

山地河川における掃流砂量の横断方向での変動特性に関する一考察

Study on the cross-sectional variability of bedload discharges in a mountain stream

中谷 洋明*1

鶴田 謙次*2

吉村 暢也*2

Hiroaki NAKAYA

Kenji TSURUTA

Nobuya YOSHIMURA

Abstract

Sediment transport measurements in mountain torrents are pivotal to comprehend the nature of the process. Long-term continuous measurement in natural river basins with a substantial scale has been circumvented by many obstacles. Direct sampling, therefore, has been augmented by more indirect but stable methods (hereafter “indirect method”) in recent years such as a hydrophone pipe-microphone acoustic sediment discharge measuring system (hereafter “hydrophone system”). A statistical analytical method based on the hydrophone system has been developed, which enables us to calibrate and estimate bedload amounts sampled by a sediment pit within a limited width of river sections. Observation of sediment transport phenomena, however, has not been fully expanded across a river cross section. Cross-sectional variability of bedload discharges has to be understood to select appropriate observation points in a section and to estimate full-width sediment discharges out of those at a unit-width.

A bedload discharge observation facility consisting of a pair of sediment trap pits, together with a water level gauge, has been installed in a 100-km² scale river basin, in order to make pair observations at the right and the central point in a cross section. 12 small-to-medium size flood cases were observed and analyzed in order to quantitatively understand the nature of bedload discharges at each point section and their mutual relationship in a sequential time series as well as in aggregated sums over each case. Intensities of bedload discharges underwent fluctuation of an order of magnitude at a different timing for each point over the observed cases. As a result, relative intensities between the two observation points, expressed by their differences, changed from positive to negative across zero, which gave a fluctuation cyclic period of from about 20 to 40 minutes. Further observation, if combined with the indirect method of hydrophone systems, which have a shorter time constant as an observation system, is likely to clarify cross-sectional variability of bedload discharges in a more reliable manner.

Keywords: bedload discharge, hydrophone, discreteness, concentration

1. はじめに

河川上流域の区間の山地溪流における土砂流出・流送現象を、観測に基づいて解明するために、直接的な土砂水理因子及び流砂量だけではなく、間接的に検知される物理量である「流砂関連量」を活用した、安定性・連続性の高い観測（「間接法」と言う）に基づく事例検討が進められてきた（Bunte, et al, 2004; Habersack et al, 2001, 2002; 今泉ら, 2005; Rickenmann et al., 2007, 2008）。近年では、音響センサーの一種であるハイドロフォンを用い、河床移動土砂の衝突音響エネルギーをパルスに変換して計測するハイドロフォンシステム（以下、「ハイドロフォンシステム」と総称する）による間接法の実際の河川への適用事例が多く見られる（星野ら, 2004; 中谷ら, 2007; 中谷, 2008, 2009）。

間接法の導入によって、実験系よりも継続時間が長く時間スケールの大きい実現象系での流砂現象の観測が可能になり、解析手法の進展により、現象の解明も進みつつある（中谷, 2008, 2009）。一方、流砂現象観測の空間スケールを横断方向に拡張することは、流砂観測施設の同一断面内での設置位置の選定や、限られた箇所と幅での観測・解析結果の河道全断面への拡張手法を確立するために不可欠であるが、観測事例に基づいた検討は十分ではない（Rickenmann et al., 2007, 2008; Nakaya, 2008）。

直接法は、流砂現象を定量的に観測できるものの、観測柵や導砂管によって土砂を直接採取する性質上、観測場の攪乱が避けられないことから、全断面を観測対象とすることは困難である。一方、間接法は横断方向へ多数観測機器

*1 正会員 外務省国際協力局無償資金・技術協力課 Member, Grant Aid and Technical Cooperation Div. International Cooperation Bureau, MOFA *2 正会員(団体) 株式会社コルバック Member, CORVAC co.

を配置することによって全断面を観測対象とできる可能性はあるものの、解析範囲を土砂水理条件が一樣と見なせる横断方向の幅に収めるため、個々の観測機器の長さを限定することが必要であると共に、定量的な信頼度を確保するために、直接法による検証と較正を必要とする。

そこで、本稿では、流砂現象観測の空間スケールを横断方向に拡張する手法を基礎付けるため、横断方向での流砂量の相違を、中小規模洪水時に同一断面内 2 箇所で行った直接観測に基づいて分析する。

2. 調査流域、観測手法及び観測資料の概要

直接観測を、図-1 に示す信濃川水系魚野川流域の上流区間にある大野原橋直下流の第 1 帯工地点の右岸及び流心部で 2 箇所同時に実施した(以下、特に誤解のおそれのない限り、魚野川大野原橋右岸部・流心部を総称して「大野原橋地点」という)。観測地点の諸元を表-1 に、下流から見た概況写真を写真-1 に、横断形状を図-2 に示す。

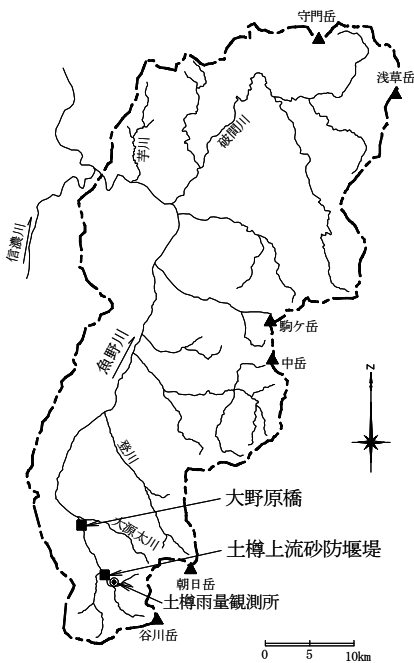


図-1 観測地点位置図
(信濃川水系魚野川大野原橋地点)
Fig.1 Location of observation site
(O-noharabashi, Uonogawa-river)

表-1 観測地点の概要

Table-1 Overview of observation sites	
信濃川水系魚野川大野原橋地点	
観測地点	信濃川水系魚野川大野原橋地点
支川全体流域面積	1504km ²
調査地点上流流域面積	97.6km ²
現況河床勾配	1/42
平均河幅	40m
河床材料d ₅₀	49.1mm
河床粗度	0.045s/m ^{1/3}



写真-1 観測地点概況
Photo1 Overview of observation site

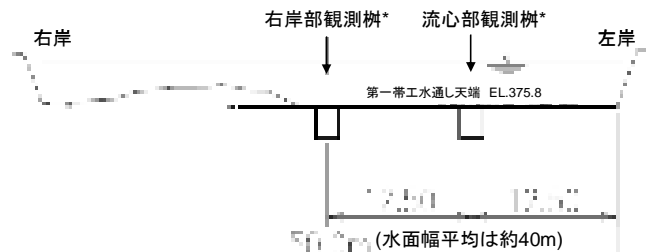


図-2 魚野川・大野原橋地点横断面図
Fig.2 Cross section at Onoharabashi site
in Uonogawa-river

直接法として土砂を採取するため、大野原橋地点及び瀬戸地点とも、図-3 に概要を示す縦横それぞれ 2.0m、深さ 1.5m の観測柵を設置した。図-3 には併設したハイドロフォンの鉄管の概要位置も示す。

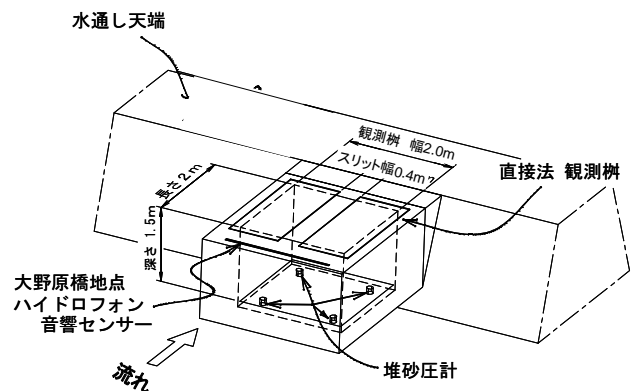


図-3 直接法の観測柵の設置概要図
Fig.3 Arrangement of sediment trap box

土砂の落ち込む河床高は、大野原橋地点では第 1 帯工の水通し高さとなる。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に、流砂の落ち込む幅を柵の蓋に 0.4m 幅のスリットを付けることで制約した。観測柵は、底面のロードセルによって、内部に堆積した土砂重量を 5 分間隔で連続的に測定できる。直接法の観測機器の詳細については、中谷ら, 2007 及び中谷, 2008 を参照)。

大野原橋地点において観測資料に基づいて水位、流量等の水理諸量の関係式を構築した。解析的に算出された水位 H -流量 Q 、全断面流量 Q に対する全断面流量及び観測地点単位幅流量比 (Q/q) の関係を、検討範囲において、簡単化のためにベキ乗式で近似した式形はそれぞれ式(1)及び(2)ようになる。ここで、水位—流量は 2 次、流量比と流速は 4 次近似としている(各観測地点での式の係数、適用範囲、及

表-2 観測事例の概要

Table-2 Overview of observation cases

観測箇所	観測番号	観測期間	洪水継続時間(hr)	全断面流量		全断面流砂量*	
				ピーク流量(m ³ /sec)	総流量(m ³)	ピーク流砂量	総流砂量(m ³)
魚野川大野原橋右岸部・流心部同時観測事例	OD1	2008/3/24	13:35	3.00 × 10	5.83 × 10 ⁹	2.78 × 10 ⁻³	1.49 × 10
	OD2	2008/4/7-10	60:20	2.03 × 10	3.24 × 10 ⁶	7.62 × 10 ⁻³	6.87 × 10
	OD3	2008/4/10-13	61:55	2.30 × 10	4.20 × 10 ⁶	1.15 × 10 ⁻²	5.65 × 10
	OD4	2008/4/17-25	193:55	4.47 × 10	1.73 × 10 ⁷	7.78 × 10 ⁻³	1.16 × 10 ²
	OD5	2008/5/20	20:50	6.96 × 10	2.40 × 10 ⁶	4.17 × 10 ⁻³	1.59 × 10
	OD6	2008/6/23	12:40	1.27 × 10 ²	1.28 × 10 ⁶	3.32 × 10 ⁻²	6.84 × 10
	OD7	2008/6/29	8:00	2.14 × 10	4.69 × 10 ⁵	1.55 × 10 ⁻³	2.69
	OD8	2008/7/7	9:10	2.38 × 10	5.13 × 10 ⁵	1.55 × 10 ⁻³	4.28
	OD9	2008/7/27	5:10	3.66 × 10	4.60 × 10 ⁵	1.03 × 10 ⁻²	6.84
	OD10	2008/8/5-6	15:40	5.00 × 10	8.65 × 10 ⁵	2.37 × 10 ⁻²	3.18 × 10
	OD11	2008/8/19	7:25	3.85 × 10	8.51 × 10 ⁵	3.80 × 10 ⁻³	1.84 × 10
	OD12	2008/9/22	4:20	4.26 × 10	4.77 × 10 ⁵	7.65 × 10 ⁻³	1.43 × 10

*Q/q比により単位幅断面流砂量を全断面流砂量へ換算した値。
同時観測事例での流砂量とパルス数は流心部のものを記載。

びベキ乗式の決定係数 R²については中谷、2008 を参照。

$$Q = \alpha_0(H + \alpha_1)^2 \quad (1)$$

$$\frac{Q}{q} = \beta_0 + \beta_1 Q + \beta_2 Q^2 + \beta_3 Q^3 + \beta_4 Q^4 \quad (2)$$

解析対象とした観測事例は、大野原橋地点の右岸部と流心部とで同時観測を行った 12 事例である。累積観測時間は合計 413 時間 00 分である。観測事例の概要を表-2 に示す。

ここで、流砂量を観測柵による単位断面の値から全断面の値に換算する際には、一例として全断面流量 Q と流砂量観測地点での単位幅断面流量 q との比を用いている(同換算手法については中谷、2008 を参照)。

ピーク流量及びピーク流砂量が最大となった事例は、Q=1.27 × 10²(m³/sec)、Q_B=3.32 × 10⁻²(m³/sec)となった OD6 であった。総流量と総流砂量は観測した洪水継続時間にも左右されるが、それぞれ、4.69 × 10⁵~1.73 × 10⁷m³、2.69 ~1.16 × 10²m³の範囲にあった。

観測事例の流心部における全断面流量 Q(m³/sec)と全断面流砂量 Q_B(m³/sec)との関係を OD6 について図-4 に示す。流砂量は流量とは別の挙動をしており、大きな変動幅を示す。

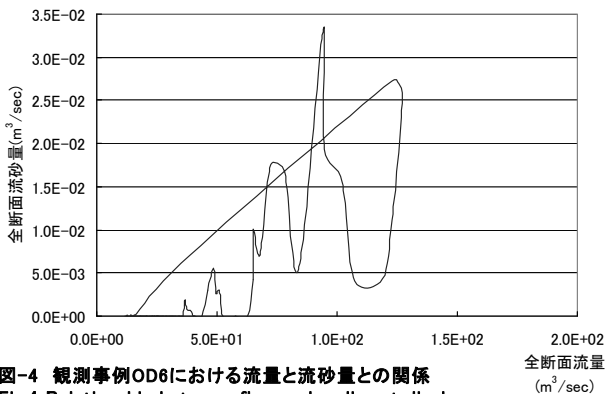


図-4 観測事例OD6における流量と流砂量との関係
Fig.4 Relationship between flow and sediment discharge in observation case OD6

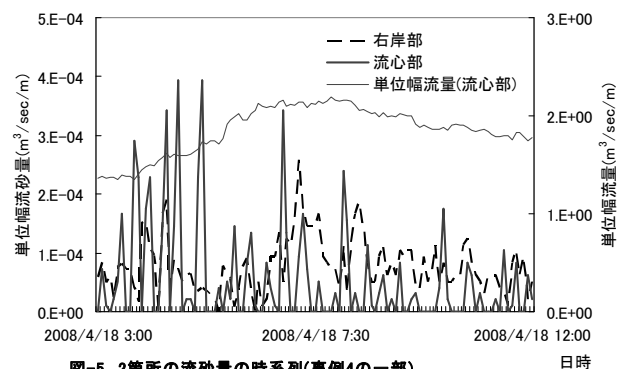


図-5 2箇所の流砂量の時系列(事例4の一部)
Fig.5 Bedload discharge sequence at 2 observation points (a part of Case 4)

観測事例の右岸部と流心部 2 箇所における単位幅流砂量 (m³/sec/m)の時系列を、流心部での単位幅流量と合わせ、OD4 のピーク付近の時間帯を参考に図-5 に示す。2 箇所の単位幅流砂量は、同一断面で近接しているにもかかわらず、異なった挙動を示している(図は省略するが、他の事例でも同様となる)。

観測事例ごとに最大の流砂量となった時刻の単位幅での流量・流砂量を、平衡流砂量式と比較検討する。平衡流砂量式としては、急勾配区間に適用される芦田・高橋・水山式(以下、緩勾配区間に適用される式と区別するためにATM①式と略す)、Meyer・Peter-Müller式(以下、MPM式と略す)、芦田・道上式を用いた(ASCE, 1975; 芦田ら,1978, 1983; 土木学会, 1999)。それぞれの流砂量式について、混合粒径の影響を反映させるために修正 Egiazaroff 式を適用して粒径階別流砂量を算出し、合計して流砂量を算出している。但し、ATM①式については、代表粒径として平均粒径を採用することで混合粒径の影響を反映できることから修正 Egiazaroff 式は適用されない。大野原橋地点流心部について図示すると図-6 のようになり、ATM①式は下回るが、観測事例によっては、MPM 式及び芦田・道上式を上回る場合があった。これは各事例での最大流砂量時においてであるので、観測事例は全体としては、河床全体の大規模な流動を伴わない中小規模の平常の洪水のものであったと考

えられる。以下では、単位の整序のため、また、換算法の影響を避けるため、流量、流砂量を横断方向幅 1m・時間長さ 1 秒あたりに揃えて扱う。

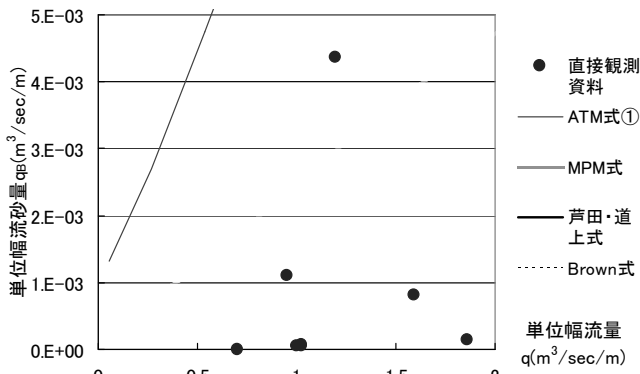


図-6 大野原橋流心部における単位幅流量と単位幅流砂量の観測値と理論式の関係(事例ごとの最大流砂量発生時)
Fig.6 Relationship between observed unit-width flow /bedload discharge and theoretical equations at Onoharabashi central section when q_B is maximal in each case

3. 解析手法

単位時間、単位幅あたりに換算した直接観測による流砂量 q_B 及び流量 q の時系列が解析の基礎となる土砂水量観測資料となる(単位幅値であることをそれぞれ小文字で明示する。誤解のおそれのない限り単位及び、「単位幅」及び「単位時間」の形容も省略して表記する。)。まず、箇所別の逐次時系列値を観測事例別に降順に並べ替え、流砂量の累積曲線を描くことで、土砂流出の集中性を把握し、箇所間で流出特性を比較する。続いて、箇所別の流量及び流砂量の逐次時系列値及び事例別積算値の関係図を描くことで、流水及び流砂の流出規模の相互の関係を箇所別に検討すると共に、箇所間での流砂量特性も比較する。これまで単位幅断面から全断面への変換には、全断面流量と単位幅断面流量の比を用いた事例解析が進められてきたことから、流量及び流砂量について、事例別の積算値の箇所間の比の範囲及びその関係を検討する(中谷, 2008)。

同一断面内 2 箇所の流砂量の相違を検討するため、箇所別の流量及び流砂量の逐次時系値について、流心部の値から右岸部の値を引くことで、箇所間差分値の時系列を得る。差分値は、観測事例別の事例別積算値に対しても得られる。まず、流量及び流砂量の差分値の関係図を描くことで、流砂量差分と流量差分の関係を検討する。続いて、流砂量差分値の時系列において、観測事例別に正負入れ替わりに要する時間を算出することで、流砂量の集中帯である砂礫堆前縁部の同じ側が前にくる周期を検討する。合わせて、観測事例別に周波数解析も実施する。但し、観測時間間隔が 5 分間であるため、標本化定理により、検出できる周期のモードは 10 分間より長いもののみとなる制約がある(ナイキストの標本化定理については、例えば、菊山, 2002 を参照)。

流砂波形は右岸部、流心部という固定的な観測地点でそ

れぞれ観測される(流砂波形についての詳細な議論は、中谷, 2009 を参照)。逐次流砂量の横断方向差分値の持つ周期は、2 つの観測箇所を通過する流砂波形の相対的な大小関係が一旦入れ替わり、また元に戻るまでに要する時間を表すものであり、これは、図-7 に示すように空間側から見ると砂礫堆の前縁部が河道内を進行する周期となる。右岸部及び流心部での同時観測流砂量の比較分析の流れの概要を図-8 に示す。

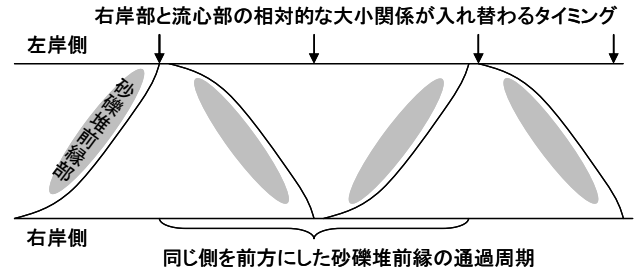


図-7 砂礫堆前縁の流下移動の概念図
Fig.7 Conceptual view of downstream motion of sand dune fronts observed simultaneously in the same cross section

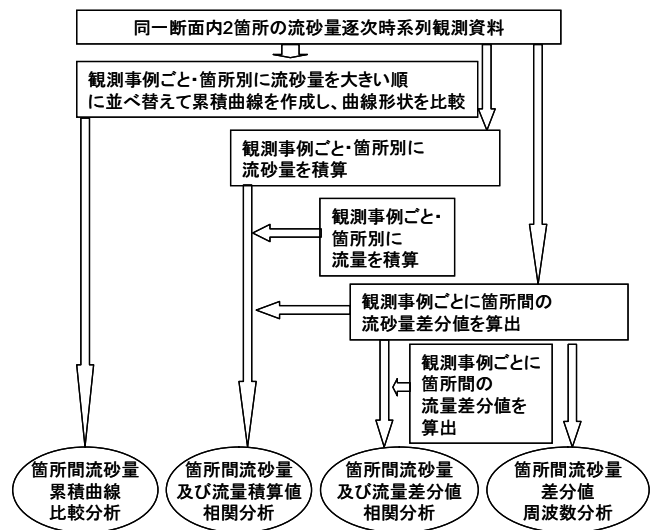


図-8 横断方向の同時観測流砂量の比較分析の概要
Fig.8 Overview of comparative analysis of sediment discharges observed simultaneously in the same cross section

4. 解析結果

観測箇所別・観測事例別に算出される、降順に並べ替えた流砂量の累積値が、80%に達するのに要した時間の洪水継続時間に対する比率を図-9 に、箇所別の平均的な累積曲線を図-10 に示す(本稿では 80%を「大部分」と見なしている。)

右岸部、流心部それぞれで 80%の土砂流出に要した時間は洪水継続時間に対して 15.9%及び 18.1%となっており、土砂流出は離散的ではあるものの、集中して合計約 1/6 の時間に発生している。累積曲線の形状も類似していることから、観測した 12 事例について、右岸部と流心部の土砂流出特性はほぼ同じと見なす。

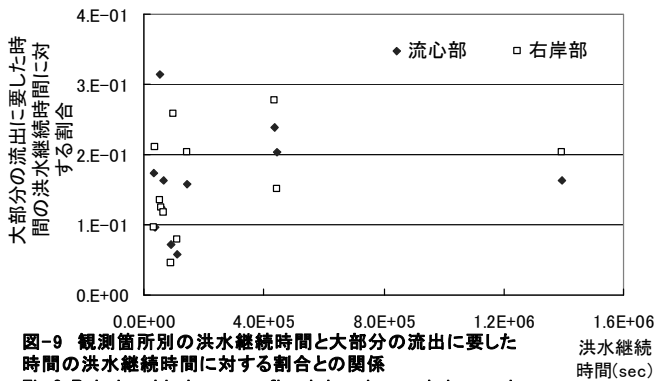


図-9 観測箇所別の洪水継続時間と大部分の流出に要した時間の洪水継続時間に対する割合との関係
Fig.9 Relationship between flood duration and time ratio needed for major part of sediment to be discharged for each case

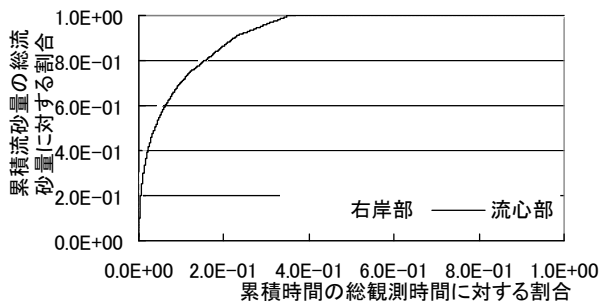


図-10 降順並べ替え後の累積観測時間割合と累積流砂量割合との関係
Fig.10 Relationship between cumulative observation duration rate and cumulative sediment discharge rate for data sorted in a descending order

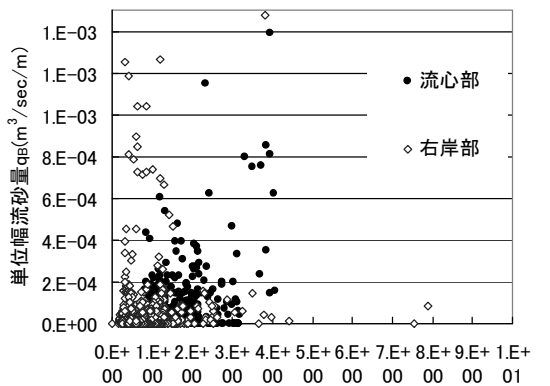


図-11 箇所別の流量と流砂量との関係(逐次値)
Fig.11 Relationship between flow and sediment discharge for each observation point (Sequential observed value)

観測箇所別の流量と流砂量との関係は、逐次値については図-11のように、事例別積算値については図-12のようになる。流量については、流心部の方が右岸部よりも逐次値平均でも積算値でも大きくなっている。観測事例においては、積算値で見た場合に流量と流砂量との間にある程度の統計的な関係を検討することができ、対数型の漸増近似曲線式を仮定した場合の式形及びその決定係数は、右岸部、流心部それぞれに対して式(3)及び式(4)のようになり、比較的類似した曲線形となる。

$$\Sigma q_{Br} = 1.17 \times \text{Ln}(\Sigma q_r) - 1.05 \times 10 \quad (R^2=4.72 \times 10^{-1}) \quad (3)$$

$$\Sigma q_{Bc} = 1.43 \times \text{Ln}(\Sigma q_c) - 1.41 \times 10 \quad (R^2=8.32 \times 10^{-1}) \quad (4)$$

ここで、対数の底は自然対数としており、添え字の r、c はそれぞれ右岸部、流心部を表す。

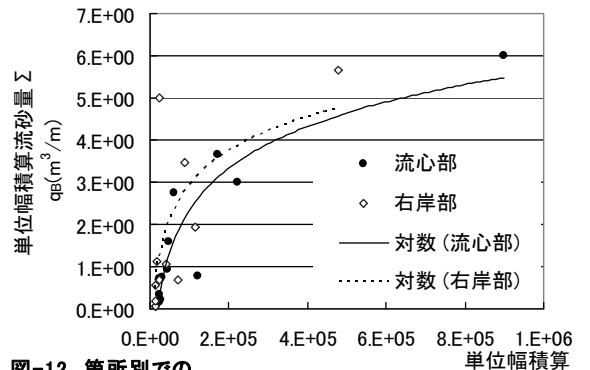


図-12 箇所別の流量と流砂量との関係(事例別積算値)
Fig.12 Relationship between flow and sediment discharge for each observation point (Summation for each observation case)

一方、観測箇所間の流砂量との関係を、逐次時系列値及び事例別積算値によって検討すると、図-13及び図-14のようになる。

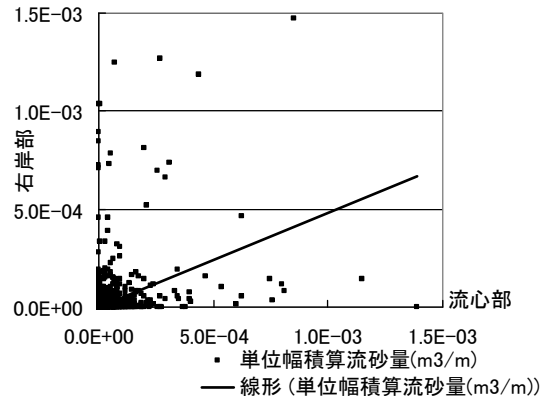


図-13 流砂量の箇所間相関図(逐次値)
Fig.13 Correlation of sediment discharges between 2 observation sites (Sequential observation value)

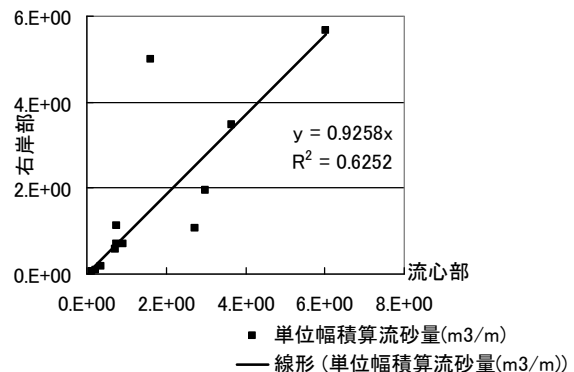


図-14 流砂量の箇所間相関図(事例積算値)
Fig.14 Correlation of sediment discharges between 2 observation sites (Summarion for each observation case)

切片をゼロとした回帰式及びその決定係数は、逐次値、事例別積算値それぞれに対して式(5)及び式(6)のようになる。

$$q_{Br} = 4.81 \times 10^{-1} \times q_{Bc} \quad (R^2 = 9.12 \times 10^{-2}) \quad (5)$$

$$\Sigma q_{Br} = 9.26 \times 10^{-1} \times \Sigma q_{Bc} \quad (R^2 = 6.25 \times 10^{-1}) \quad (6)$$

ここで、添え字の r、c はそれぞれ右岸部、流心部を表す。

事例別積算値では右岸部と流心部との間に比較的高い相関関係が現れているものの、逐次値では、有意水準 1% で t 検定しても統計的な関係は見出されない。観測対象とした同一断面内の右岸部と流心部の 2 箇所での流砂量は、離散的・集中的に発生するという流出特性、及び洪水継続時間全体で見た場合の積算値では比較的類似し、或いは近い範囲にあるものの、同一時刻の観測資料を逐次比較した場合には、共時的な相関関係は持っていないことが分かる。

観測事例別に積算した流量及び流砂量の流心部のものを右岸部のもので除した比を図-15 に示す。事例別に積算した値の比の平均値、標準偏差、及び変動係数(CV)は、流量について 1.87、 1.56×10^{-1} 、 8.33×10^{-2} 、流砂量について 1.49、 7.65×10^{-1} 、 5.14×10^{-1} となっており、流砂量の箇所間の比は、結果として流量比に近い範囲にあった。

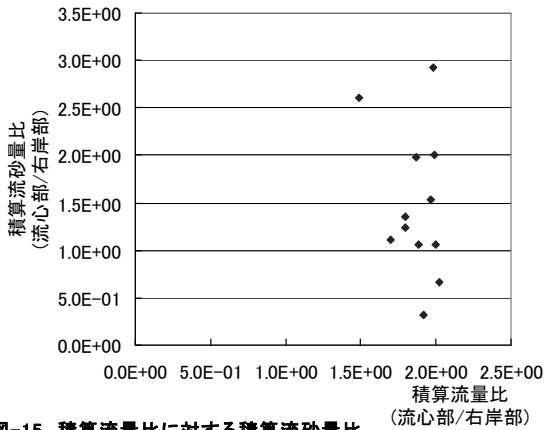


図-15 積算流量比に対する積算流砂量比
Fig.15 Relationship between aggregated flow and sediment discharge ratios

観測箇所間の流量差分と流砂量差分との関係は、逐次値の差分で見た場合には図-16 のように、事例別積算値の差分で見た場合には図-17 のようになる。流量については同一断面内であることから、同一の増減傾向を持って変動しており、一方、流砂量については同一断面内であるものの、増減傾向が同一ではないため、差分値で見た場合でも両因子の関係は現れていない。従って、時々刻々と変動し、正負が入れ替わる流心部の流砂量と右岸部の流砂量との差分は、流量差分では説明されないことが分かる。

流砂量差分の時系列において、正負の入れ替わり間隔の 2 倍の時間を流砂量集中帯である砂礫堆前縁部の通過周期と見なした場合の、12 の観測事例における頻度分布は図-18 のようになり、平均周期は約 27 分 44 秒、標準偏差は約 31 分 29 秒、変動係数 (CV) は約 1.14 となる。観測間隔が 5 分間であるため、検出されるモードは 10 分間以上のものに限られ、変動係数も大きいものの、同じ側を進行前面とす

る砂礫堆前縁部は平均的に 20 分～40 分間隔で流下している可能性が示唆される。

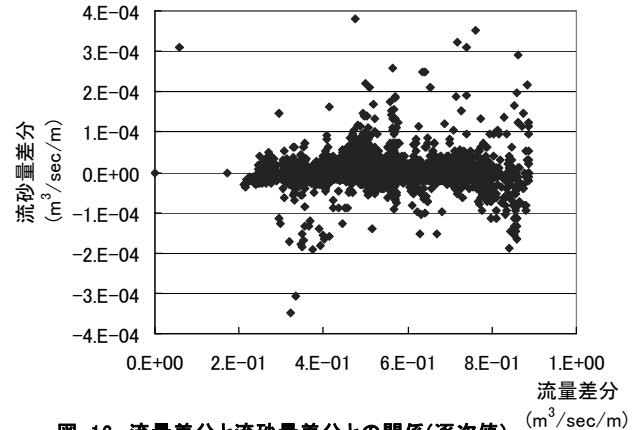


図-16 流量差分と流砂量差分との関係(逐次値)
Fig.16 Relationship between flow and sediment discharge difference at each observation point (Sequential observation value)

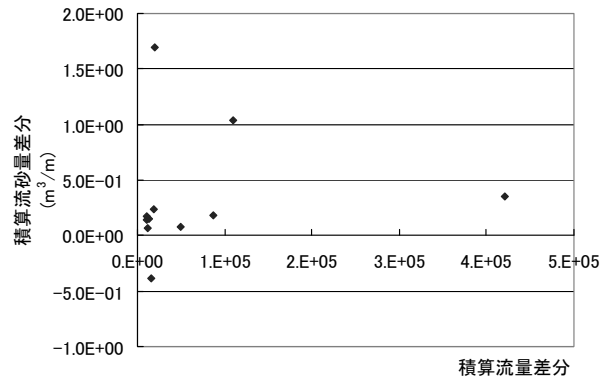


図-17 流量差分と流砂量差分との関係(事例別積算値)
Fig.17 Relationship between flow and sediment discharge difference at each observation point (Summation for each observation case)

流砂量差分の時系列に周波数分析を実施した結果を、継続時間が比較的長く、分析の安定度が比較的高いと思われる観測事例 2、3、4 について、事例別の最大スペクトル強度で規格化して、図-19 に示す。横軸を秒単位としているが、概ね 1000～2000 秒強の範囲にスペクトル(比)が大きい領域があり、周波数分析からも、平均的な通過周期は 20 分～40 分と見なせると考えられる。

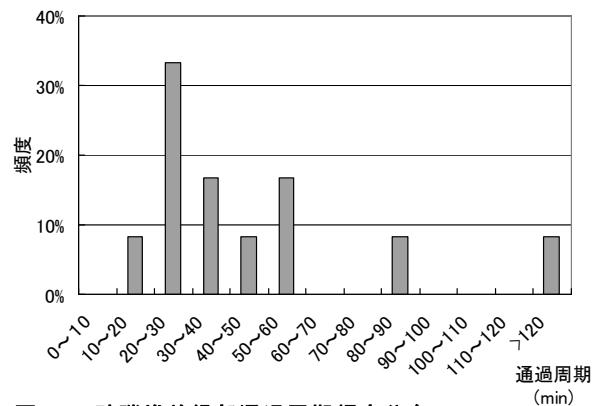


図-18 砂礫堆前縁部通過周期頻度分布
Fig.18 Frequency distribution of flowing-down periods of sand dune fronts

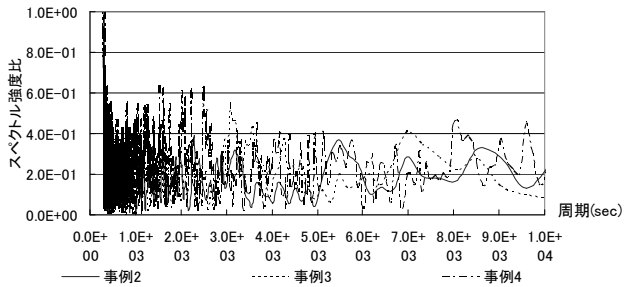


図-19 最大強度で規格化した流砂量差分の事例別周期スペクトル
 Fig.19 Normalized power spectrum of sediment discharge difference for sample cases

5. 結論

流砂現象観測の空間スケールを横断方向に拡張する手法を基礎付けるため、同一断面内の右岸部及び流心部 2 箇所でも同時観測を実施し、中小規模洪水時の 12 観測事例について、流砂量の横断方向での相違を統計的に分析した。

右岸部と流心部とでは観測柵中心は約 12.5m 離れているものの、各観測事例の合計流砂量の 80%が、いずれの観測箇所においても洪水継続時間の約 1/6 の時間に発生しており、土砂流出特性は類似していた。

流量と流砂量との関係を、逐次値自体、観測事例別積算値、観測事例別積算値の流量・流砂量ごとの箇所間比、逐次値差分、及び観測事例別積算値の箇所間差分について検討した。観測事例別積算値については、箇所間比平均が流量積算値の 1.87 に対し、流砂量積算値は 1.49 となる等、緩やかな統計的関係が見られたが、それ以外はばらつきが大きく、統計的関係もほとんど見られなかった。観測事例別積算値の箇所間比では、流砂量比が 1~2 倍を中心にばらついており、流量比に近い範囲にあったことから、単位幅断面の流砂量を全断面の流砂量へ変換する場合に、流量比は 1 つの目安になると考えられた。

流心部の流砂量から右岸部のものを差し引いて得られる流砂量差分値の逐次時系列を分析することにより、変動幅は大きいものの、観測事例について、流砂量集中帯である砂礫堆前縁部が同じ側を前面として進行する際の通過周期は、20 分~40 分(平均約 27 分 44 秒)と算出された。右岸部と流心部とでは流砂量の増減は共時的ではなく、寧ろ時間的に位相差を持って発生していることが分かった。

同一断面内 2 箇所の流砂量の定量的な比較は、今後更に事例を蓄積し、より精密に進める必要がある。また、砂礫堆前縁部の通過周期については、直接観測よりも時定数を短くできる間接観測を併用し、直接法と間接法の同時観測資料の比較検討を進めることが有効であると考えられる。

謝辞

本稿で使用した流量及び流砂量等の土砂水理関連観測資料は北陸地方整備局湯沢砂防事務所より提供頂いた。流砂量の調査解析にあたっては、京都大学大学院農学研究科水山高久教授に助言を頂いた。ここに深く感謝申し上げます。

引用文献

American Society of Civil Engineers (1975): Sedimentation Engineering, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice-No.54, p.190-230
 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, 26-29
 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
 Bunte, Kristin, Abt, Steven R., Potyondy, John P., and Ryan, Sandra E. (2004): Measurement of coarse gravel and cobble transport using portable bedload traps, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.130, No.9, p.879-893
 土木学会(1999): 水理公式集 [平成 11 年版], 社団法人土木学会, p.159-166
 Georgiev, B.V. (1990): Reliability of bed load measurements in mountain rivers, Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990, IAHS Publ no. 193, 1990, p.263-270
 Gomez, Basil (1991): Bedload transport, Earth-Science Reviews, 31 (1991) p.89-132
 Habersack, H.M., Nachtnebel, H. P., and Laronne, J.B.(2001): The continuous measurement of bedload discharge in a large alpine gravel bed river, Journal of Hydraulic Research, Vol. 39, No.2, p.125-133
 Habersack, Helmut M. and Laronne, Jonathan B. (2002): Evaluation and improvement of bed load discharge formulas based on Helley-Smith sampling in an Alpine gravel bed river, Journal of Hydraulic Engineering, May 2002, p.484-499
 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
 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
 菊山宗弘(2002): 実験科学の方法, (財)放送大学教育振興会, p.93-94
 中谷洋明・鶴田謙次・吉村暢也(2007): 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, 砂防学会誌(新砂防), Vol.60, No.3, p.25-30
 中谷洋明(2008): 北陸地方における間接法推定流砂量と年堆砂資料の比較分析, 砂防学会誌(新砂防), Vol.61, No.3,

pp.3-14

中谷洋明(2008) : ハイドロフォンパルスに対する流量の影響に関する事例検討, 砂防学会誌(新砂防), Vol.61, No.4,

pp.12-20

中谷洋明(2009) : ハイドロフォン観測による小規模出水時の流砂量の統計解析, 砂防学会誌(新砂防) , Vol.61, No.5,

pp.4-11

中谷洋明(2009) : 洪水時の砂防堰堤群区間における流下土砂の事例分析, 砂防学会誌(新砂防) , Vol.61, No.6, pp.11-18

Rickenmann, D. and McArdell, B. W. (2007): Continuous measurement of sediment transport in the Erlenbach stream using piezoelectric bedload impact sensors, *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, pp.1362-1378

Rickenmann, D. and McArdell, B. W. (2008): Calibration of piezoelectric bedload impact sensors in the Pitzbach mountain stream, *Geodinamica Acta*, 21/1-2, pp.35-52