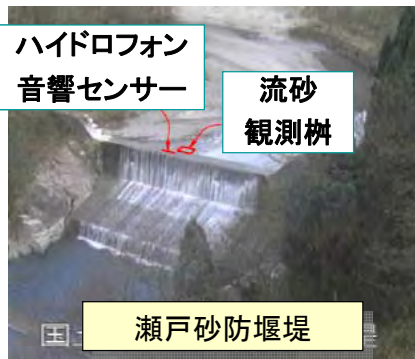


Fig-4 Arrangement of hydrophone acoustic sensor and the sediment trap box

図-4 ハイドロフォン音響センサー及び流砂観測柵の設置位置図

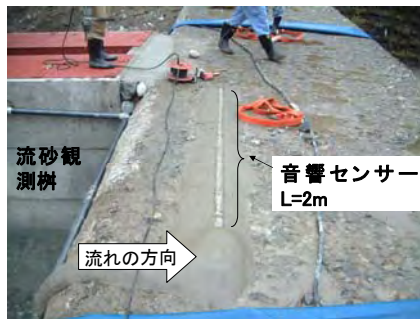


Fig-5 Detail view of setting up the hydrophone acoustic sensor and the sediment trap box
図-5 ハイドロフォン音響センサー及び流砂観測柵の設置状況

音響センサーの計測するパルスから流砂量を推定するためには、観測柵等を用いる直接法と併用して較正(キャリブ

レーション)を実施する必要がある。意味のある較正を実施するためには、直接法の土砂サンプリング地点、あるいは観測柵への導水地点を、音響センサーの近傍とする必要がある。そこで、観測柵を堰堤直上流に設置した。観測柵は、蓋の高さを瀬戸砂防堰堤水通し天端と同じにしてあり、底面のロードセルによって観測時間間隔 1 分間とほぼ連続的に内部に堆積した土砂重量を測定できる。設置は、2004 年の出水がほぼ収まって水位の低下した同年 11 月中旬に実施した。観測柵の大きさは縦横それぞれ 2.0m、深さ 1.5m であるが、流砂量の多い尾添川で設置することから、水流底面から観測柵に落ち込む流砂をできるだけ長時間観測できるよう、流砂の落ち込む幅を上面に 0.4m 幅のスリットの付いた蓋によって制約した。以下本稿では、この観測柵に落ち込んだ土砂が流砂からなると考えて解析を行った。設置状況写真をハイドロフォンの音響センサーと合わせて図-5 に示す。

SS 濃度については、瀬戸砂防堰堤付近では安定して採取できる地点を確保できなかったため、約 1400m 下流で手取川合流地点よりも上流側の濁澄橋付近の右岸側で SS 濃度 (mg/l) を計測した。

4. 観測結果の考察

4.1 定性的分析

ハイドロフォンを設置した 2004 年 11 月から 2006 年 2 月までの 16 ヶ月間の間に発生した出水事例の内、表-3 に示す 8 事例を対象に調査検討を行った。

Table-3 Sizes of studied flood discharges and of sediment discharges observed by the hydrophone system

表-3 洪水規模及びハイドロフォンのパルス総数で見た土砂流出規模

事例番号	出水事例名	洪水継続時間 (hr)	ピーク流量 (m ³ /s)	総流量 (m ³)	出水中のチャンネル別ハイドロフォンパルス総数(回)				
					ch1024	ch256	ch64	ch16	ch4
1	2004.12.5	34	127.11	5,106,041	676869	458654	240045	98566	16286
2	2005.3.17	35	82.57	2,826,702	886810	654036	360599	119328	2789
3	2005.3.23	32	25.34	1,190,902	978327	815604	516180	185287	2163
4	2005.4.19	37	53.44	2,943,326	801963	447545	209929	59224	832
5	2005.6.28	32	342.62	9,546,674	737888	511033	264178	114721	12279
6	2005.6.30	47	350.98	11,335,546	1947015	1342224	936052	500711	40051
7	2005.7.4	48	359.44	8,325,551	694956	510550	277287	98055	4709
8	2006.2.26	23	47.56	1,271,434	768302	665929	489044	241528	22916

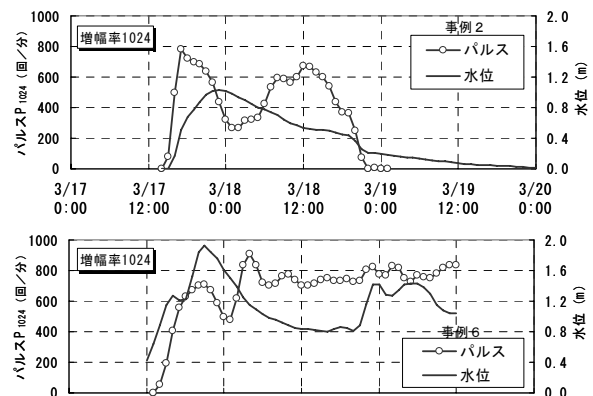


Fig-6 Time series of water level and ch1024 pulse for Case 2 and 6
図-6 事例2及び6の水位及びch1024のパルスの時系列

図-6に事例2と事例6の水位及びch1024のパルスの時系列を示す。パルス数は、局所重み付け回帰法(Locally Weighted Regression(lowess)法)を、前後6時間の5分間積算・5分間隔の観測パルスに適用して平滑化して示している(Cleveland, 1979)。以下特に断らない限り同様の処理を施している。時間差に関する最小二乗法には式-(2)を、残差に関する最小二乗法には式-(3)を用いた。式-(2)b及び(3)bの重み関数の形状を図-7に示す。

$$\sum_{k=-n}^{k=n} w_k(t_i)(P_k - \beta_0 - \beta_1 t_k)^2 \quad \text{式-(2)a}$$

$$w_k(t_i) = \left[1 - \left| \frac{t_k - t_i}{n\Delta t} \right|^3 \right]^3 \quad \text{式-(2)b}$$

ここに、 t_i は $\Delta t=5$ 分を用いて差分した*i*番目の時刻、 $n=72$ 、 P_k は時刻*k*のパルス数、 β_0 、 β_1 は P_k を推定する多項式(ここでは一次式)の係数、 $w_k(t_i)$ は時刻*k*に対して時刻 t_i の寄与する重み係数(関数)である。式-(2b)中の $n\Delta t$ は6時間となる。

$$\sum_{k=-n}^{k=n} \delta_k w_k(t_i)(P_k - \beta_0 - \beta_1 t_k)^2 \quad \text{式-(3)a}$$

$$\delta_k = \left[1 - \left(\frac{e_k}{6s} \right)^2 \right]^2 \quad \text{式-(3)b}$$

ここに、 δ_k は時刻*k*に対してその残差の大きさに従って与える重み付け係数(関数)である。 s は $|e_k|$ の中央値であり、 e_k をはずれ値に対して頑強(robust)にするために導入される。

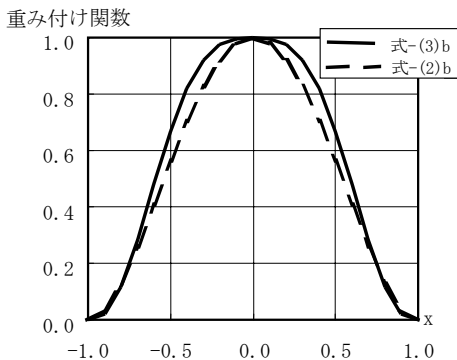


Fig-7 Weighting functions for time differences and residuals
図-7 時間差及び残差に関する重み付け関数

融雪出水である事例2の場合、水位ピークとなる3月17日深夜から3月18日早朝にかけて、パルス数が減少している。また、事例2では水位が低下してきた3月18日昼過ぎから逆にパルス数が増加している。出水期中盤である事例6

の場合、水位が一旦低下する6月30日昼過ぎから逆にパルス数が増加している。従って、ハイドロフォンで観測されるパルス数は流量の増減とは必ずしも対応していない。同様のことが小田等(2005)により、水理模型実験へのハイドロフォンの適用時の留意点として指摘されている。

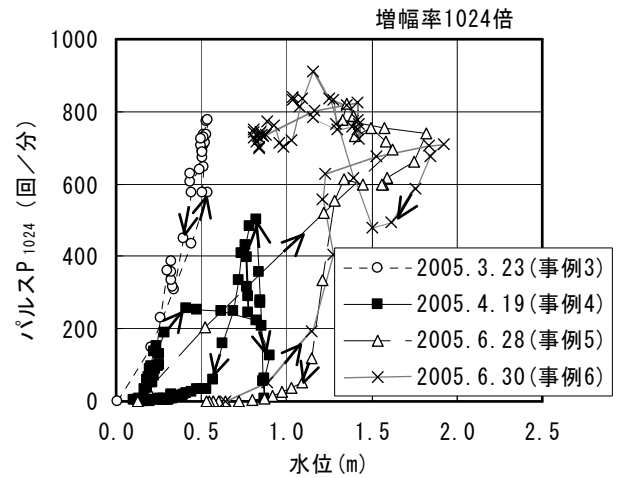


Fig-8 ch1024 pulse plot in relation to water levels for Case 3-6
図-8 事例3~6における水位とハイドロフォンパルス(ch1024)との関係

図-8に事例3~6ごとの水位とch1024のパルスの関係を示す。図中では各プロットを時間順に結んでいる。事例5と6は時間的には近いが、事例と事例との間に、一旦水位も低下し、パルスもゼロに戻っている。いずれの事例においてもパルス数と水位との比は時間の経過とともに変化し図-8上でピーク付近ではループの回転方向が一定ではないものの概ね右回りのループとなっている。事例3、4及び事例5の途中まで、融雪からの洪水履歴を重ねるに従い、洪水最大水位は大きくなっているが最大パルス数はむしろ小さくなっている。その結果、この間、最大パルス数と最大水位との比も洪水ごとに小さくなっている。しかしながら、事例5の途中から再度パルス数が大きくなり、多少の水位変動はあっても高いパルス数が維持され、パルス数の水位に対する比は大きくなっている。事例5に続く事例6も事例5と同様の経過をとった類似のループとなっている。今泉ら(2005)はある時点の土砂流送現象にはその時点までの土砂流送や洪水波形の履歴に依存する経路依存症(ヒステリシス)があることを示しており、図-8に示されるループもこのようなヒステリシスの現れであることが推察される。本事例で計測されたパルスの観察からは、水位・パルス数の平面上で洪水ごとにループの位置と大きさは、融雪期間中は比較的小さいが、出水期に大きくなる傾向が見られた。

4.2 定量的分析

出水規模とチャンネル別の総パルス数との関係について、洪水ごとのすなわち調査事例ごとの総流量、洪水継続時間、及びピーク流量と総パルス数との間の相関解析を行った。

チャンネル別の決定係数(R²)を図-9に示す。どの増幅率に対しても総流量との相関が最も高く、次にピーク流量との相関があるが、洪水継続時間との相関は明瞭ではない。総パルス数は洪水流出の総量と強度それぞれに関係しているものの、いずれのR²も0.3未満と小さいため、出水規模のみで総パルス数を説明するのは難しいことから、パルス数に影響する因子を今後更に検討する必要がある。

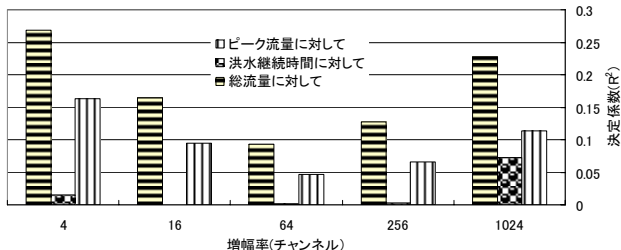


Fig-9 Correlation between total pulse of each channel and the flood magnitude (total discharge, flood duration, and peak discharge)
 図-9 総流量、洪水継続時間、及びピーク流量と総パルス数との相関(決定係数R²)

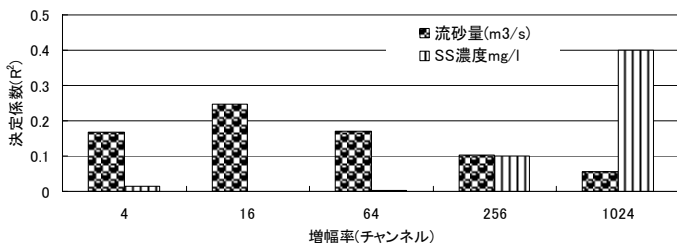


Fig-10 Correlation between one-minute pulse and bed/suspended load sediment discharge
 図-10 増幅率別に見た1分間パルス数と流砂量・SS濃度との相関(決定係数R²)

同じ時刻における直接法から得られた流砂量及びSS濃度とチャンネル別のパルス数との相関解析の結果を図-10に示す。ただし、流砂量は瀬戸砂防堰堤の水通し全断面に変換後のものである(以下同様の処理を行っている)。これから、流砂量の推定にはch16が、SS濃度の推定にはch1024が適していることが分かる。流砂量については事例1及び5のch16に対応したものを、SS濃度については事例5のch1024に対応したものをそれぞれ図-11、図-12に示す。また、流砂の直接測定にはロードセルを用いているため、観測柵内の土砂巻上げ等によって負の値をとっている領域がある。

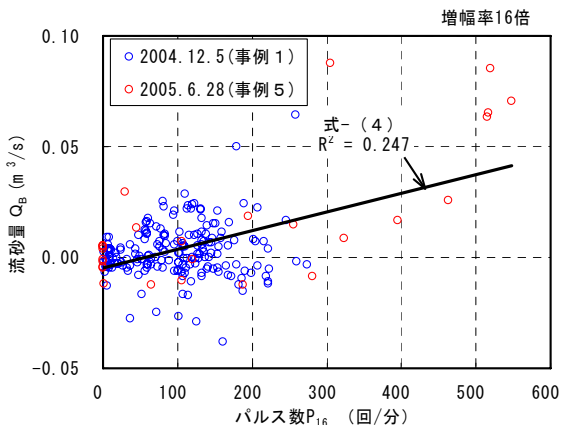


Fig-11: Sediment discharge in relation to ch16 pulses for Case 1 and 5
 図-11: ch16パルスと掃流砂量との関係(事例1及び5について)

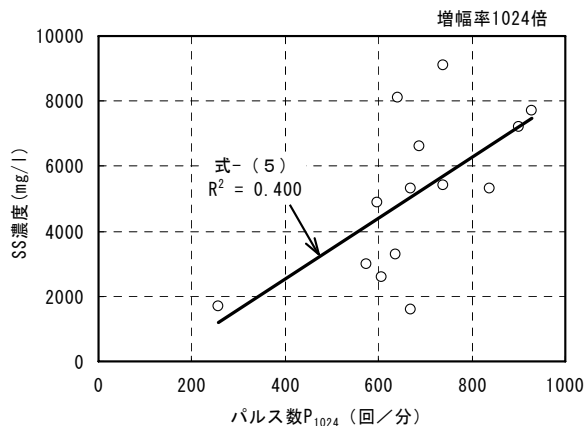


Fig-12 SS concentration plot in relation to ch1024 pulse for Case 5
 図-12 ch1024パルスとSS濃度との関係(事例5について)

これから、尾添川瀬戸地点においては、間接法であるハイドロフォンを用いて、式(4)により流砂量が推定できる。

$$Q_B = \frac{(P_{16} - 56.87)}{11876.48} \quad \text{式-(4)}$$

ここで、Q_Bは全断面での実容量の流砂量(m³/s)、P₁₆はハイドロフォンの音響センサーのch16のパルス数(回/分)である。

SSについては事例が少ないが、参考までに瀬戸地点でのch1024のパルス数と濁澄橋地点のSS濃度との線形関係を推定すると式(5)のようになる。

$$q_s = 9.4P_{1024} - 1239.36 \quad \text{式-(5)}$$

ここで、q_sはSS濃度(mg/l)、P₁₀₂₄はハイドロフォンの音響センサーのch1024のパルス数(回/分)である。

事例1、5、6、7、に対して、式(4)を用いて推定した流砂量を、掃流砂式から算出される流砂量と比較する。掃流砂式としては、急勾配区間に適用する芦田・高橋・水山式(ATM①式)、緩勾配区間に適用する芦田・高橋・水山式(ATM②式)、Meyer-Peter-Muller (MPM式)、芦田・道上式、Brown式について検討を行う(芦田ら, 1978; 土木学会, 1999)。河道条件としては、瀬戸砂防堰堤から上流1300m区間の平均値として河幅を50m、河床勾配を1/223、粗度係数を0.05とした。出水事例ごとの流砂量と掃流砂式から算出される流砂量とを図-13に示す。

掃流砂式から算出される流砂量は、与えられた河道条件と流量とで流しうる最大のものである。従って、流砂量の上界に最も近い式が調査地点で最も妥当する掃流砂式となる。調査事例程度の流量に対しては、急勾配区間に適用する芦田・高橋・水山式が最も近く妥当と考えられる。しかし、流量規模が大きくなると乖離する傾向がある。瀬戸砂防堰堤地点での計画流量は2198.1m³/sと、調査事例よりも大きいため、砂防計画等で掃流砂式を選定する場合には、更にデータを蓄積し、MPM式や芦田・道上式も含めて検討す

る必要がある。

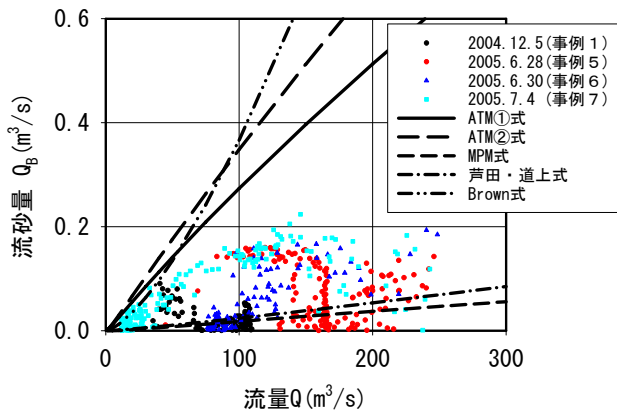


Fig-13 Comparative plot of observed and theoretically deduced sediment discharge (bedload)

図-13 掃流砂量式と出水事例ごとの流砂量との比較

5. 結論

一級河川手取川水系尾添川の下流端に近い瀬戸地点において、従来報告されている事例よりも広い200km²程度の流域において流砂量及び水位、流量観測を実施し、水位・流量といった基本的な水理量と流砂量との関係を検討した。調査事例の定性的な考察及び定量的な分析を行った結果、既に知られているように土砂移動とその流砂量は水理量と異なった変動、挙動を示す場合があること(水山ら, 1998; 今泉ら, 2005)が確認された。本事例では、水理量と流砂量との関係は一出水中はもちろん、同一出水期・融雪期内でも大きく変化することが分かった。従って、上流域での河川状況を把握するためには、水位・流量といった水理量のみならず、土砂移動及び流砂量についての観測も不可欠であると言える。また、出水事例ごとに变化する水理量と流砂量との関係を追跡するために、単発的な観測ではなく、少なくとも一出水期程度の継続的な観測が必要であると言える。定量的な分析によると、総流量やピーク流量といった出水規模のみでは、総パルス数等のハイドロフォン計測結果を充分説明できず、パルス数に他の因子も影響していることが示唆された。このことは従来からの知見とも一致している(星野ら, 2004; 今泉ら, 2005)。一方、パルス数と流砂量との相関は増幅率によって変化することから、調査を蓄積すれば、音響エネルギーに対応した増幅率を用いることによって、流下土砂の粒径(集団)を判別できる可能性がある。

調査事例が少ないため、音響センサーのパルスを用いた流砂量やSS濃度の推定の信頼性は十分ではないが、手取川水系尾添川の本調査地点においては、ch16を流砂量の推定に、ch1024をSS濃度の推定に用いると考えられ、同流域での実用的な流砂量観測体制の基礎付けとできると考えられる。今後は事例を蓄積すると共に、水理量、流砂量の観測に混入するノイズを抑え、計測区間での流れの乱れを解

析することによって推定の信頼性を向上させる必要があると考えられる。

謝辞

手取川でのハイドロフォンシステムを用いた流砂の調査方法の設定、分析にあたっては、京都大学大学院農学研究科水山高久教授に終始一貫助言を頂いた。ここに深く感謝申し上げます。

引用文献

- 芦田道男・高橋保・水山高久(1978)：山地河川の掃流砂量に関する研究, 砂防学会誌(新砂防), Vol. 30, No. 4, p. 9-17
- 芦田道男・高橋保・道上正規(1983)：河川の土砂災害と対策, 森北出版, p. 20, 27-29
- Cleveland, W.S.(1979)：Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplot, Journal of the American Statistical Association, 74, p. 829-836
- 土木学会(1999)：水理公式集 [平成11年版], 社団法人土木学会, p. 162-166
- 今泉文寿・山本亨・土屋智・逢坂興宏(2005)：荒廃小流域における掃流砂・浮遊砂の流出実態—直接採取法による実態把握と流出機構の考察—, 砂防学会誌(新砂防), Vol. 57, No. 6, p. 13-20
- 星野和彦・酒井哲也・水山高久・里深好文・小杉賢一朗・山下伸太郎・佐光洋一・野中理伸(2004)：流砂等計測システム(六甲住吉型)と観測事例, 砂防学会誌(新砂防), Vol. 56, No. 6, p. 27-32
- 川村力・清水康行・藤田睦博・市川嘉輝(1997)：山地河川における流砂の観測と解析, 水工学論文集, Vol. 41, p. 195-200
- 水山高久・野中理伸・野中伸久(1996)：音響法(ハイドロフォン)による流砂量の連続計測, 砂防学会誌(新砂防), Vol. 49, No. 4, p. 34-37
- 水山高久・富田陽子・野中理伸・藤田正治(1998)：ハイドロフォンによる流砂量の観測(続報), 砂防学会誌(新砂防), Vol. 50, No. 6, p. 44-47
- 水山高久・野中理伸(2002)：衝突音による掃流砂計測手法の開発, 河川整備基金助成事業, p. 10
- 水山高久・野中理伸・藤田正治(2004)：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(新砂防), Vol. 55, No. 3, p. 56-59
- 小田晃・長谷川祐治・水山高久・宮本邦明・野中理伸(2005)：ハイドロフォンによる流砂量計測の水理模型実験への適用, 砂防学会誌(新砂防), Vol. 58, No. 2, p. 15-25