

ISSN 1346-7328
国総研資料 第887号
平成28年 3月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.887

March 2016

近年の山地河川における流砂水文観測

桜井 亘・内田 太郎・田中 健貴・井内 拓馬・蒲原潤一

Recent advances in sediment discharge and hydrological observation
at mountain rivers of Japan

Wataru SAKURAI, Taro UCHIDA, Yasutaka TANAKA, Takuma IUCHI, Jun-ichi KAMBARA

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

近年の山地河川における流砂水文観測

桜井 亘* 内田太郎** 田中 健貴** 井内 拓馬** 蒲原 潤一***

Recent advances in sediment discharge and hydrological observation at mountain rivers of Japan

Wataru SAKURAI*, Taro UCHIDA**, Yasutaka TANAKA**, Takuma IUCHI**
Jun-ichi KAMBARA ***

概要

本資料は、全国の直轄砂防事務所を中心に実施された山地河川における流砂水文観測のうち、近年のハイドロフォン、濁度計を用いた流砂観測により得られた成果及び全国のデータを収集・整理した結果についてとりまとめたものである。

キーワード 流砂水文観測, 山地河川, ハイドロフォン, 濁度計

Synopsis

Here we synthesized recent advances in sediment discharge and hydrological observation at mountain rivers. We focused sediment discharge data measured by hydrophone (Japanese pipe geophone) and turbidity meter. These observation was conducted by Sabo offices of MLIT

Key Words; sediment discharge and hydrological observation, mountain river, hydrophone (Japanese pipe geophone), turbidity meter.

*土砂災害研究部 砂防研究室長 Head, SABO Planning Division, SABO Department

**土砂災害研究部 砂防研究室 SABO Planning Division, SABO Department

***前 土砂災害研究部 砂防研究室長 (長野県砂防課) Former Head, SABO Planning Division, SABO Department (SABO Department of Nagano Prefecture)

近年の山地河川における流砂水文観測

目 次

1. はじめに	1
2. 各直轄事務所における分析結果の概要	3
2.1 六甲山地での観測事例	3
2.2 姫川・梓川流域での観測事例	7
2.3 天竜川流域与田切川での観測事例	9
2.4 富士川流域での観測事例	12
2.5 魚野川流域での観測事例	14
2.6 常願寺川流域での観測事例	16
2.7 鬼怒川流域大谷川での観測事例	18
2.8 揖斐川水系坂内川における観測事例	20
2.9 利根川上流域における観測事例	22
3. 全国的なデータ整理・分析の事例	24
3.1 濁度計の観測結果に関する分析	28
3.2 ハイドロフォンを用いた観測結果に関する分析（1）	30
3.3 ハイドロフォンを用いた観測結果に関する分析（2）	34
4. 観測技術の課題	38
4.1 濁度計による浮遊砂観測の課題	38
4.2 ハイドロフォンによる掃流砂観測の課題	44
5. おわりに	51

1. はじめに

山地河川における流砂水文観測は、砂防基本計画の精度向上、総合的な土砂管理の推進、国土保全のための流域監視のために重要である。しかしながら、山地河川においては、河床変動が激しい、大粒径から細粒分まで幅広い粒径の流砂が混在する、電源の確保等観測に必要なインフラの整備に多くの労力・費用がかかるなど、観測にあたって多くの困難を伴う。そのため、1970年代から砂防堰堤等の堆砂測量結果から流砂量を推定する試み¹⁾や出水時の直接採水により浮遊砂量を推定する試み²⁾など行われてきているものの、連続的に流砂量を観測した事例は必ずしも多くなかった。

山地河川において、直接的に流砂観測を行うのは容易ではなく、多大な労力・予算を必要とする場合が少なくない^{3),4)}。そこで、以前より直接的な観測と平行して、間接的に流砂量を推定する手法について研究・技術開発が進められてきている⁵⁾。国内でも、掃流砂に関して、ハイドロフォンを用いた間接的な手法が提案され、様々な技術開発が行われてきた⁶⁾。また、濁度計を用いた浮遊土砂の連続観測も実施されてきた⁷⁾。これらの技術的な進歩を踏まえて、平成24年に改訂された河川砂防技術基準（調査編）⁸⁾では、流砂観測を実施し、流砂量年表をとりまとめることとなっており、全国的に直轄砂防事務所において流砂観測が進められている。

一方、国土技術政策総合研究所では、平成24年3月に「山地河道における流砂水文観測の手引き（案）」⁹⁾を作成した。濁度計を用いた観測については、「山地河道の流砂水文観測における濁度計観測実施マニュアル（案）」¹⁰⁾を寒地土木研究所と共同で作成した。さらに、ハイドロフォンを用いた掃流砂量の観測手法の検討やデータベースシステム及び流砂観測現地演算システムの開発を行い、山地河川における流砂水文観測の技術的な支援を行ってきた。

以上のような背景の中、全国の直轄砂防事務所でも、多くの流砂水文観測が行われ、数多くのデータが蓄積されてきた。その結果、近年、数多くの山地流域の流砂の実態、観測手法の課題と解決策に関する検討がなされ、成果が蓄積されてきた。そこで本資料では、近年の直轄砂防事務所による流砂水文観測の成果を1つにとりまとめることにより、現在全国的に実施されている山地流域における流砂水文観測をより効果的に進め、データの利活用の推進を図ることを目的としてとりまとめた。

本資料の構成は以下の通りである。まず、2章において、代表的な流域における観測の概要について紹介する。そして、3章で全国的なデータを取りまとめ、4章において、観測における課題について取りまとめている。

【参考文献】

- 1) 例えば、大久保駿（1970）：流出土砂量について－従来の研究の紹介－，土木技術資料，12(7)，350-355.
- 2) 例えば、渡辺正幸・水山高久（1981）：建設省技術研究会指定課題「砂防河川の土砂動態に関する研究」資料集（I），土木研究所資料 第1692号
- 3) 近藤玲次・栢木敏仁・安田勇次・土屋 智（2008）：流砂の実態把握を目的とした安倍川上流大谷川支流における洪水時全流砂量観測，砂防学会誌，60(5)，15-22.
- 4) 伊藤仁志・矢澤聖一・石田勝志・山下伸太郎・佐光洋一・高橋健太・水山高久（2009）：天竜川水系と田切川における流砂計測，砂防学会誌，61(6)，19-26.
- 5) 例えば，Gray, J.R., Laronne, J.B. Marr, J.D.G. (2010): Bedload-surrogate monitoring technologies. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5091.
- 6) 例えば，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，49(4)，34-37.
- 7) 例えば，藤田正治・澤田豊明・水山高久（2003）：山地小流域における土砂動態のモニタリング手法，京都大学防災研究所年報，46(B)，34-37.
- 8) 河川砂防技術基準（調査編）（平成24年）
- 9) 山地河道の流砂水文観測の手引き（案），国土技術政策総合研究所資料 第686号（平成24年）
- 10) 山地河道の流砂水文観測における濁度計観測実施マニュアル（案），国土技術政策総合研究所資料 第792号（平成26年）

2.各直轄事務所における分析結果の概要

ここでは、概ね過去 5 年程度の間に報告された直轄砂防事務所等による流砂観測の代表的な成果をレビューする。

2.1 六甲山地での観測事例

1) 概要

六甲山地においては、2003 年から住吉川においてハイドロフォン、土砂捕捉ピット、濁度計、水位計を用いて流砂量観測が行われてきた。さらに、近年、10 溪流を対象に出水時にバケツによる表面採水を行うなど多くの流砂水文観測を行っている¹⁾。

2) 横断的な直接採水による浮遊砂観測

六甲山系の 10 溪流を対象に出水時にバケツによる表面採水が実施され、浮遊砂量が求められてきた。田村ら (2014b) はこのデータを分析し、浮遊砂量は流量の 2 乗に比例する関係があり、下流河川における観測結果と比べて同じ流量のとき 1~3 オーダー程度浮遊砂量が多いことを示した (図 2.1.1)²⁾。さらに、同じ六甲山地であっても、溪流によっては同じ流量のとき浮遊砂量が 1 オーダー程度異なることを示した (図 2.1.1)²⁾。一方、1 つの流域の出水による違いは比較的小さく、同じ流量のとき浮遊砂量の違いは 1 オーダー以下であった (図 2.1.2)²⁾。

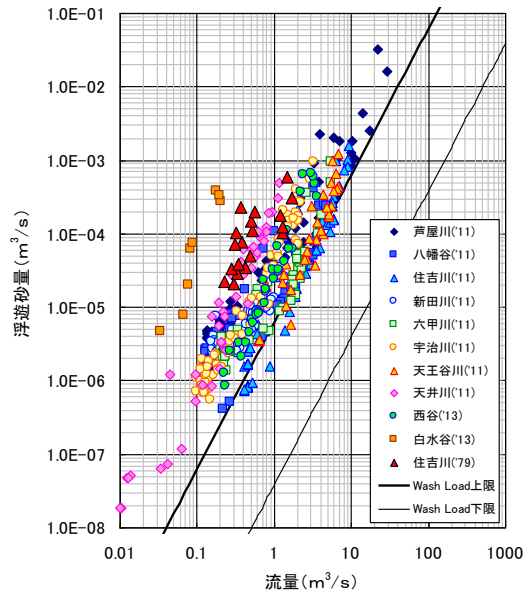


図 2.1.1 六甲山地における流量と浮遊土砂の関係²⁾

図中の実線は水理公式集から引用

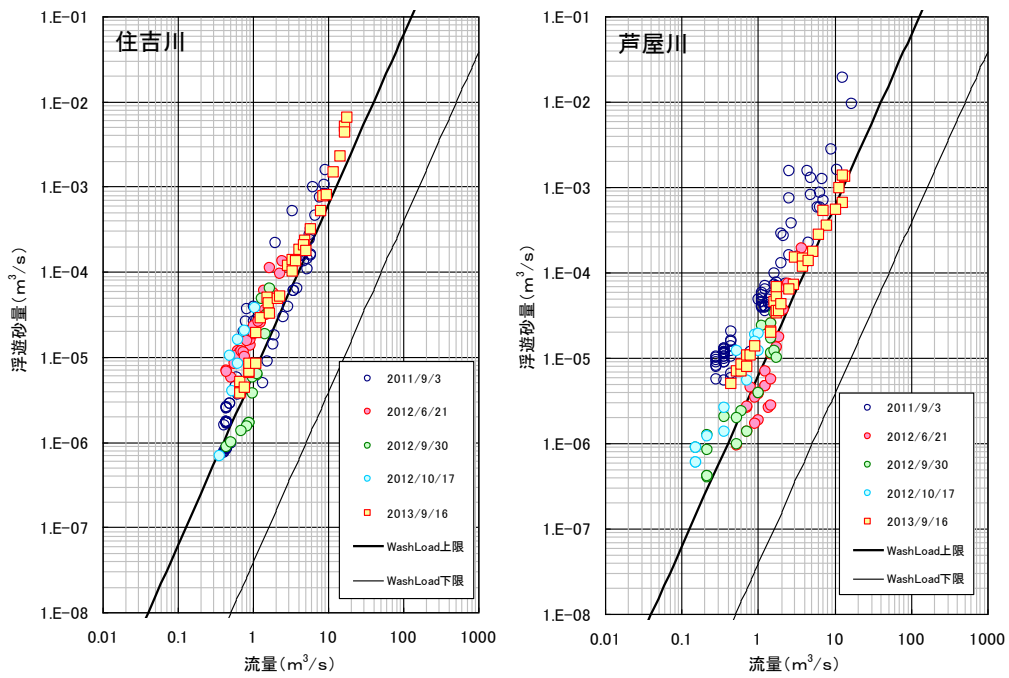


図 2.1.2 住吉川・芦屋川における流量と浮遊砂量の関係²⁾

図中の実線は水理公式集から引用

3) 年間の流出土砂量の推定

田村ら（2015a）は前項で示した流量と浮遊砂量の関係、またハイドロフォンによる観測結果を基に流域からの年間の流出土砂量の推定を行った⁴⁾。その結果、森林流域では浮遊砂量は10～60m³/km²/y、掃流砂量は10～30m³/km²/yと推計した（表2.1.1）³⁾。一方、裸地が広がる荒廃流域である白水谷流域では浮遊砂量は約2,200m³/km²/y、掃流砂量は約8,700m³/km²/yと推計した。明治期には六甲山地は現在の白水谷同様広い範囲ではげ山であったとされている。そこで、田村ら（2015a）は、近年の白水谷における流砂量は明治期の六甲山の流砂量に近いと考え、明治期の六甲山の年間の流砂量は現在に比べて大きな災害がない年では、年間あたり2オーダー程度大きいと考えた³⁾。

さらに、田村ら（2015a）は森林流域の1つである住吉川で1979年に実施された浮遊砂観測結果に基づき、当時の年間の浮遊砂量は今より約5倍大きい230m³/km²/yであったと推定した。

表 2.1.1 六甲山系の比年間流砂量の推定結果³⁾

想定年代	流域		観測所名	流域面積 (km ²)	計測年 平均	比年間通過流砂量		
						浮遊砂量 (m ³ /km ² /y)	掃流砂量 (m ³ /km ² /y)	全流砂量 (m ³ /km ² /y)
明治期 (はげ山の時代)	山間部	船坂川	白水谷	0.252	2013(H25)	3,230	4,369	7,599
					2014(H26)	1,091	13,012	14,103
					平均	2,161	8,690	10,851
S13年災時	六甲山系全域		—	—	平均	—	—	35,600
S36年災時	六甲山系全域		—	—	平均	—	—	2,200
S42年災時	六甲山系全域		—	—	平均	—	—	15,000
S54年当時	住吉川流域		—	—	平均	238	—	—
現在 (H25-H26)	山間部	住吉川	西滝ヶ谷	1.484	2012(H24)	46	10	57
					2013(H25)	5	18	23
					2014(H26)	8	—	—
					平均	30	20	49
	下流部	芦屋川	河原毛	6.895	2013(H25)	9	38	47
					2014(H26)	26	13	40
					平均	17	26	43
		住吉川 本流	大谷	7.440	2013(H25)	29	7	36
					2014(H26)	52	7	59
					平均	40	7	48
		住吉川 支流	安場	3.449	2013(H25)	21	16	36
					2014(H26)	20	17	37
					平均	20	16	37
		六甲川	大土	4.171	2013(H25)	22	7	29
					2014(H26)	23	14	37
平均	23				10	33		
宇治川	宇治川	2.978	2013(H25)	55	11	66		
			2014(H26)	56	12	69		
			平均	56	12	67		
平均					31	15	46	

4) 比較的規模の大きい出水時の浮遊砂特性

2014年8月の台風11号時には住吉川、六甲川の上流域で表層崩壊が発生した。田村ら(2015b)は両河川の流量と浮遊砂量の関係が過去の別の出水と異なり、住吉川では、ある流量から浮遊砂量が高くなり、六甲川では流量の2.6乗で比例したことを示した(図2.1.3)⁴⁾。しかし、推定される崩壊発生時刻とほぼ同時ないしはそれ以前に住吉川では浮遊砂量の急増が観測されたことから、住吉川での浮遊砂量の急増は上流域で発生した表層崩壊の影響ではなく、アーマコートの破壊、斜面からの地表面流の流入等による土砂流出の可能性が考えられるとした⁴⁾。

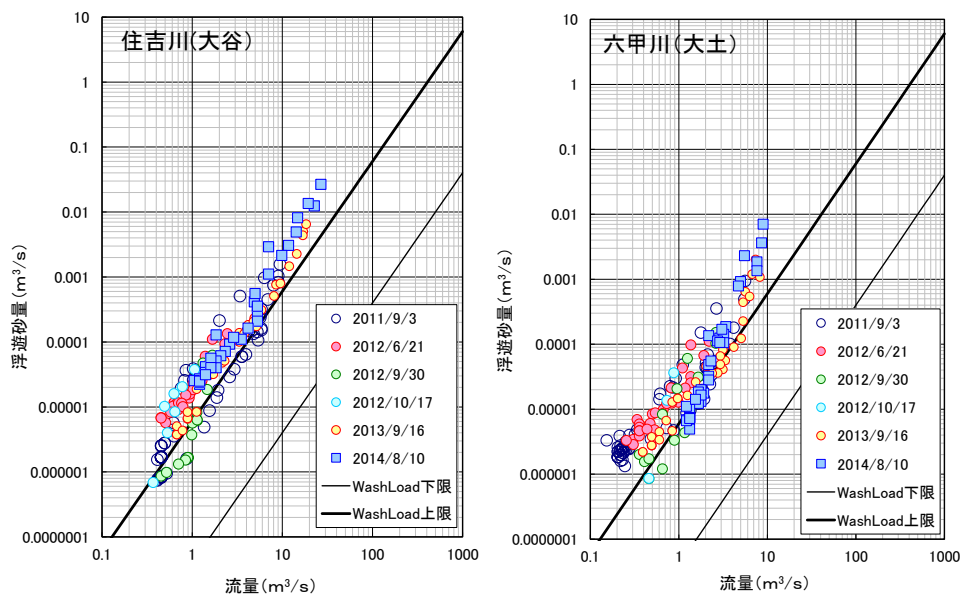


図 2.1.3 住吉川・六甲川における規模の大きい出水時の流量と浮遊砂量の関係⁴⁾
 図中の実線は水理公式集からの引用

【参考文献】

- 1) 田村圭司・内田太郎・森東哲郎・日野健・小菅尉多・木下篤彦(2014a): 六甲山系における水文・流砂観測, 砂防学会誌, 66(6), 82-86.
- 2) 田村圭司・日野健・内田太郎・水山高久・小杉賢一朗・小菅尉多・永田葉子(2014b): 六甲山系の浮遊砂の特徴, 平成26年度砂防学会研究発表会概要集, A144-A145.
- 3) 田村圭司・久保正和・内田太郎・水山高久・小杉賢一朗・小菅尉多・永田葉子(2015a): 六甲山系の流砂観測と土砂流出の変遷, 平成27年度砂防学会研究発表会概要集, B300-B301.
- 4) 田村圭司・久保正和・内田太郎・水山高久・小杉賢一朗・小菅尉多・永田葉子(2015b): 六甲山系における比較的大きな出水時の浮遊砂の特徴, 平成27年度砂防学会研究発表会概要集, B296-B297.

2.2 姫川・梓川流域での観測事例

1) 概要

姫川流域及び梓川流域ではハイドロフォン、濁度計を用いた流砂観測が行われてきた¹⁾。特に、姫川支川の平川流域内の源太郎砂防堰堤では、横断方向にハイドロフォンを3基設置し、集中的な観測、現地実験が行われてきた。

2) 濁度計による浮遊砂観測

城ヶ崎ら（2015）は濁度計を用いた観測から流量と浮遊砂量との関係を分析した（図 2.2.1）²⁾。その結果、いずれの観測所においても流量の2乗に浮遊砂量が概ね比例する関係が確認された。また、いずれの箇所も下流河川における観測結果と比べて同じ流量のとき、浮遊砂量が大きかったことが示された。これらの結果は六甲山地におけるバケツ採水により求められた結果（2.1 参照）や全国的な濁度計の分析結果（3.参照）、魚野川の観測結果（2.5 参照）と一致するものである。

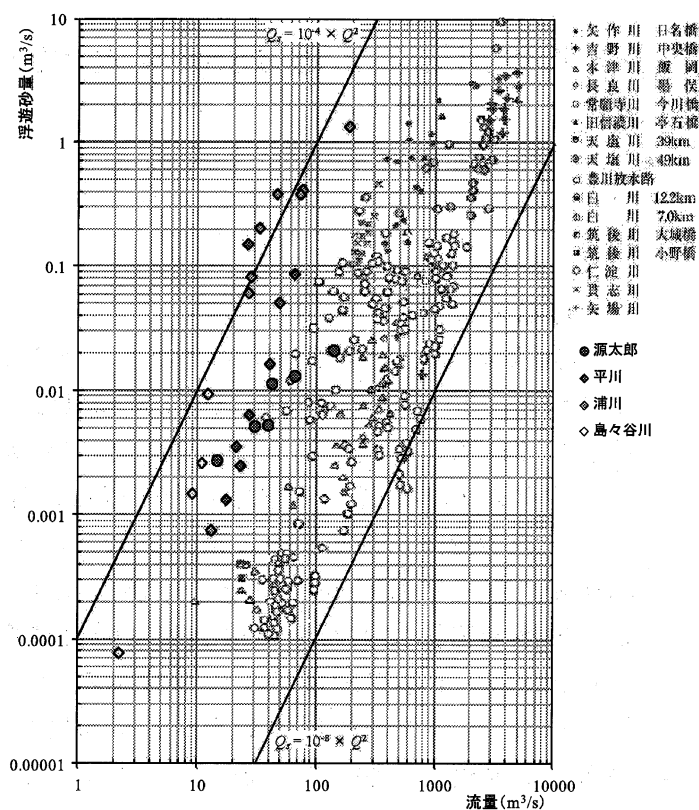


図 2.2.1 姫川流域および梓川流域における流量と浮遊砂量の関係²⁾
 姫川流域及び梓川流域以外のデータは水理公式集より引用

3) 横断方向の掃流砂の分布

源太郎砂防堰堤では、水通し幅が 68m ある堰堤の天端において、横断方向に右岸、中央、左岸の 3 箇所でハイドロフォンによる観測が行われている¹⁾。判田ら (2013) は、2011 年 6 月の出水 (最大日雨量 108mm) では掃流砂が横断方向に均一ではなく、片側に集中するような現象が発生していたこと、流砂の集中する場所は 1 出水期間中でも左右に変動したことを示した (図 2.2.2)²⁾。さらに、同様の横断方向の流砂量の違いは、2014 年の 8 月の出水 (総雨量 81mm) でも確認された²⁾。

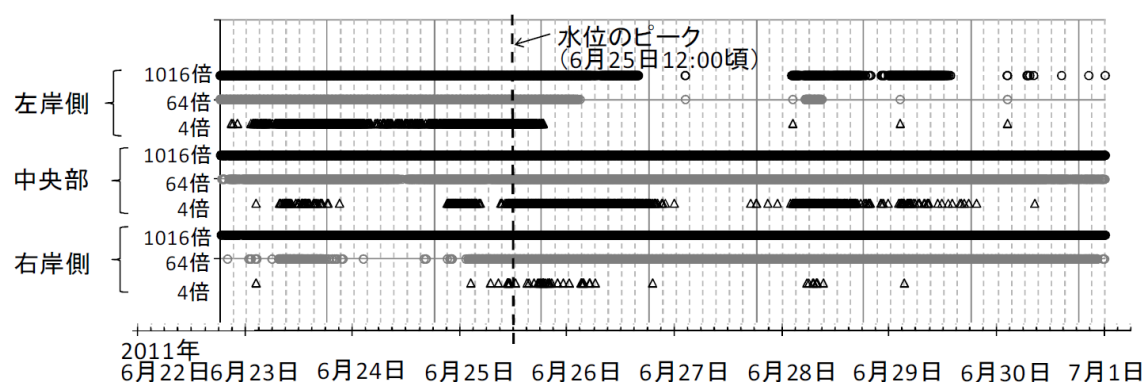


図 2.2.2 源太郎砂防堰堤における増幅率ごとのハイドロフォンパルスの関係
(2011 年 6 月 22 日～30 日の出水)²⁾

【参考文献】

- 1) 判田乾一・地中浩・石川一栄・宮澤和久 (2013) : 姫川流域における土砂移動モニタリング, 砂防学会誌, 66(2), 74-78.
- 2) 城ヶ崎正人・渡辺剛・廣瀬昌宏・伊藤元洋・田方智・後藤健・伊藤隆郭 (2015) : 平川源太郎堰堤を対象とした流出流砂量の経年観測, 平成 27 度砂防学会研究発表会概要集, A140-141.
- 3) 野村昌宏・吉田俊康・判田乾一・水山高久・田方智・長山孝彦・後藤健・伊藤隆郭 (2012) : 平川・源太郎堰堤における流水・流砂観測 (2011 年 6 月出水を対象として), 平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集, 688-689.

2.3 天竜川水系与田切川流域での観測事例

1) 概要

天竜川の支川与田切川流域に位置する坊主平砂防堰堤では、ハイドロフォン等を用いた観測に加え、掃流砂・浮遊砂が採取可能な大規模な土砂採取装置による観測が行われてきた¹⁾。

2) 濁度計による上流域の土砂生産発生検知

与田切川は上流域にオンボロ沢と呼ばれる大規模な荒廢地を抱えており、オンボロ沢では比較的高い頻度で土石流が発生する。蒲原ら(2012)はオンボロ沢で顕著な土砂流出が発生した出水では、土砂流出が発生しなかった出水に比べて、水位が同程度である場合、坊主平砂防堰堤(オンボロ沢出口から下流に6.4km)で体積土砂濃度が高くなることを示した(図2.3.1)²⁾。さらに、濁度/水位比が概ね0.4を境に土石流の発生の有無が概ね分離できることを示し(図2.3.2)²⁾、流域下流の濁度観測により上流の土砂流出の発生の有無が概ね把握できることを示した。また、天竜川本川の宮ヶ瀬観測所でも濁度の上昇は確認された(図2.3.3)²⁾。

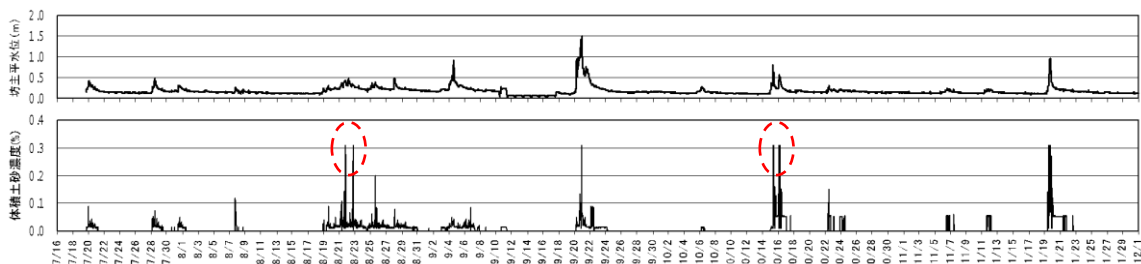


図 2.3.1 坊主平砂防堰堤における濁度と水位の連続観測結果²⁾

赤丸(破線)がオンボロ沢で土石流が発生したことによると考えられる体積土砂濃度の上昇

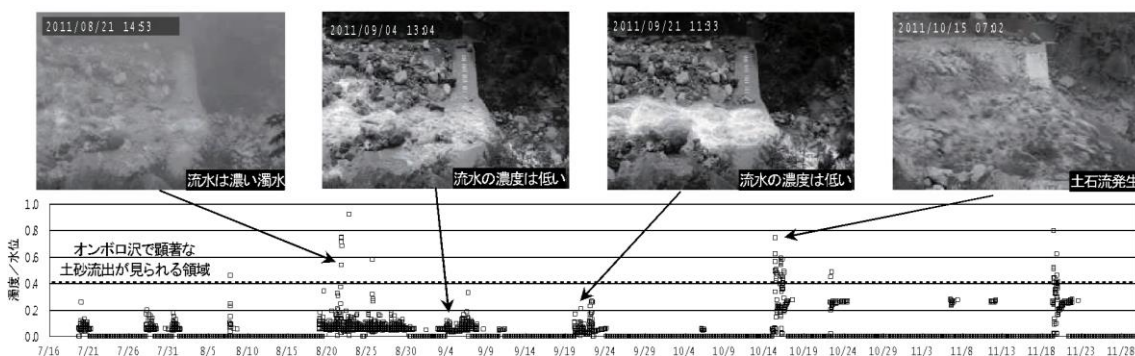


図 2.3.2 坊主平砂防堰堤における濁度/水位の連続観測結果とオンボロ沢における土石流発生状況²⁾

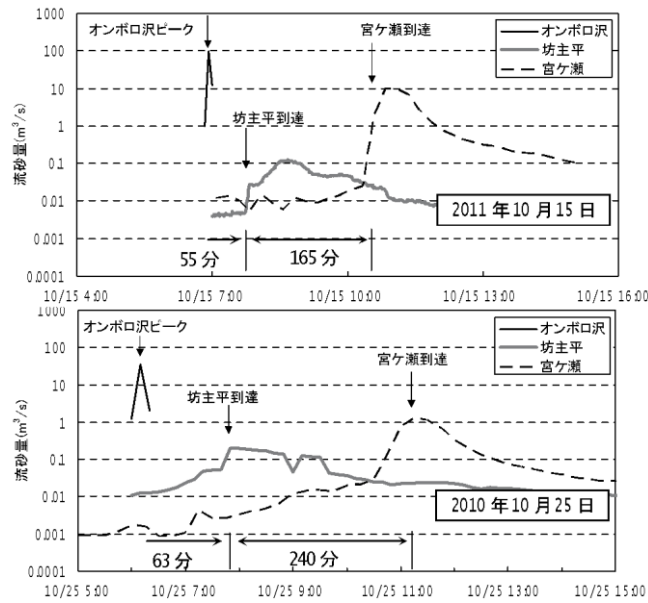


図 2.3.3 坊主平砂防堰堤, 宮ヶ瀬観測所における浮遊砂量の変化²⁾

3) 上流域の土砂生産にともなう流砂特性の変化

草野ら (2011) はオンボロ沢で土石流が発生した後の一定期間 (1~2 年程度) は, 同じ水位であっても発生前に比べて流砂量が 1~2 オーダー上昇したことを大規模な土砂採取装置による観測から示した (図 3.1.3.4)¹⁾。土石流発生後, 掃流砂の多い状態が続く期間の長短は, 土石流発生後の降雨状況の影響を強く受けていたことも示した。すなわち, 草野ら (2011) は土石流発生後に大出水がない場合, 土石流による土砂は短期間では流出せず, 掃流砂の多い状態が長期間継続したと考えられるとした。

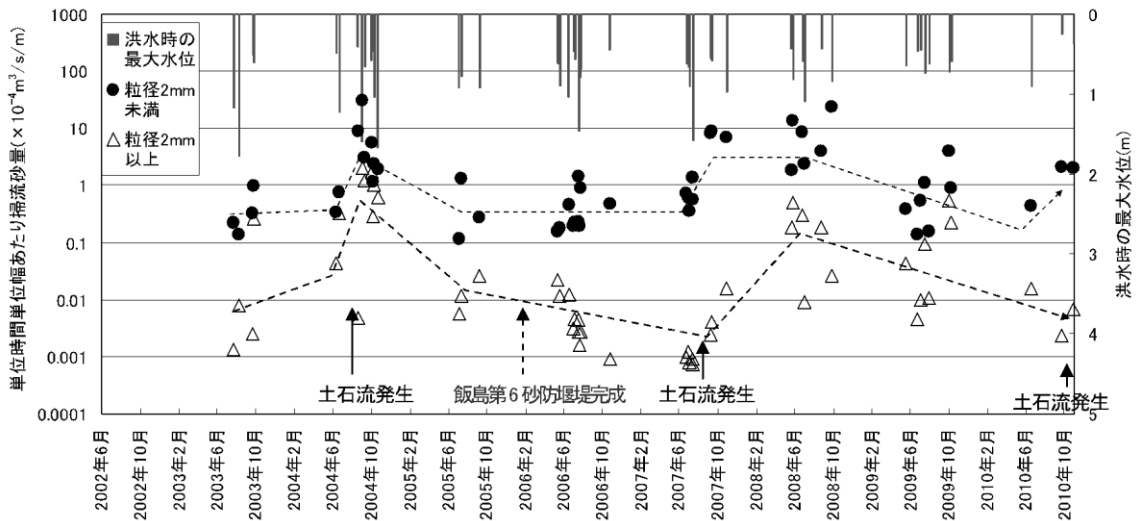


図 2.3.4 坊主平砂防堰堤における水位 0.4~0.6m の際の掃流砂量の経年変化¹⁾

【参考文献】

- 1) 草野慎一・中島一郎・福本晃久・山下伸太郎・高橋健太・梅村裕也・江口友章（2011）：
天竜川水系与田切川流域における土砂動態観測，砂防学会誌，63(6)，71-74.
- 2) 蒲原潤一・中島一郎・福本晃久・玉置和基・山下伸太郎・内柴良和・家田泰弘・佐伯響
一・梅村裕也・江口友章（2012）：天竜川水系与田切川における土砂移動特性に関する
考察，平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集，300-301.

2.4 富士川流域での観測事例

1) 概要

富士川流域では、支川である大武川や濁川など、9箇所でハイドロフォン、濁度計による流砂観測が行われてきた。大武川などではハイドロフォン、濁度計による流砂観測に加えて、土砂捕捉ピットや直接採水により集中的な観測が行われてきた¹⁾。

2) 上流域の土砂生産にともなう掃流砂特性の変化

富士川流域においては2011年の台風12号、15号による大規模な出水が発生した。大武川流域では、通常は水深の増減に従い掃流砂量は変動する(図2.4.1a)が、2011年台風12号(9月1日)による出水期間中に水深(掃流力)一流砂量関係が変化し、同程度の水深であっても、流砂量が出水後半では出水前半に比べて大きくなったことが観測された(図2.4.1b)¹⁾。

また、2011年の台風12号、15号による出水前に比べて、同じ水深であっても流砂量の多い傾向が台風12号による出水後も継続してみられ、出水後概ね1年かけて徐々に掃流力一流砂量関係は元の出水前の状態に戻っていくことがハイドロフォンによる観測から確認された(図2.4.2)²⁾。これは、天竜川水系与田切川における観測結果と一致した結果である(2.3参照)。

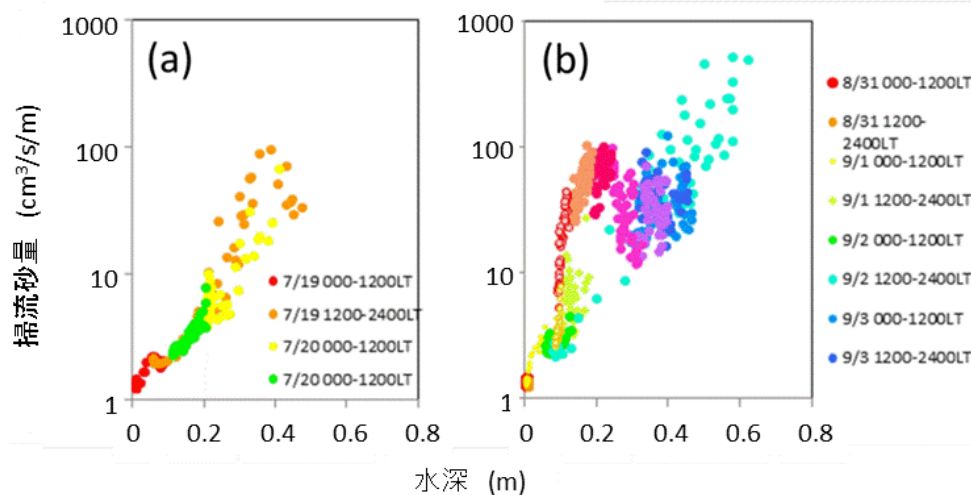


図 2.4.1 大武川第 50 床固における水深と掃流砂量の関係
(富士川砂防事務所取得データを基に作成)

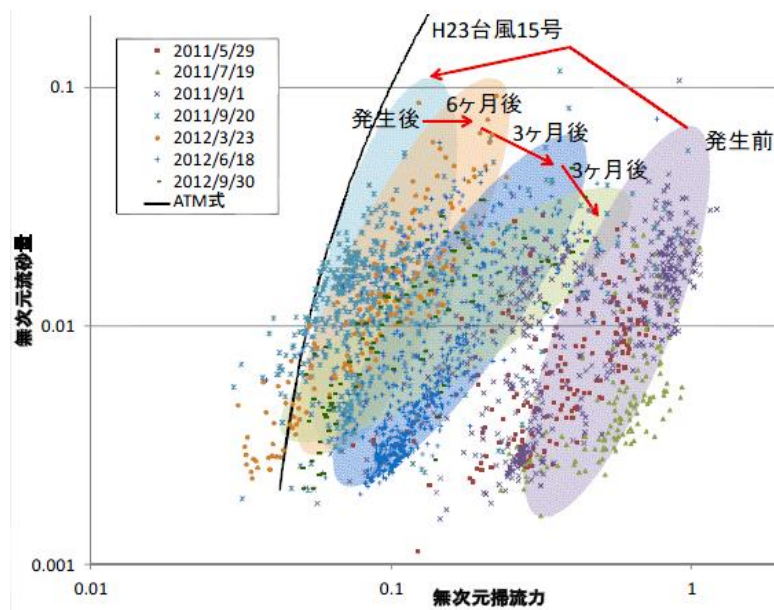


図 2.4.2 大武川第 50 床固における無次元掃流力と無次元掃流量の関係の変化²⁾

【参考文献】

- 1) 光永健男・守谷武史・内田太郎・富田邦裕・叶正興（2015）：富士川砂防事務所管内における流砂量観測，砂防学会誌，68(1)，83-87.
- 2) 鈴木拓郎・小林拓也・吉田圭佐・菊井稔宏・内田太郎・神野忠広（2014）：流砂観測データに基づいた流量と流砂量関係の分析および河床変動計算手法の検討，平成 26 年度砂防学会研究発表会概要集，A122-A123.

2.5 魚野川流域での観測事例

1) 概要

魚野川流域では、本川上流域に加え、芋川、登川流域でハイドロフォン、濁度計等による流砂水文観測が実施されてきている。本川上流域ではハイドロフォンと観測ピットを用いた観測が2004年以降継続的に実施され、ハイドロフォンデータの流砂量の変換方法などの検討が進められてきた¹⁾。

2) 濁度計による浮遊砂観測

越智ら(2015)は、濁度計を用いた観測から流量と浮遊砂量の関係进行分析した(図2.5.1)²⁾。その結果、登川流域内の2観測所(登川水位観測所、清水下流防堰堤)および芋川流域内の観測所(竜光遊砂地下流)のいずれにおいても流量の2乗に浮遊砂量が概ね比例する関係が確認された。また、いずれの箇所も下流河川における観測結果と比べて、同じ流量でも1~2オーダー程度大きいことが示された。これらの結果は六甲山地におけるバケツ採水により求められた結果(2.1参照)や全国的な濁度計の分析結果(3.参照)、姫川・梓川の観測結果(2.2参照)と一致するものである。

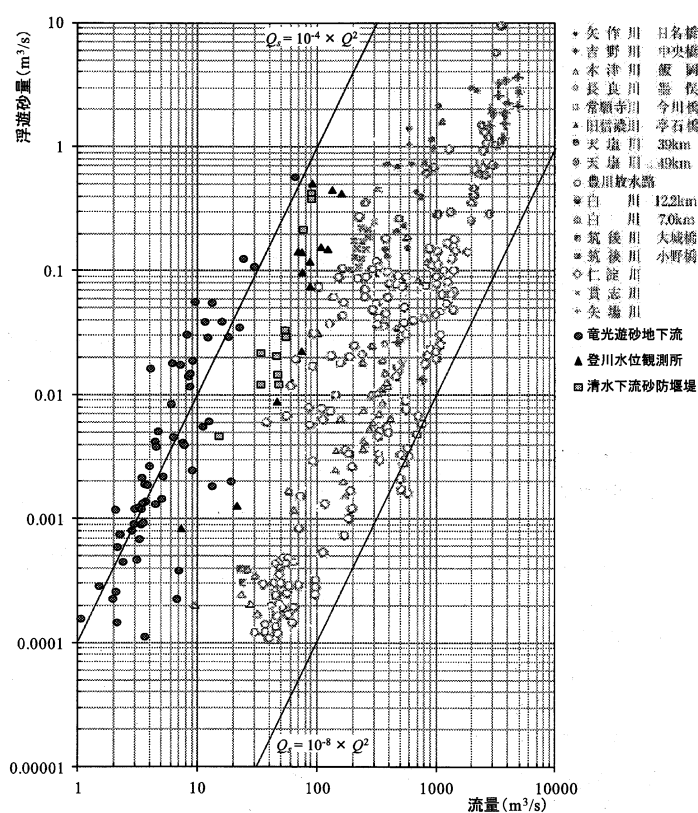


図 2.5.1 魚野川流域における流量と浮遊砂量の関係²⁾
魚野川流域以外のデータは水理公式集より引用

3) 土砂生産にともなう掃流砂特性の経年変化

越智ら（2015）は、魚野川本川上流の大野原橋における 2004 年以降のハイドロフォンから求めた掃流砂量の整理を行った（図 2.5.2）²⁾。その結果、流量—掃流砂量関係が年々変動することを確認した。また、魚野川では 2004 年に中越地震による土砂生産、2011 年に新潟福島豪雨による土砂生産があったが、掃流砂量は土砂生産の直後には顕著な増加は見られなかった。一方、土砂生産から 3～4 年後の 2008 年及び 2014 年に掃流砂量が大きくなる傾向が観測された。越智ら（2015）は、過去の土砂生産の履歴の影響を掃流砂量が受けていると結論づけている。

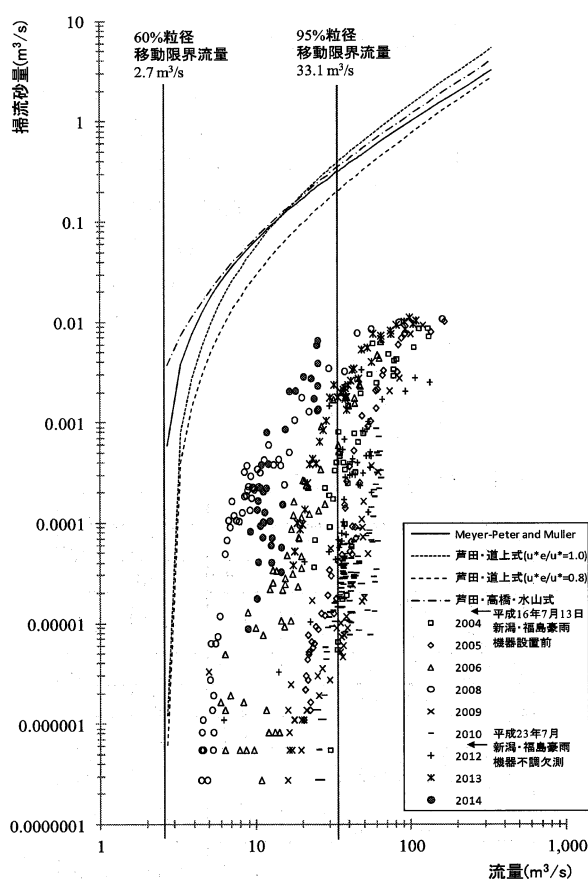


図 2.5.2 魚野川流域大野原橋観測所の流量と掃流砂量の関係²⁾

【参考文献】

- 1) 例えば、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，61(3)，3-14.
- 2) 越智英人・平田 遼・福島将史・宮本 歩・田方 智・後藤 健・伊藤隆郭（2015）：大野原橋観測所における掃流砂観測の経年変化，平成 27 年度砂防学会概要集，A138-A139.

2.6 常願寺川流域での観測事例

1) 概要

常願寺川流域においては、上下流の複数の箇所ではドロフォン、濁度計等を用いた流砂観測が行われている。特に、津之浦下流砂防堰堤においてはドロフォンおよび水位計を用いた観測が2001年6月より長期間継続して行われてきている¹⁾。さらに、近年はドロフォン、電磁流速計を鉛直方向に設置し、流砂の鉛直分布を計測する試験的な試みも行われている²⁾。

2) 縦断的な流砂観測

常願寺川流域においては同じ流域内に上下流4箇所では縦断的な流砂観測が行われ、流砂特性が良好に観測されてきた²⁾。

3) 出水による土砂流出特性の違い

西川ら(2015)は津之浦下流堰堤における水位とドロフォンのパルス数の関係、流量とウォッシュロードの関係分析了³⁾。2014年9月の出水のように急激な流れの変化がない出水ではドロフォンのパルス数と水位は1:1の関係となり、明瞭なヒステリシスは見られない(図2.6.1)³⁾。一方、出水期間中に仮締め切りが流出した2013年6月出水では、ドロフォンのパルス数と水位に明瞭なヒステリシスが生じたことを示した³⁾。一方、濁度計により計測したウォッシュロードは2つの出水で量に大きな違いが見られた(図2.6.2)³⁾。

これらのことは、新たな土砂流出源が生じることにより、流砂特性が変化した可能性を示しており、富士川流域(2.4参照)、鬼怒川(2.7参照)や利根川上流域(2.9参照)の観測結果と一致するものであると考えられる。

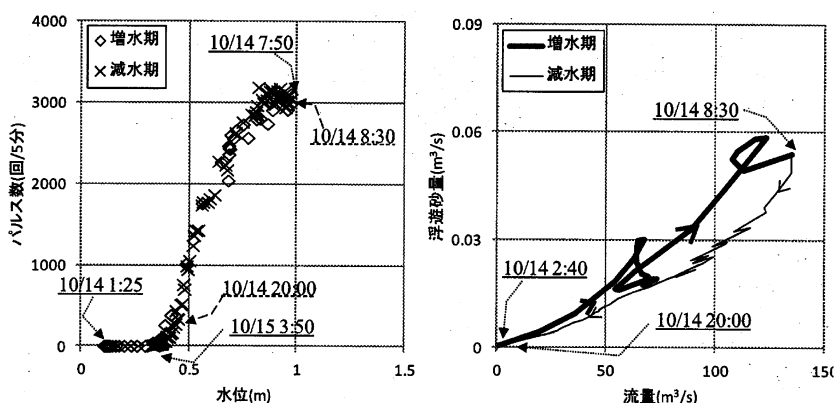


図 2.6.1 2014年9月13~14日の津之浦下流砂防堰堤における水位とドロフォンのパルス数の関係と流量とウォッシュロードの関係³⁾

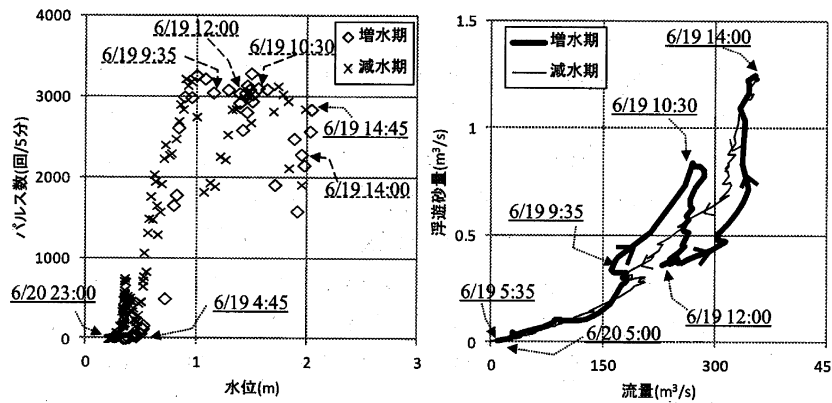


図 2.6.2 2013 年 6 月 18～21 日の津之浦下流砂防堰堤における水位と
 ハイドロフォンのパルス数の関係と流量とウォッシュロードの関係³⁾

【参考文献】

- 1) 水山高久・渡 正昭・渡部 修・池田暁彦・里深好文 (2004) : 砂防管理における水文情報の収集と処理—常願寺川 2004 年 5 月 17 日出水—, 砂防学会誌, 57(6), 56-59.
- 2) 三上幸三・越野正史・奥井 淳・栞原美里・宅見唯明・長山孝彦・後藤 健・伊藤隆郭・水山高久・宮本邦明・藤田正治 (2014) 常願寺川における時空間的なモニタリングと土砂管理, 平成 26 年度砂防学会研究発表会概要集, A134-A135.
- 3) 西川 一・西村友之・伊藤隆郭・長山孝彦・後藤 健・矢下誠人・水山高久・藤田正治・宮本邦明 (2015) : 津ノ浦下流砂防堰堤における掃流砂・浮遊砂・ウォッシュロードの観測, 平成 27 年度砂防学会研究発表会概要集, B60-B61.

2.7 鬼怒川流域大谷川での観測事例

1) 概要

鬼怒川流域では、大谷川流域におけるハイドロフォン、濁度計による流砂観測に加えて、直接採水による流砂観測が行われてきている¹⁾。

2) 濁度計・ハイドロフォンによる上流域の土砂生産発生検知

光永ら（2013）は2011年9月2日に大谷川流域内の稲荷川で土石流が発生した際の稲荷川より下流の流砂特性について分析した¹⁾。稲荷川で発生した土石流によると考えられる水位と流砂量の変化が土石流を検知したワイヤーセンサーおよび監視カメラの下流約25kmに位置する大谷川本川の関の沢第2床固において観測された。

光永ら（2013）は稲荷川において土石流の流下が確認されてから2時間15分後に関の沢第2床固の水位の急激な上昇があったことを確認した。さらに、浮遊砂量（水位計と濁度計から算出）は、土石流の影響と考えられる急激な水位の上昇が見られた時点の前後では100倍の差を示し、掃流砂量（ハイドロフォンにより計測）も20倍程度異なることを報告した（図2.7.1）¹⁾。

一方、2011年9月2日の出水時の観測値は、2012年5月3日の土石流を伴わない出水の同程度の水位のときと比較しても浮遊砂量で約27倍、掃流砂量で約2倍と高い値を示していた。

さらに、2012年台風4号による出水では、水位と浮遊土砂濃度の関係に明瞭なヒステリシスは見られなかったものの、2011年の土石流発生をともなう出水では明瞭なヒステリシスが確認されている（図2.7.2）¹⁾。この結果は、富士川流域の大武川の観測結果（2.4参照）と良く一致している。

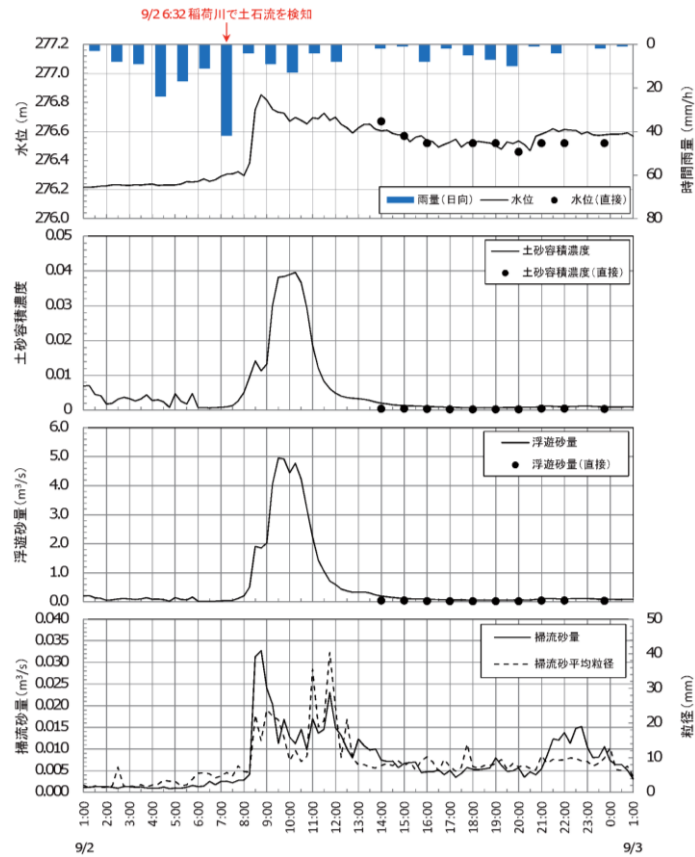


図 2.7.1 関の沢第 2 床固における 2011 年台風 12 号における雨量および水位、浮遊砂濃度、浮遊砂量、掃流砂量の時間変化¹⁾

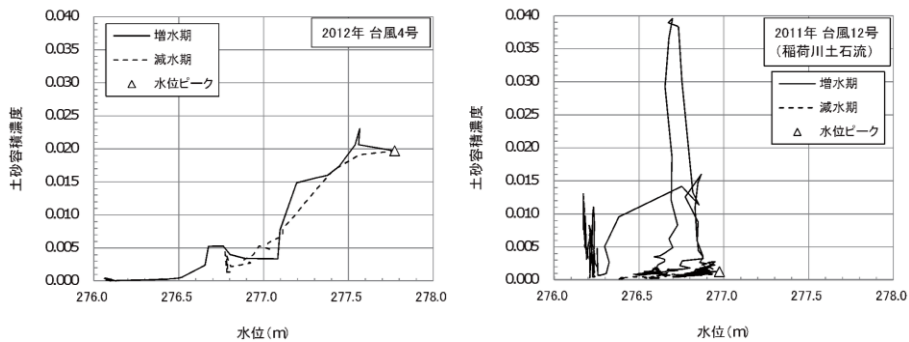


図 2.7.2 関の沢第 2 床固における 2012 年台風 4 号時と 2011 年 12 号号時の水位と浮遊砂濃度の関係¹⁾

【参考文献】

- 1) 光永健男・佐藤 勇・齋藤一裕・池田幸太郎・長井 斎・松原智生・田島規雄 (2013) : 流砂量自動観測装置が捉えた日光大谷川 (稲荷川) の土石流発生事象, 平成 25 年度砂防学会研究発表会概要集, A276-A277.

2.8 揖斐川水系坂内川における観測事例

1) 概要

揖斐川流域では坂内川において、2011年よりハイドロフォン、濁度計等による流砂観測が実施されてきている¹⁾。

2) 出水による土砂流出特性の違い

坂内川では複数の出水時の流量、濁度計による観測から算出した浮遊砂の容積濃度、ハイドロフォンによる観測から算出した掃流砂量の変動が良好に観測されている¹⁾。その結果、同じ規模の水位であっても出水によって、掃流砂量、浮遊砂量が異なることが示された(図 2.8.1)¹⁾。例えば、2011年9月の出水に比べて、流量は2013年9月の出水の方が大きいにも関わらず、掃流砂量は2011年の方が1オーダー程度大きいことを示した。

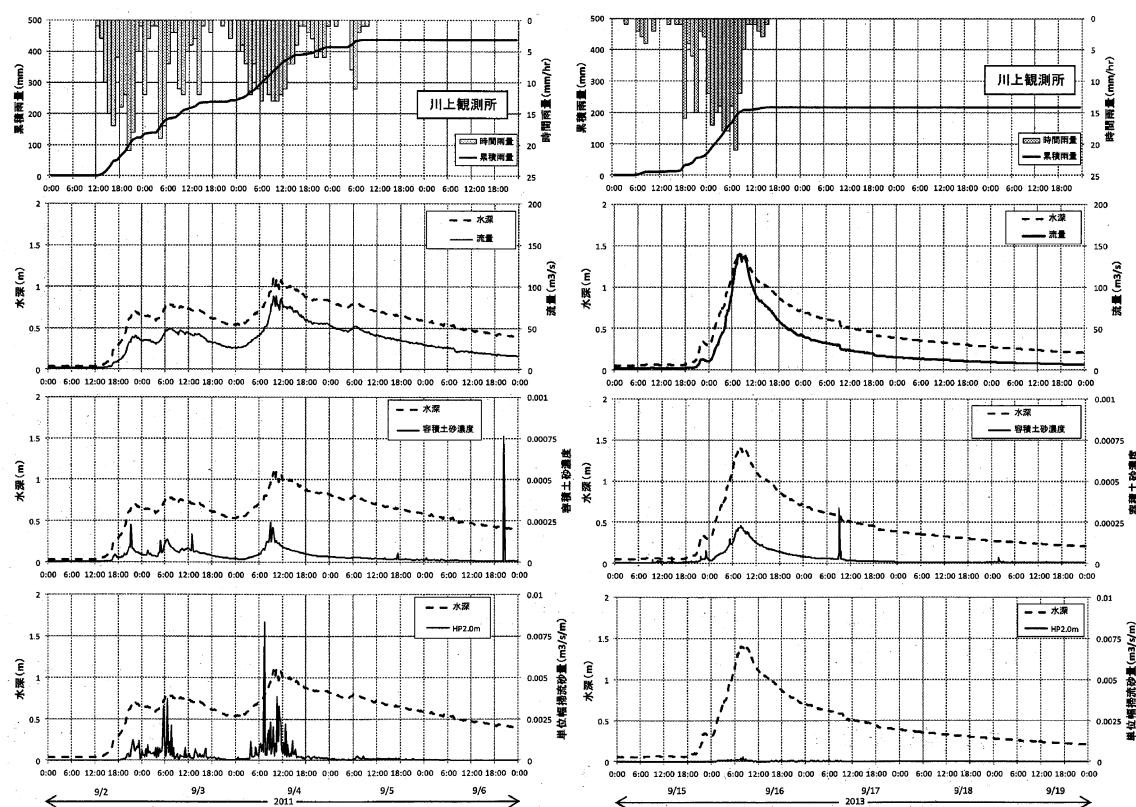


図 2.8.1 坂内観測所における出水時の雨量(1番上の図), 流量(上から2番目の図の実線), 浮遊砂量(上から3番目の図の実線), 掃流砂量(上から4番目の図の実線)の時間変化の観測結果: 左 2011年9月2-6日の出水(総雨量437mm), 右 2013年9月15-19日の出水(総雨量216mm)¹⁾

3) 流砂量の経年変化

白木ら（2015）はハイドロフォンによる掃流砂観測とバケツ採水で求めた流量—浮遊砂量関係から4年間の月別の流砂量を推定した（図2.8.2）¹⁾。その結果、2011、2012年の融雪期（3,4月）に比べて、2014年の融雪期（3,4月）の掃流砂量は50～250分の1程度であったことなど、経年的な流砂量の変化を示した¹⁾。

以上の結果はハイドロフォンにより流域の状況の変化に応じた土砂流出状況の変化を定量的に把握できることを示していると考えられ、富士川流域（2.4参照）、魚野川流域（2.5参照）の観測結果と一致するものである。

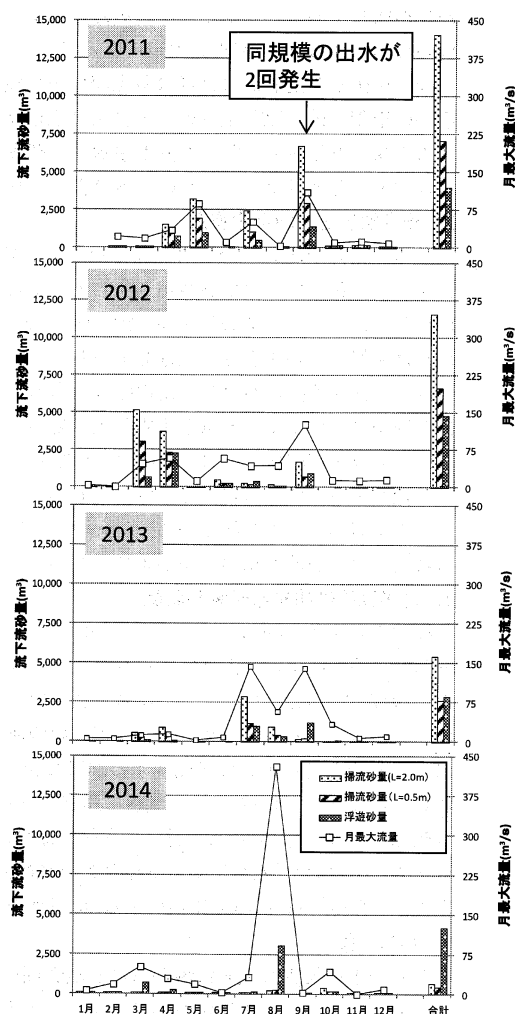


図 2.8.2 坂内観測所における月別掃流砂量・浮遊砂量¹⁾

【参考文献】

- 1) 白木久也・野田 勲・村上広明・西陽太郎・池島 剛・松田 悟（2015）：流砂観測に基づく坂内川の土砂動態経年変化，平成 27 年度砂防学会概要集，A120-A121.

2.9 利根川上流域における観測事例

1) 概要

利根川上流域では吾妻川，片品川，神流川，烏川の各流域においてハイドロフォン，濁度計等による流砂観測が実施されてきており，流砂観測を用いた流域監視の可能性について検討されてきた¹⁾。

2) 土砂生産にともなう掃流砂特性の変化

小林ら（2014）は利根川支川の吾妻川三原流砂観測所における水位（流量）とハイドロフォンから求めた流砂量の関係を分析した。その結果，吾妻川流域の三原流砂量観測所では中小出水であっても，出水期間中の水位変動に応じて掃流砂量が変動することを示した（図 2.9.1）²⁾。

その上で，小林ら（2014）はハイドロフォンの計測結果を合成音圧法により掃流砂量と掃流砂の代表粒径に変換し，理論値との比較を行った。その結果，水位と観測値／理論値の関係は，2011年の台風12号および15号の大規模出水を境に変化し，大規模出水後は小さい水位であっても，観測値／理論値は大規模出水前に比べて大きな値になることを示した（図 2.9.2）²⁾。また，大規模出水時は水位によらず，観測値／理論値は大きく，理論値に近い掃流砂量が観測されたこともあわせて示した。これらの観測結果は，流域の状況の変化に応じて掃流砂量が変化することを示しており，富士川（2.4 参照），魚野川（2.5 参照），揖斐川流域の坂内川（2.7 参照）の観測結果と一致するものであった。さらに，この結果はハイドロフォンにより求めた掃流砂量と粒径の関係が流砂理論と矛盾しないことを確認したものと考えられる。

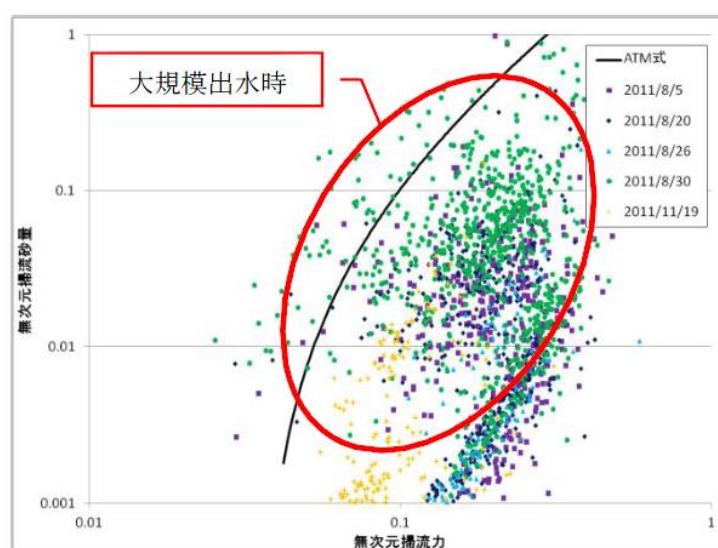


図 2.9.1 吾妻川三原観測所における無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係²⁾

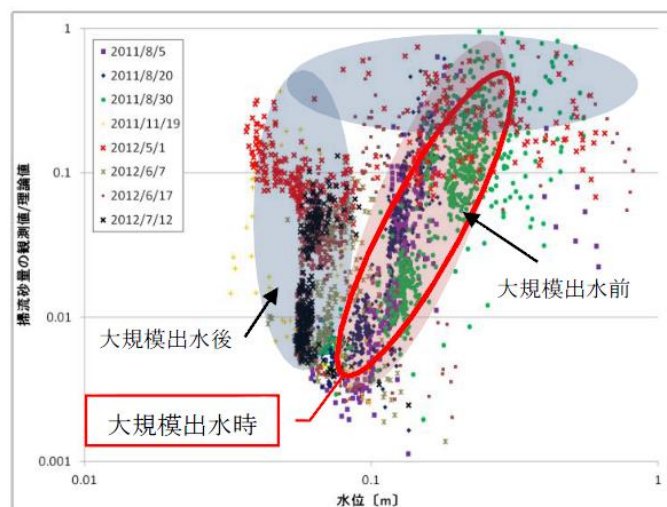


図 2.9.2 吾妻川三原観測所における水位と掃流砂量の観測値と理論値の比の関係²⁾

【参考文献】

- 1) 神野忠広・竹本隆之・杵淵新一・内田太郎・富田邦裕・重村一馬（2015）：流砂量観測及び河床変動観測による流域監視に関する考察，平成 27 年度砂防学会概要集，B246-B247.
- 2) 小林拓也・鈴木拓郎・吉田佳佐・菊井稔宏・内田太郎・神野忠広（2014）：ハイドロフォンによる流砂観測に基づく流砂移動の特性変化に関する分析，平成 26 年度砂防学会概要集，A186-A187.

3. 全国的なデータ整理・分析の事例

ここでは、全国直轄砂防事務所において観測されたデータを用いて、行った全国的なデータ整理・分析の結果を示す。対象としたのは表 3.1～3.2 および図 3.1 に諸元および位置を示した 86 箇所である。また対象としたデータ収集・観測項目は、次の通りである。

- ① 雨量
- ② 流量
- ③ 濁度計による浮遊砂量観測
- ④ ハイドロフォンによる掃流砂量観測

なお、ハイドロフォンによって計測された音響波形から掃流砂量に変換する方法は数多く提案されているが、ここではデータ収集・整理の第 1 段階としてデータの質を均質に保つことを目的とし、鈴木ら (2010)¹⁾が示した合成音圧法を用いて変換されたデータを対象とした。その他の手法で掃流砂量に変換されている箇所は整理・分析の対象に含んでいない。

【参考文献】

- 1) 鈴木拓郎・水野秀明・小山内信智 (2010) : 音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂量計測手法に関する基礎的研究, 砂防学会誌, 62(5), 18-26.

表 3.1 観測箇所名および所在地

観測所記号	地方整備局	事務所名	水系・山系	河川名	住所	緯度	経度	観測所名	観測箇所諸元			機器の有無		流量算出方法	
									流域面積 (km ²)	河床勾配 (°)	川幅 (m)	水位計	測度計		ハイドロフォン
81-3-01	北海道開発局	帯広開発建設部	十勝川	礼内川	北海道帯広市大正町	42.798	143.155	第二大川橋	第二大川橋	43	0.09	有	有	無	H~Q式
81-3-02	北海道開発局	帯広開発建設部	十勝川	戸島別川	北海道帯広市上清川町	42.699	143.039	戸島橋	戸島橋	54	0.31	有	有	無	H~Q式
82-1-01	東北地方整備局	新庄河川事務所	最上川	角川	山形県最上郡戸沢村古口	38.731	140.129	古口	明戸	-	0.30	有	有	無	-
82-1-02			最上川	銅山川	山形県最上郡大蔵村赤松	38.687	140.235	通(赤松)	銅内	-	1.26	有	有	無	H~Q式
82-1-03			最上川	銅山川	山形県最上郡大蔵村南山	38.609	140.167	肘折	肘折ダム	-	1.03	有	有	無	マンガの式
82-1-04			最上川	銅山川	山形県最上郡大蔵村赤松	38.677	140.237	合流点	銅内	-	0.29	有	有	無	-
82-1-05			最上川	寒河江川	山形県西村山郡西川町海味	38.422	140.151	関沢	寒河江ダム	-	0.88	有	有	無	-
82-1-06			最上川	寒河江川	山形県西村山郡西川町大井沢	38.422	139.983	大輪原川	中村	-	1.80	有	有	無	-
82-1-07			最上川	寒河江川	山形県西村山郡西川町水沢	38.437	140.105	水沢川	寒河江ダム	-	1.97	有	有	無	-
82-1-08			最上川	鮎川	山形県最上郡真室川町川内	38.868	140.256	安久土	金山	-	0.45	有	有	無	H~Q式
82-1-09			最上川	鮎川	山形県最上郡真室川町大沢	38.903	140.226	大向	真室川	-	0.96	有	有	無	H~Q式
82-1-10			最上川	鮎川	山形県最上郡真室川町及位	38.967	140.419	黒森沢	主鑿坂	-	2.71	有	有	無	-
82-1-11			最上川	鮎川	山形県最上郡真室川町及位	38.978	140.389	朴木沢	主鑿坂	-	1.63	有	有	無	-
82-1-12			最上川	鮎川	山形県最上郡金山町中田	38.921	140.334	中田香木沢	主鑿坂	-	1.30	有	有	無	-
82-1-13			阿武隈川	阿武隈川	福島県福島市南沢	37.781	140.436	流路工第2床固工	福島(国)	50	0.54	有	有	有	H~Q式
82-1-14			阿武隈川	阿武隈川	福島県福島市上野寺	37.786	140.403	釜の下橋	庭坂	-	0.53	有	有	無	H~Q式
82-2-01			阿武隈川	荒川	福島県福島市仁井田	37.754	140.427	荒川一帯工	土湯	75	1.23	有	有	有	H~Q式
82-2-02			阿武隈川	荒川	福島県福島市上名倉	37.736	140.389	上名倉水位観測所	土湯	70	0.94	有	有	有	マンガの式
82-2-03			阿武隈川	荒川	福島県福島市荒井	37.695	140.342	荒川第5水位観測所	土湯	20	2.27	有	有	有	マンガの式
82-2-04			阿武隈川	赤川	岩手県八幡平市平館	39.989	141.075	平館観測所	野駄	15	0.21	有	有	有	H~Q式
82-2-05			北上川	北上川	岩手県八幡平市平館	39.920	141.053	田頭観測所	野駄	65	0.88	有	有	有	マンガの式
82-2-06			北上川	北上川	岩手県八幡平市松尾香木	39.891	140.953	松尾観測所	松川	-	0.04	有	有	無	-
82-2-07			北上川	龍川	岩手県岩手郡平石町上野新里	39.690	140.947	春木場観測所	春木場	55	0.24	有	有	有	-
82-2-08			北上川	龍川	岩手県岩手郡平石町東山	39.812	140.922	東山観測所	瀧ノ上	40	1.51	有	有	有	マンガの式
82-2-09			北上川	龍川	岩手県岩手郡平石町御明神小赤沢	39.685	140.912	小赤沢観測所	春木場	-	1.00	有	有	無	-
82-2-10			北上川	志戸前川	岩手県平石町御明神赤沢	39.680	140.900	御明神観測所	春木場	-	1.13	有	有	無	-
82-2-11			北上川	産女川	岩手県一関市産女町字岡山	38.967	140.909	本寺観測所	三ツ森	25	1.38	有	有	有	マンガの式
82-2-12			八幡平山系	生保内川	秋田県仙北市田沢湖生保内下台地内	39.688	140.739	生保内川第1砂防堰堤	下松木内	25	0.78	有	有	有	マンガの式
82-2-13			八幡平山系	先達川	秋田県仙北市田沢湖生保内中台地内	39.778	140.755	先達川	玉川ダム	30	2.86	有	有	有	マンガの式
82-2-14			八幡平山系	六枚沢川	秋田県仙北市田沢湖生保内中台地内	39.705	140.758	六枚沢	下松木内	10	7.59	有	有	有	マンガの式
82-2-15			栗駒山系	道川	宮城県栗原市花山	38.803	140.819	越戸橋	保呂内	50	0.23	有	有	有	マンガの式
83-1-01	関東地方整備局	利根川水系砂防事務所	利根川	片品川	群馬県利根郡片品村鎌田	36.767	139.226	鎌田	鎌田	69	0.95	有	有	有	H~Q式
83-1-02			利根川	香妻川	群馬県吾妻郡嬬恋村三原	36.526	138.533	三原	田代	80	0.72	有	有	有	H~Q式
83-1-03			利根川	碓氷川	群馬県安中市松井田村檜川	36.339	138.729	檜川	松井田	22	1.22	有	有	有	H~Q式
83-1-04			利根川	大谷川	群馬県多野郡上野村新沢	36.070	138.804	向屋	奥名郷	20	1.36	有	有	有	H~Q式
83-1-05			利根川	松木川	栃木県日光市町吉	36.782	139.068	関沢第2床固工	日光	117	0.43	有	有	有	H~Q式
83-1-06			利根川	渡良瀬川	栃木県日光市足尾町	36.625	139.440	足尾砂防堰堤	足尾	40	2.08	有	有	有	-
83-1-07			利根川	利根川	栃木県日光市足尾町	36.625	139.430	中唐砂防堰堤	足尾	35	1.15	有	有	有	H~Q式
83-1-08			利根川	利根川	群馬県桐生市黒保根町	36.484	139.261	川口川下流砂防堰堤	鳥居川/大間々	35	3.31	有	有	有	-
83-1-09			利根川	利根川	群馬県みどり市大間々町	36.474	139.259	上神橋砂防堰堤	鳥居川/大間々	80	0.90	有	有	有	H~Q式
83-1-10			利根川	利根川	群馬県桐生市堤町	36.415	139.316	赤岩橋	大間々	40	0.41	有	有	有	H~Q式
83-1-11			利根川	利根川	群馬県足利市栗庭町	36.358	139.386	栗庭橋	大間々	130	0.27	有	有	有	H~Q式

表 3.2 観測箇所名の諸元

観測所記号	地方整備局	事務所名	水系・山系	河川名	観測所名および所在地		観測箇所諸元		機器の有無			流量算出方法	
					住所	観測所名	降雨観測所	流域面積 (km ²)	河床勾配 (°)	川幅 (m)	水位計		測度計
83-4-01	富士川	富士川砂防事務所	水系・山系	山梨北杜市白州町大武川	西比良下流第6床固	釜無川	釜無川	84.9	0.97	85	有	有	H~G式
83-4-02	富士川	富士川砂防事務所	水系・山系	山梨北杜市白州町下教来石	流川第06床固	釜無川	釜無川	9.4	2.02	20	有	有	H~G式
83-4-03	富士川	富士川砂防事務所	水系・山系	山梨県北杜市白州町下教来石	流川第9床固	釜無川	釜無川	16.4	1.10	25	有	有	H~G式
83-4-04	富士川	富士川砂防事務所	水系・山系	山梨北杜市武川町牧原	大武川第50床固	釜無川	釜無川	72.0	0.95	74	有	有	H~G式
83-4-05	富士川	富士川砂防事務所	水系・山系	山梨県北杜市龍岡町若尾新田	大武川第50床固	釜無川	釜無川	479.0	0.57	-	有	有	H~G式
83-4-06	富士川	富士川砂防事務所	水系・山系	山梨県早川町下湯島	大武川第50床固	釜無川	釜無川	222.0	1.01	20	有	有	H~G式
83-4-08	北陸地方整備局	松本砂防事務所	水系・山系	山梨県早川町大字初鹿宇日角山088-1	大武川第50床固	釜無川	釜無川	494.2	1.91	-	有	有	H~G式
84-1-07	信濃川上流	信濃川上流	水系・山系	長野県松本市安曇	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	77.7	8.10	28	有	有	マンゴの式
84-1-08	信濃川	信濃川	水系・山系	長野県北安曇郡白馬村	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	28.8	10.20	69	有	有	マンゴの式
84-1-09	信濃川	信濃川	水系・山系	長野県北安曇郡小谷村	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	63.6	12.80	170	有	有	マンゴの式
84-2-04	信濃川下流	信濃川下流	水系・山系	長野県北安曇郡白馬村	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	22.0	9.50	53	有	有	マンゴの式
84-2-05	信濃川下流	信濃川下流	水系・山系	新潟県南魚沼市長崎	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	83.2	3.58	70	有	有	H~G式
84-3-01	常願寺川	常願寺川	水系・山系	新潟県魚沼市竜光	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	38.4	1.40	17	有	有	H~G式
84-3-03	常願寺川	常願寺川	水系・山系	富山県富山市立山町左岸	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	354.0	0.90	195	有	有	マンゴの式
84-4-02	金沢河川国道事務所	金沢河川国道事務所	水系・山系	富山県中新川郡立山町戸味寺	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	48.0	1.43	60	有	有	H~G式
84-5-01	神通川	神通川	水系・山系	石川県白山市瀬戸	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	184.4	0.17	50	有	有	H~G式
84-5-02	神通川	神通川	水系・山系	岐阜県高山市奥津野温泉郷今野地区	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	100.6	4.40	130	有	有	H~G式
84-6-01	飯豊山系	飯豊山系	水系・山系	山形県西置賜郡小国町上ノ沢	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	59.0	6.87	75	有	有	H~G式
85-1-04	天竜川	天竜川	水系・山系	長野県上伊那郡飯島町	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	6.3	2.70	10	有	有	マンゴの式
85-3-01	天竜川	天竜川	水系・山系	長野県下伊那郡松川町生田	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	36.7	2.30	50	有	有	H~G式
85-5-01	越美山系	越美山系	水系・山系	岐阜県津川町中津川	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	224.3	0.30	80	有	有	H~G式
85-5-02	越美山系	越美山系	水系・山系	岐阜県揖斐郡揖斐川町坂内広瀬	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	46.7	1.64	48	有	有	H~G式
86-1-01	近畿地方整備局	六甲砂防事務所	水系・山系	岐阜県揖斐郡揖斐川町小津	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	93.4	0.31	35	有	有	H~G式
86-1-03	六甲山系	六甲山系	水系・山系	兵庫県芦屋市山手屋地先	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	37.5	1.06	18	有	有	H~G式
86-1-04	六甲山系	六甲山系	水系・山系	兵庫県神戸市東灘区鶴甲3丁目地先	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	6.9	3.43	10	有	有	H~G式
86-1-05	六甲山系	六甲山系	水系・山系	兵庫県神戸市兵庫区矢部町地先	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	4.2	6.28	16	有	有	H~G式
86-1-09	六甲山系	六甲山系	水系・山系	兵庫県神戸市兵庫区上紙園町地先	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	3.0	1.15	5	有	有	マンゴの式
86-1-10	六甲山系	六甲山系	水系・山系	兵庫県神戸市東灘区住吉台地先	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	7.4	4.00	23	有	有	H~G式
83-3-01	木津川上流河川事務所	木津川上流河川事務所	水系・山系	兵庫県神戸市東灘区住吉山手6丁目地先	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	3.5	4.00	12	有	有	マンゴの式
87-2-01	倉吉河川国道事務所	倉吉河川国道事務所	水系・山系	奈良県宇陀郡菅原村伊賀見	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	102.5	0.02	30	既設	有	マンゴの式
87-2-02	大山山系	大山山系	水系・山系	鳥取県倉吉市田内町	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	490.0	0.20	150	有	有	マンゴの式
87-2-03	大山山系	大山山系	水系・山系	鳥取県倉吉市田内町	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	233.3	0.27	120	有	有	マンゴの式
87-2-08	大山山系	大山山系	水系・山系	鳥取県三朝町湯谷	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	114.6	0.82	30	有	有	マンゴの式
87-2-15	大山山系	大山山系	水系・山系	鳥取県倉吉市且町	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	87.8	0.68	50	有	有	マンゴの式
88-1-10	四国地方整備局	四国山地砂防事務所	水系・山系	鳥取県倉吉市三江	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	59.9	0.87	25	有	有	マンゴの式
89-1-03	九州地方整備局	宮崎河川国道事務所	水系・山系	徳島県那賀郡那賀町	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	127.9	0.51	25	有	有	マンゴの式
89-1-04	川辺川△△砂防事務所	川辺川△△砂防事務所	水系・山系	宮崎県那賀郡高崎町細瀬地先	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	31.1	1.30	40	有	有	H~G式
89-2-01	球磨川	球磨川	水系・山系	宮崎県西諸県郡高原町	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	7.5	6.30	5	有	有	H~G式
89-2-02	球磨川	球磨川	水系・山系	熊本県八代市泉町	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	64.4	1.00	18	有	有	H~G式
89-2-06	球磨川	球磨川	水系・山系	熊本県八代市泉町	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	41.2	0.80	18	有	有	H~G式
89-2-09	球磨川	球磨川	水系・山系	熊本県球磨郡相良村	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	29.2	0.30	72	有	有	H~G式
				熊本県球磨郡相良村	信濃川上流	信濃川上流	信濃川上流	490.4	0.30	67	有	有	H~G式

3.1 濁度計の観測結果に関する分析

ここでは、岡本ら (2013) ¹⁾による全国の直轄砂防事務所で開催された濁度計を用いた観測データについて整理分析した結果を示す。解析に使用したデータの観測期間は、平成22年および23年であり、17事務所57箇所のデータを対象とした。また、対象とした観測箇所近傍において近年採水によって計測された浮遊土砂濃度のデータも収集した。

1) 降雨時の流砂量

ここでは、濁度計により計測された濁度と各地点で求められた濁度～土砂濃度換算式を用いて土砂濃度を求め、流量データを用いて流砂量に換算した。その上で、降雨ごとのピーク流砂量とピーク流量の関係を算出し、図3.1.1に示した。場所によって、同じピーク流量であってもピーク流砂量が10倍程度の違いがあった(図3.1.1左図) ¹⁾。一方、地点ごとに見た場合、流砂量は流量の2乗に概ね比例する関係が見られ、この関係は、水理公式集等に示されている、河川の流量とウォッシュロードの関係と整合する。ただし、従来、下流河川等で一般的であるとされた範囲の中央付近の値と比べると同じ流量であっても、流砂量は1～3オーダー大きかった。また、これまで、芋川、姫川、富士川、六甲山系などで採水により、計測された浮遊砂量と流量の関係(図3.1.1右図) ¹⁾も、下流河川等で計測された範囲よりやや大きい範囲に位置することが多く、今回の濁度計を用いた結果と矛盾しない。

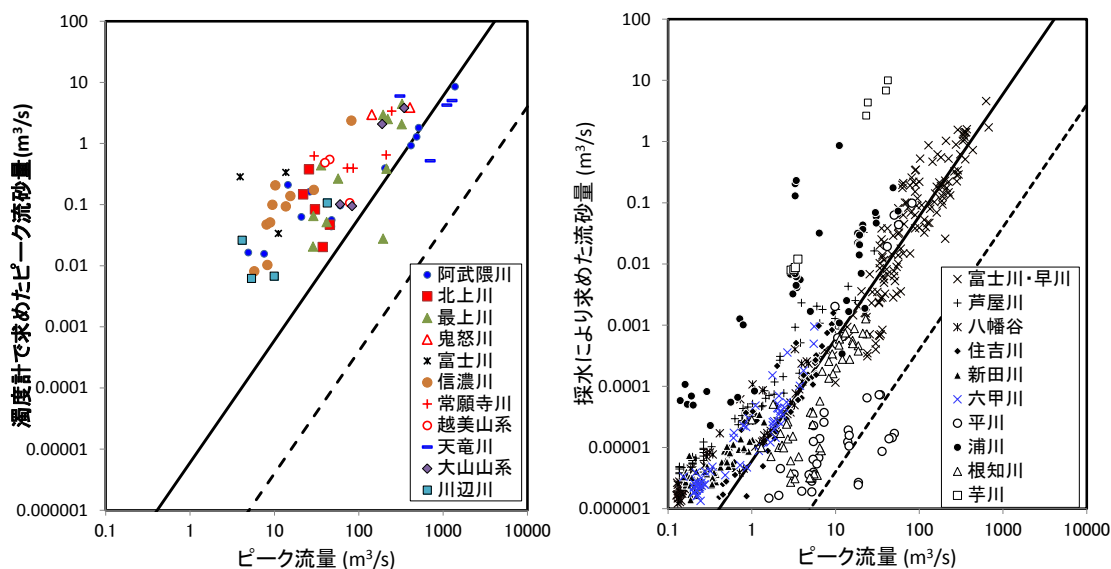


図 3.1.1 濁度計で求めたピーク流砂量とピーク流量の関係(左)と採水によって求められた流量と浮遊砂量の関係(右) ¹⁾

図の実線(上限)と破線(下限)は、水理公式集に示されているダム等における流量とウォッシュロード量の関係

2) 降雨時の応答

図3.1.2には、濁度計のピーク出現時刻と降雨強度のピーク時刻の時間差を示した。図に示したように、大半の降雨で、濁度のピーク時刻は降雨強度のピーク時刻の前後3時間以内であった。詳しく見ると、最大降雨強度が15mm/hより小さい場合、約6割の降雨で濁度のピークは降雨強度のピークより、早いかほぼ同時であった。これに対して、最大降雨強度が15mm/hより大きい場合、約6割の降雨で濁度のピークは降雨強度のピークより、遅れた。

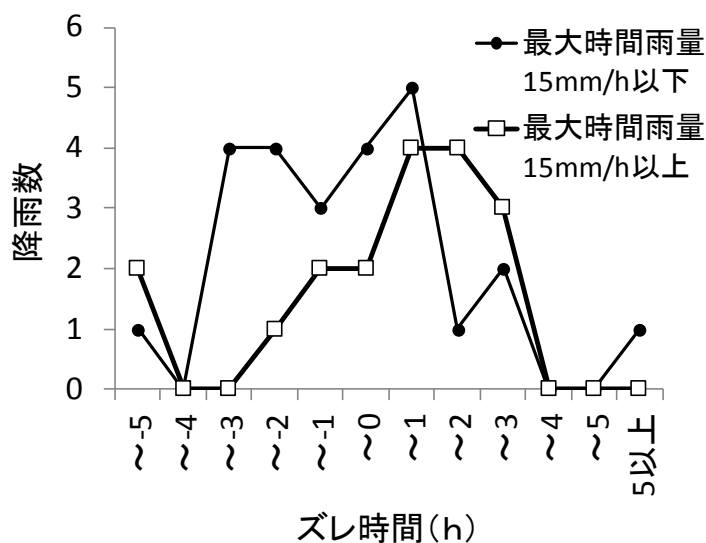


図 3.1.2 降雨強度のピーク時刻と濁度のピーク時刻の時間差¹⁾
 マイナスの場合、濁度のピークが降雨のピークより早いことを意味する

【参考文献】

- 1) 岡本敦・内田太郎・林真一郎・木下篤彦・水垣滋・吉村暢也・小菅尉多 (2013) : 山地河道における濁度計を用いた流砂観測の課題と対応, 平成 25 年度砂防学会研究発表会概要集, B22-B23.

3.2 ハイドロフォンを用いた観測結果に関する分析(1)

ここでは、岡本ら (2012) ¹⁾による平成 22, 23 年度において全国的に実施されたハイドロフォンによる掃流砂観測データを収集・整理した結果について示す。

1) 収集データと解析手法

ここでは、平成 22 年度、23 年度に直轄砂防事務所において実施されたハイドロフォンを用いた掃流砂観測データのうち、前述のとおり音圧値を鈴木ら (2010) ²⁾に示す合成音圧法で掃流砂量に変換したデータを用いた。また、ハイドロフォンによる掃流砂量の観測精度を検証するために、観測所周辺の未満砂の砂防堰堤の堆砂測量結果を収集した。ただし、ハイドロフォンによる観測時期と同期した堰堤の堆砂測量データを入手することが困難であったため、堆砂測量の時期に関係なくデータを収集した。そこで、時期の異なる掃流砂観測結果と堆砂測量結果を比較するために、できるだけ水理条件等をそろえる必要がある。本来であれば、水深、掃流力などの条件をそろえるのが直接的ではあるが、堆砂測量の実施と併せて水深観測が行われていない場合が多いため、ここでは、観測期間の掃流砂量または堆砂量を降雨量で除することにより正規化し、両者を比較した。集計は 1 出水ごとの流出土砂量及び観測期間を通した数ヶ月単位の中長期の積算流出土砂量を各々集計した。

同期したハイドロフォンによる掃流砂量と水深のデータが得られている場所において、無次元掃流力 (τ_*) 及び無次元掃流砂量 (q_{b*}) を以下の式で算出した。

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} \quad q_{b*} = \frac{q_b}{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}}$$

ここで、 u_* は摩擦速度、 σ は砂礫の比重、 ρ は水の比重、 g は重力加速度、 d は代表粒径、 q_b は単位幅の掃流砂量である。代表粒径は、周辺の河床の粒径調査結果を基に、60%粒径を用いて算出した。

2) 掃流砂量観測結果と堆砂測量結果

図 3.2.1 には、ハイドロフォンによる掃流砂量を単位面積・降雨あたりの掃流砂量に換算して示した。この図から、同じ流域面積であっても、場所及び期間により、単位面積・降雨あたりの掃流砂量は場所によっては 2 オーダー以上の大きな違いがあることがわかる。また、全般的には、流域面積が小さくなるほど単位面積・降雨あたりの掃流砂量は大きくなった。

また、図には同じ水系で、流域面積が概ね近い砂防堰堤における堆砂測量から推定した単位面積・降雨あたりの流出土砂量の結果もあわせて示した。砂防堰堤の堆砂測量から推定した単位面積・降雨あたりの流出土砂量も同じ場所であってもハイドロフォンによる結果同様に 1 オーダー以上の違いが見られた。

一方、全般的には、流域面積が小さくなるほど単位面積・降雨あたりの流出土砂量が

きくなる傾向はハイドロフォンと共通していた。また、同じ水系で砂防えん堤の堆砂測量から推定した流出土砂量に比べて、ハイドロフォンによる掃流砂量の観測結果はほぼ同程度かやや小さかった。この結果は、堆砂測量から推定した流出土砂量には浮遊砂が含まれている可能性があることを考慮すれば、ハイドロフォンである程度の精度で掃流砂量を推定できる可能性を示していると考えられる。

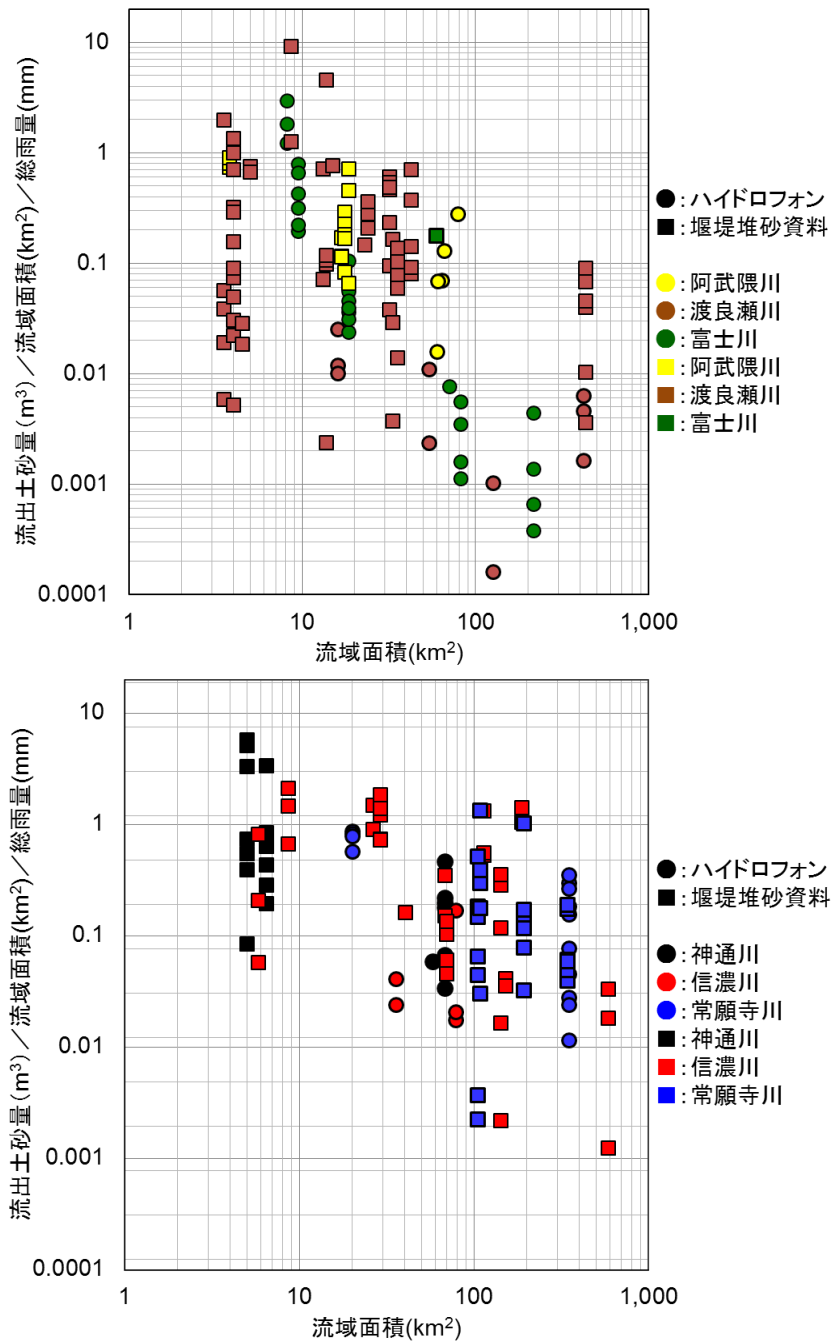


図 3.2.1 ハイドロフォンから求めた掃流砂量と堰堤堆砂測量から求めた流出土砂量と流域面積の関係¹⁾

3) 無次元掃流力と掃流砂量関係

図3.2.2に無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係を図示した。図に示したように無次元掃流力及び掃流砂量の関係は場所により大きく異なる。すなわち、無次元掃流力の範囲も異なる上、同じ無次元掃流力であっても無次元掃流砂量が異なる。さらに、常願寺川上滝床固工で顕著に見られるように、同じ地点であっても出水により無次元掃流力-掃流砂量関係は異なる場合がある。ただし、場所による無次元掃流力-掃流砂量関係の違いに比べると、同じ場所の出水による無次元掃流力-掃流砂量関係の違いは小さく、無次元掃流力-掃流砂量関係は個々の場の条件の影響を強く受けていると考えられる。

また、既往の掃流砂量式と比較すると、掃流砂量式の無次元掃流力-無次元掃流砂量の関係は実測の無次元掃流力-無次元掃流砂量関係を包絡するような形になった。無次元掃流力-無次元掃流砂量関係が掃流砂量式に近い関係を示したのは、阿武隈川上名倉、富士川春木川であった。一方、富士川西比良下流、信濃川登川第26床固工では流砂量式の関係から大きく外れた。このうち、春木川、西比良下流、登川第26堰堤は河床勾配1/30以上の急勾配区間に設置された観測所のデータであった。これに対して、比較的緩勾配区間に設置された観測所の無次元掃流力-無次元掃流砂量関係は互いに比較的類似した関係を示した。

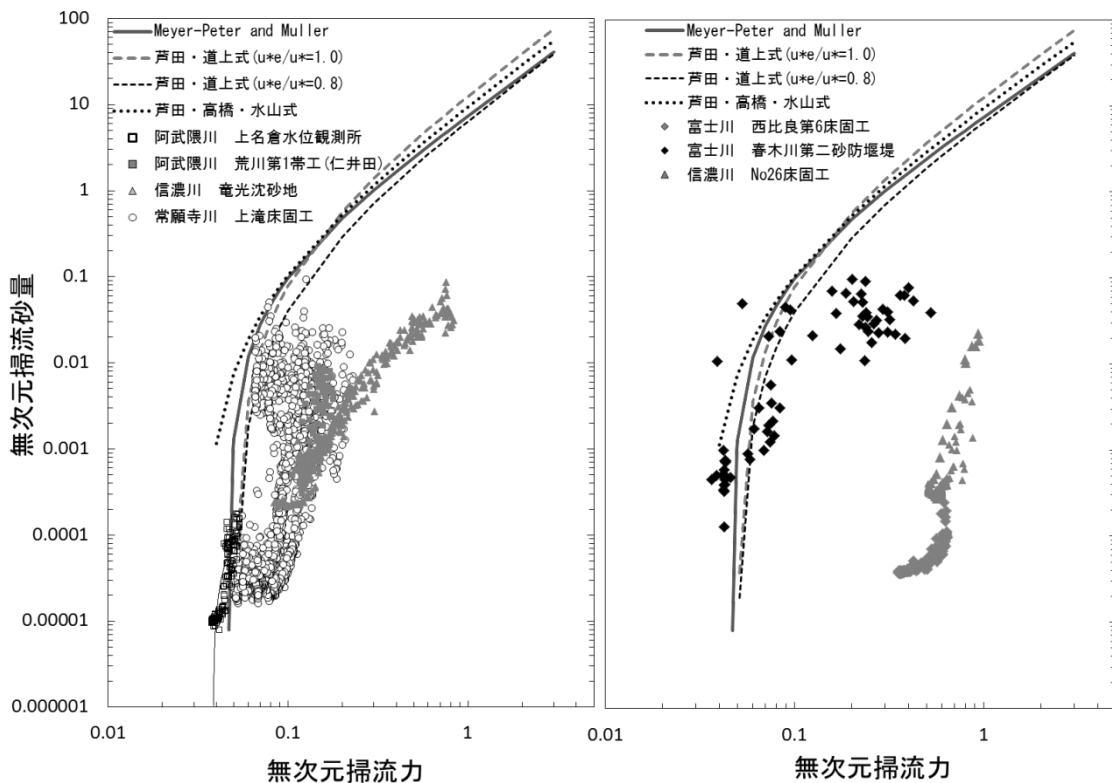


図 3.2.2 無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係¹⁾

【参考文献】

- 1) 岡本敦・内田太郎・林真一郎・木下篤彦・水垣滋・吉村暢也・小菅尉多（2012）：山地流域における流砂観測データの収集及び解析，平成24年度砂防学会研究発表会概要集，176-177.
- 2) 鈴木拓郎・水野秀明・小山内信智（2010）：音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂量計測手法に関する基礎的研究，砂防学会誌，62(5)，18-26.

3.3 ハイドロフォンを用いた観測結果に関する分析(2)

ここでは、内田ら(2015)による平成22～25年度における全国的に実施された掃流砂観測データを収集・整理した結果について示す。

1) 収集データと解析手法

ハイドロフォンの観測結果を流砂量に変換する手法は多数示されているが、前節同様、合成音圧法を用いて流砂量に変換されたデータを対象とし、60の観測箇所を対象とした。そのうち、良好に掃流砂量及び水深データが取得されていた47箇所、431出水を対象に整理分析を行った。

ここでは、出水ごとの総降水量と総掃流砂量の関係、ピーク流量とピーク掃流砂量の関係を整理した。掃流砂量は横断方向に分布があることが知られているが、現時点までに十分な情報がないため、単にハイドロフォンから求めた単位幅流砂量に川幅を乗じて掃流砂量を求めた。流量は、水深観測結果から算出し、既に水深一流量の関係が求められている観測箇所は、既存の水深一流量の関係を用い、流量に換算した。また、水深一流量の関係が求められていない観測箇所では、等流計算(マンニングの粗度係数0.04)により、流量を水深から算出した。また、雨量は観測箇所最近傍の雨量観測点のデータを用いた。

2) 1出水の総降水量と総掃流砂量関係

図3.3.1に1出水の総降水量と比総掃流砂量の関係を示した。図に示したように、総雨量の増大に従い、比総掃流砂量が増大する傾向が見られたものの、非常にばらつきが大きい。例えば、総降水量が100～300mmの143事例で見た場合、5出水で比総掃流砂量が $0.01\text{m}^3/\text{km}^2$ 以下、8出水が $0.01\sim 0.1\text{m}^3/\text{km}^2$ であるの対し、2出水で $100\text{m}^3/\text{km}^2$ 以上、であり、6出水で $50\sim 100\text{m}^3/\text{km}^2$ であり、4オーダー以上の違いが見られた。一方、約62%にあたる88出水で $1\sim 50\text{m}^3/\text{km}^2$ であった。また、流域面積、主流路の平均勾配、地質、年平均降水量によって、総雨量－総掃流砂量関係に明確な差は見られなかった。

3) 1出水のピーク流量とピーク掃流砂量関係

図3.3.2¹⁾には、1出水ごとのピーク流量とピーク掃流砂量の関係を示した。ピーク流量の増大にともない、ピーク掃流砂量は増大し、同じピーク流量のときのピーク掃流砂量の違いは最大3オーダー程度であり、概ね2オーダー内に多くのデータがプロットされた。例えば、ピーク流量が $50\sim 200\text{m}^3/\text{s}$ の139出水中、76%の出水でピーク掃流砂量は、 $0.001\sim 0.1\text{m}^3/\text{s}$ であった。ピーク流量は流域面積に依存し、流域面積が大きい流域ほどピーク流量は大きくなったが、流域面積による土砂濃度の違いは顕著ではなかった(図3.3.2a)。また、同じピーク流量のとき、主流路の平均河床勾配によりピーク掃流砂量に明確な違いは見られなかった(図3.3.2b)。さらには、地質や年平均降水量とも明瞭な関係は見られなかった(図3.3.2c, d)。

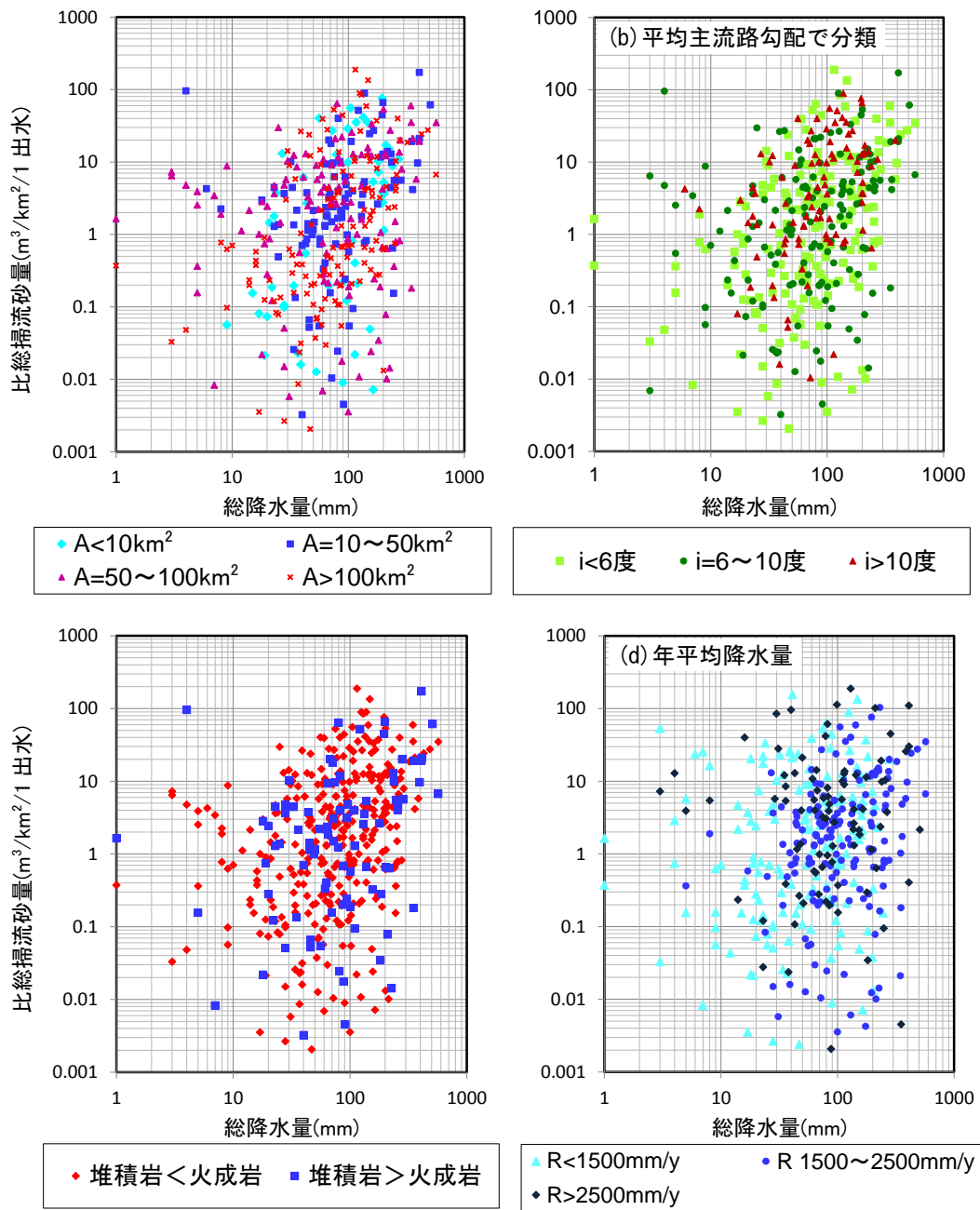


図 3.3.1 1 出水の総降水量と比総掃流砂量の関係¹⁾

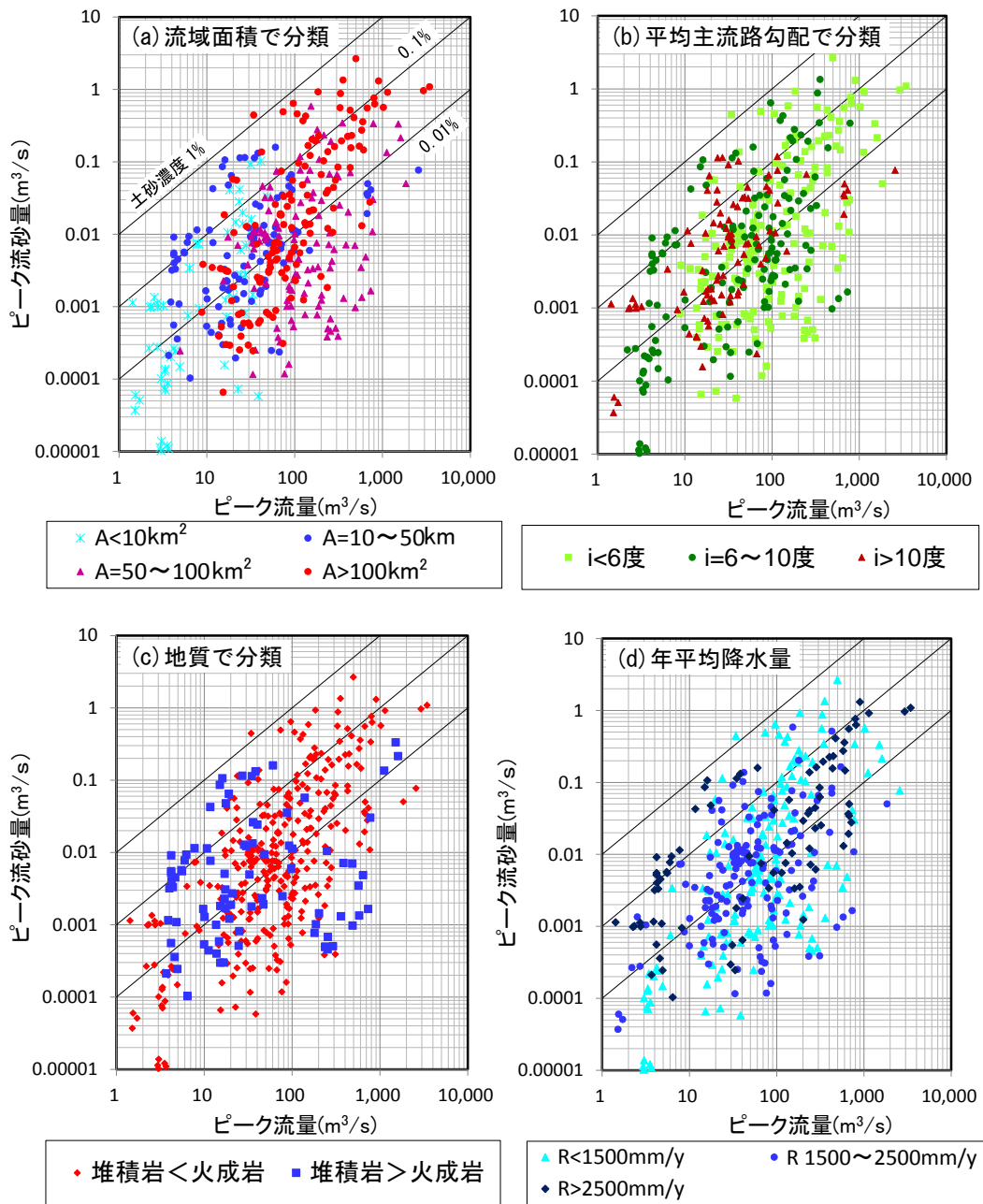


図 3.3.2 1 出水のピーク流量とピーク掃流砂量の関係¹⁾

4) まとめ

ダム堆砂等から求めた年間の比流砂量の調査結果では、流域面積が大きくなるに従い比流砂量は減少し、同じ流域面積の場合、比流砂量は概ね2 から3 オーダーの範囲におさまっている^(例えば2), 3)。しかし、ハイドロフォン²⁾の計測結果は流域面積の増大や河床勾配の低下により掃流砂量が減少するような傾向は明瞭には見られず、ばらつきも大きい。これらの先行研究との違いの原因は、対象期間、対象としている流砂形態の違い等に起因する可能性が考えられるが、更なる検討が必要である。

今回の結果より、降雨規模、流量、流域面積、河床勾配等の条件だけでは、流砂量を想定することが難しいことがわかる。これに対して、ハイドロフォンによる計測は多様な流砂の状況を観測できており、様々な流域の状態を把握するための有効な手段であると考えられた。

【参考文献】

- 1) 内田太郎・田中健貴・蒲原潤一・吉村暢也・鶴田謙次 (2015) : ハイドロフォンによる観測に基づく山地流域の掃流砂の流出特性, 平成27年度砂防学会研究発表会概要集, B20-B21.
- 2) 大久保駿 (1970) : 流出土砂量について—従来の研究の紹介—, 土木技術資料, 12(7), 350-355.
- 3) 芦田和男・奥村武信 (1974) : ダム堆砂に関する研究, 京大防災研年報, 17(B), 555~570.

4. 観測技術の課題

ここでは、濁度計およびハイドロフォンによる観測手法の課題について、レビューし、データを分析するうえでの留意点を整理した。

4.1 濁度計による浮遊砂観測の課題

濁度計を用いた浮遊砂観測の課題として、

- ① 濁度計が日射やゴミなど様々な環境の影響を受けるため、環境変動が大きい山地河川では継続的に良好なデータを取得することが困難である場合があること
- ② 濁度計で計測される濁度と土砂濃度の関係は粒径によって異なるため、濁度から土砂量に換算するにあたっては、粒径の影響を評価する必要があること
- ③ 粒径が大きいと土砂濃度によらず濁度がほとんど一定になるため、粗い粒径の土砂濃度観測が困難であること
- ④ 浮遊土砂濃度は鉛直分布があるため、1深度の濁度計の計測では通過した浮遊土砂量に変換することが難しいこと

などが指摘されている¹⁾。

1) 観測環境の影響

濁度計に不具合が出る要因は、センサー面の汚れ、日射、水泡、落ち葉・ゴミなどのセンサーへの付着、河床変動、機器の劣化など様々指摘されてきている¹⁾。国総研資料 No.886「山地河川における流砂水文観測データ（平成21年～25年度）」のデータを取りまとめるにあたって、「山地河道の流砂水文観測における濁度計観測実施マニュアル（案）」に基づき観測環境の影響によりデータに異常があると考えられるデータは除去した。

2) 粗い粒径の影響

六甲砂防事務所では、六甲山系の河道・山腹斜面に分布する土砂より作成した0.075mm～2.0mmの6つの粒径の異なる試料とカオリン粘土を用いて、濁度計により計測した濁度と土砂濃度の関係を室内実験により計測した²⁾。図4.1.1に結果の一例を示す。図4.1.1から、粗い粒径については土砂濃度が上がっても、濁度がほとんど反応しないことが分かる。粒径が0.1mmより大きくなると土砂濃度の上昇に対する濁度の変化が顕著に小さくなり、粒径が1mmより大きくなると土砂濃度の増減に関わらず濁度はほぼ一定の値になった。このことから、濁度は主として0.1mm以下の粒径の浮遊砂・ウォッシュロードに反応していると考えられる。

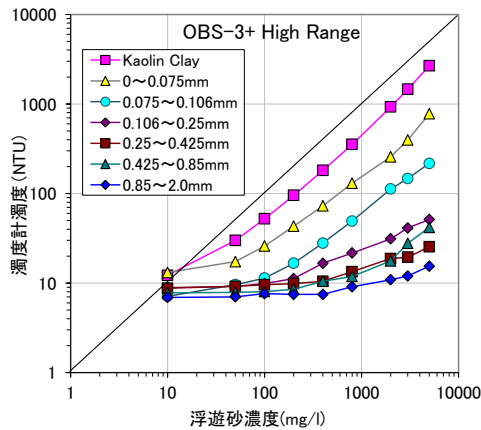


図 4.1.1 濁度計(OBS-3+)の検定試験結果¹⁾

3) 粒径依存性の影響

従来³⁾から知られているように粒径の違いにより同じ濁度であっても、土砂濃度が1オーダー以上異なる(図 4.1.1)¹⁾。混合粒径の濁度は各粒径の濁度の和として算出できることが確認されてきている³⁾ことから、岡本ら(2013)は実際の山地河川で計測された浮遊砂、ウォッシュロードの粒度分布を用いて、粒度分布の変化が濁度—土砂濃度関係に及ぼす影響について試算した⁴⁾。粒度分布は直轄砂防事務所で開催された浮遊砂サンプラーによる浮遊砂の粒径調査結果のうち⁵⁾、粒度分布の時間変化が最も大きかった福島県土湯観測所のデータを用いた(図 4.1.2)⁵⁾。岡本ら(2013)は観測期間中最も中央粒径が粗かったケース、細かかったケース、中間的なケースの3ケースについて試算した。粒径ごとの濁度—土砂濃度関係は図 4.1.1の結果に基づき粒径ごとの直線により定式化した。図 4.1.3に示すように試算の結果、同じ濁度であっても粒度分布の違いにより、最大5倍程度土砂濃度が違う可能性が考えられることが示された。

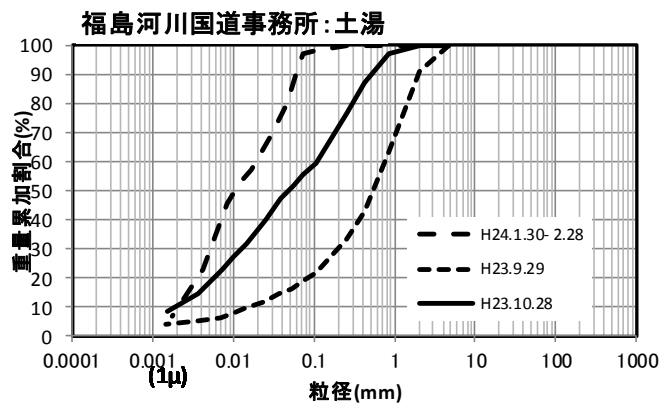


図 4.1.2 阿武隈川水系土湯観測所における浮遊砂サンプラーにより計測された粒度分布⁵⁾

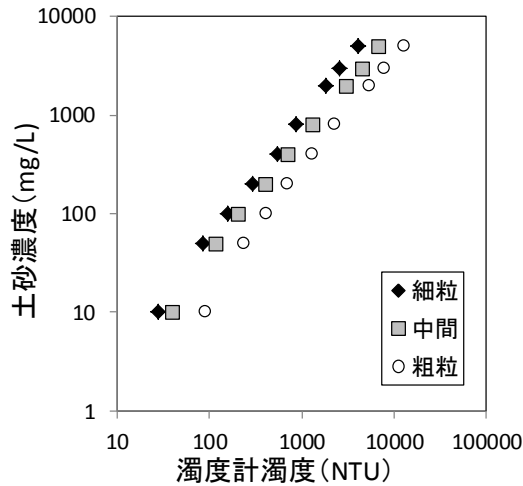


図 4.1.3 粒度分布の変化が濁度—土砂濃度関係に及ぼす影響の試算結果³⁾

4) 鉛直分布の影響

浮遊土砂は鉛直方向に濃度分布がある場合が多く、1 深度で計測している現行の手法では、場所によっては河道全体を代表していない可能性も考えられる。

田村ら (2014, 2015) は六甲山地の山地河川において浮遊砂の鉛直分布を図 4.1.4 に示す多段式浮遊砂採取装置を用いて浮遊砂の鉛直分布の観測を行った^{2), 6)}。その結果、田村ら (2015) は流域内が広く荒廃地が分布する白水谷において明瞭な鉛直分布があることを確認した (図 4.1.5)²⁾。また、ハイドロフォンを鉛直方向に設置した常願寺川における観測においても流砂量が鉛直方向に分布していることが確認されている⁷⁾。一方、田村ら (2014) は概ね森林に覆われている芦屋川においても多段式浮遊砂採取装置を用いた観測を行い浮遊砂の鉛直分布が小さかったことを報告した (図 4.1.6)⁶⁾。今後はデータを蓄積し、鉛直方向の濃度分布の影響を評価する手法を構築していく必要がある。



図 4.1.4 多段式浮遊砂採取装置 (白水谷流砂観測所) 複数の深度で採水する²⁾

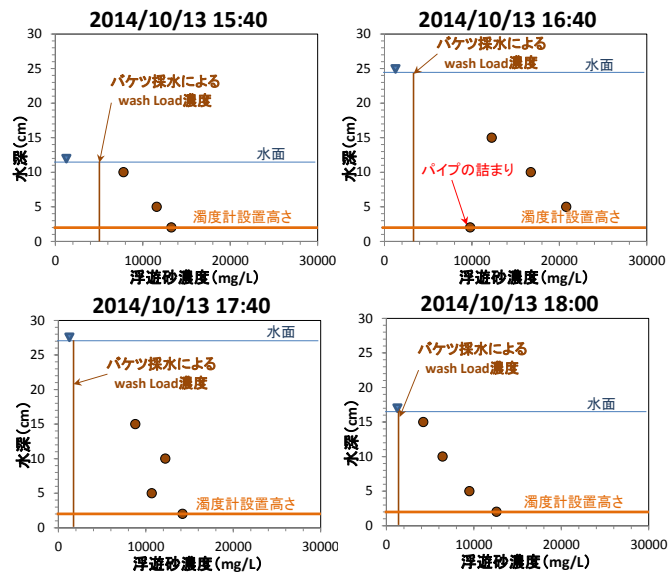


図 4.1.5 多段式浮遊砂採取装置により計測した白水谷流砂観測所における浮遊砂濃度の鉛直分布²⁾

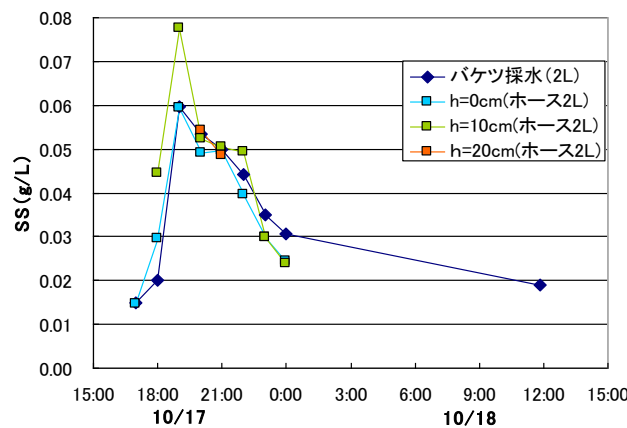


図 4.1.6 多段式浮遊砂採取装置により計測した芦屋川における浮遊砂濃度の鉛直分布⁶⁾
 図中の h は河床からの高さ

5) 考察

以上の結果を踏まえて簡単に考察する。濁度計を用いた浮遊砂観測については、2つの整理方針が考えられる。

1つ目は、0.1mm以下のいわゆるウォッシュロードを計測していると割り切る考えである。この場合、ウォッシュロードの場合、鉛直方向の分布は比較的小さいと考えられるため、鉛直方向の濃度分布の影響は小さいと考えられる。ただし、この場合、粒径の大きい浮遊砂による流砂量は観測できていないため、総流砂量の算出のためには別の手法を用いる必要があると考えられる。実際、田村ら(2015)では白水谷において直接的な採水(流れ全体を採取)結果と河床近傍に設置した濁度計による観測結果を比較し良好な相関が見

られたことが報告した²⁾。なお、このときバケツ採水においても採取された土砂は0.1mm以下のいわゆるウォッシュロードが大半であり、バケツ採水は流れの状態を乱すため粒径の粗い浮遊砂は十分に採取できないことが考えられた。

2つ目は、浮遊砂サンプラー等により、浮遊砂・ウォッシュロードの粒度分布を求め、粒度分布を考慮した濁度—土砂濃度関係から、濁度から土砂濃度へ変換することが考えられる。3)で示したように粒度分布の違いにより最大5倍程度の差が見込まれるものの、粒度分布の時間変化が少ない流域・時期においては、ある程度の精度で流砂量が推定できる可能性が考えられる。ただし、この場合、理論式等による鉛直分布の考慮が必要となると考えられる。2章で示したデータの整理にあたっては、2つ目の方針に従い整理を行ったが、濃度の鉛直分布の影響は考慮できていない。

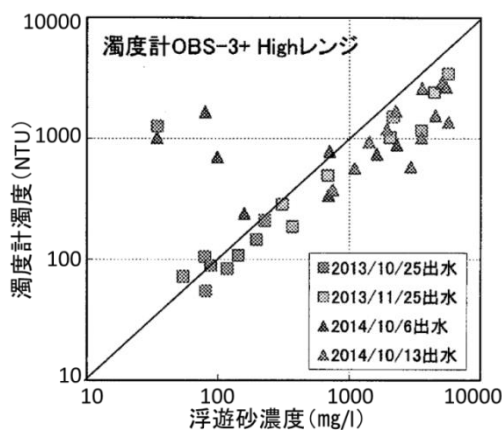


図 4.1.7 白水谷流砂観測所におけるバケツによる表面採水から求めた浮遊砂濃度と濁度計濁度の関係²⁾

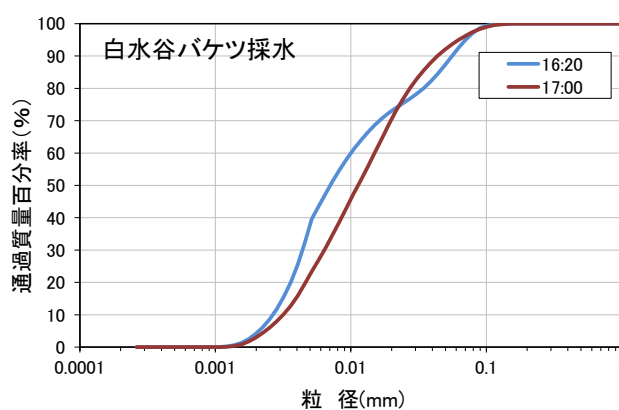


図 4.1.8 白水谷流砂観測所におけるバケツによる表面採水から求めた浮遊土砂の粒度分布 (2014年10月13日)²⁾

【参考文献】

- 1) 山地河道の流砂水文観測における濁度計観測実施マニュアル（案），国土技術政策総合研究所資料 第792号（平成26年）
- 2) 田村圭司・久保正和・内田太郎・水山高久・小杉賢一郎・小菅尉多・永田葉子（2015）：六甲山系における濁度計と浮遊砂観測，平成27年度砂防学会研究発表会概要集，B22-B23.
- 3) 横山勝英（2002）：濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察，土木学会論文集，698(II-58)，93-98.
- 4) 岡本敦・内田太郎・林真一郎・木下篤彦・水垣滋・吉村暢也・小菅尉多（2013）：山地河道における濁度計を用いた流砂観測の課題と対応，平成25年度砂防学会研究発表会概要集，B22～B23.
- 5) 岡本敦・内田太郎・林真一郎・吉村暢也・鶴田謙次（2013）：浮遊砂サンプラーを用いた浮遊砂粒径に関する調査，平成25年度砂防学会研究発表会概要集，A226-A227.
- 6) 田村圭司・内田太郎・森東哲郎・日野健・小菅尉多・木下篤彦（2014）：六甲山系における水文・流砂観測，砂防学会誌，66(6)，82-86.
- 7) 西川 一・西村友之・伊藤隆郭・長山孝彦・後藤 健・矢下誠人・水山高久・藤田正治・宮本邦明（2015）：津ノ浦下流砂防堰堤における掃流砂・浮遊砂・ウォッシュロードの観測，平成27年度砂防学会研究発表会概要集，B60-B61.

4.2 ハイドロフォンによる掃流砂観測の課題

ハイドロフォンを用いた掃流砂観測の課題として、

- ① 複数の土粒子がほぼ同時にハイドロフォンに衝突した場合に音響波形が相互に干渉するため、それぞれ個別に衝突する場合に比べて音響波形が小さくなる。そのため、音響波形の干渉による減衰の影響を評価しないと掃流砂量が過小評価になるおそれがあること¹⁾
- ② 掃流砂として流下している土粒子の一部がハイドロフォンに衝突しないため、掃流砂量が過小評価になる場合があること²⁾
- ③ 流水によるノイズが計測される音響波形に影響するため、衝突音が小さい粒径の小さい土粒子の衝突を検知できないこと³⁾
- ④ 金属管の音響特性による音響波形に上限値があるため、粒径の大きい土粒子の計測が難しいこと⁴⁾
- ⑤ 河道内において横断方向に掃流砂量のばらつきがあるため、ハイドロフォンの計測結果が当該箇所の掃流砂量を代表していない可能性があること⁵⁾

などが指摘されている。これらの計測技術上の課題が観測結果に及ぼす影響を定量的に把握しておくことは全国的に蓄積されつつある流砂観測データの解析において重要である。

3章で整理した掃流砂量のデータは、鈴木ら⁶⁾の提案した合成音圧法により、音響波形から掃流砂量に変換されたものである。以下では、合成音圧法を用いた場合の①～⑤の課題について考察する。

1) 干渉の影響

合成音圧法を用いた場合、音響波形を流砂量に変換する際に干渉の影響は評価できていることが水路実験²⁾や現地観測⁷⁾により確認されている。

鈴木ら(2013)は天竜川水系と田代川流域の坊主平砂防堰堤における観測結果を基に、合成音圧法を用いて音響波形データから掃流砂量・掃流砂の代表粒径に変換した結果と掃流砂の直接採取による計測結果を比較した³⁾。その結果、単位幅掃流砂量が 10^{-6} (m³/m/s)以上のとき、ハイドロフォンと直接採取による観測結果は比較的良く一致することを示し、合成音圧法を用いた場合、音響波形を流砂量に変換する際に干渉の影響はある程度評価できていることを確認した(図4.2.1)⁷⁾。

2) 非衝突の影響

掃流砂といえども、サルテーションなどの現象が見られ、必ずしも河床近傍のみを流下するわけではないことが広く知られている。そのため、掃流砂の全てが必ずしもハイドロフォンに衝突しないと考えられる。内田ら²⁾は水路実験において衝突率を推定する手法を提案した。この手法を用いて、水路実験によりハイドロフォンに土粒子が衝突する割合(衝突率)について調べた結果を図4.2.2に示す。なお、実験方法は、蒲原ら(2015)⁸⁾を参照

されたい。実験結果より、衝突率は無次元掃流力が大きくなるに従って小さくなる傾向が見られ、無次元掃流力が0.1以上0.3未満では、衝突率は0.3から0.7の値となることが確認された。

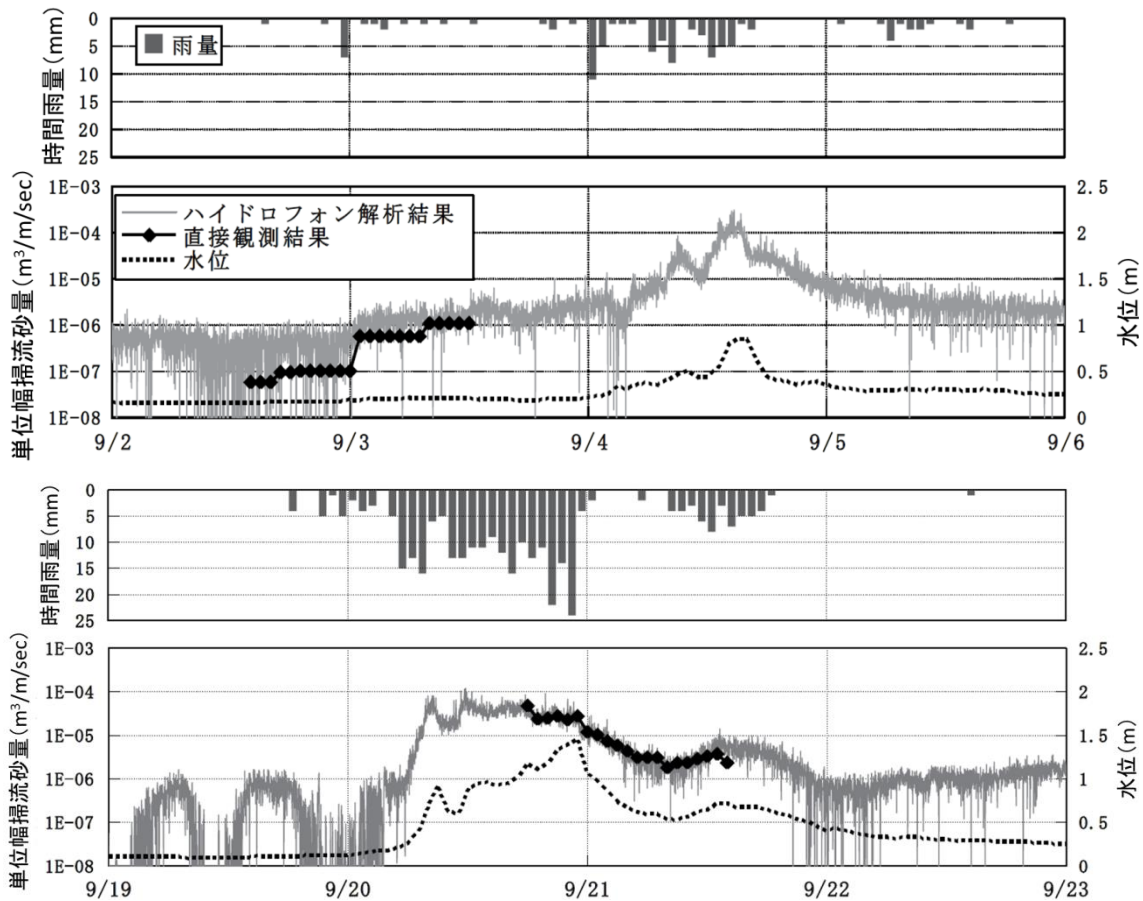


図 4.2.1 平成 23 年台風 12 号時 (上), 15 号時 (下) の時間雨量, 水位, ハイドロフォンによる単位幅掃流砂量および直接採取による観測結果⁷⁾

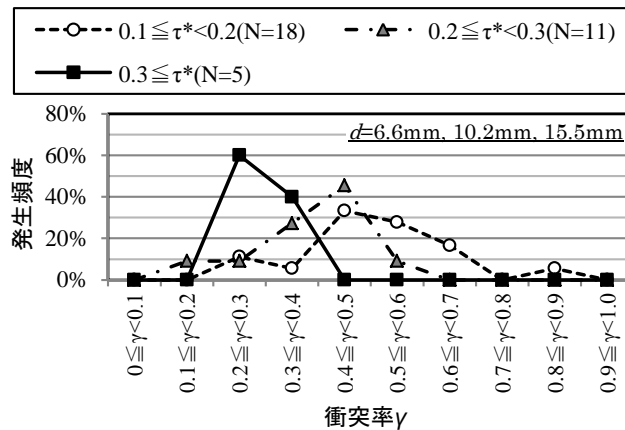


図 4.2.2 水路実験で求めた衝突率

3) 流水によるノイズの影響

水路実験において粒径が小さい(3~6mm)場合には、衝突音が流水などのノイズより小さくなり検知できないこと指摘されている²⁾。姫川水系平川流域の源太郎堰堤ではハイドロフォンの基本特性を把握するための現地実験が行われた¹⁰⁾。実験の結果、流砂の運動エネルギーが 3.0×10^{-8} (kg m²/s²) 以上(粒径2.0mm以上の流砂が衝突した場合)のときはハイドロフォンの音響波形の大きさは流砂の運動エネルギーと明瞭な正の相関が見られた(図4.2.3)⁹⁾。このことから、ハイドロフォンにより流砂量を推定する場合には、運動エネルギーが 3.0×10^{-8} (kg m²/s²) 以上であることが条件であることが示唆された¹⁰⁾。

また、富士川水系大武川流域ではハイドロフォンの計測値(合成音圧法により掃流砂量に変換)と観測ピットにおける計測値を比較した結果、ハイドロフォンによって粒径1~3mm以下の掃流砂は計測できないと仮定した場合、ハイドロフォンの計測値と観測ピットにおける計測値がおおむね一致することを示された(図4.2.4)¹⁰⁾。

一方、現地観測においては、ほぼ掃流砂がないと考えられる低水時であっても流水によるノイズにより一定の掃流砂量が算出される場合がある。これに対しては無降雨時の音響波形を流水によるノイズとして、流水によるノイズの影響を取りのぞく手法が提案されている⁷⁾。本資料の3章で示したデータにおいても同様な処理を行っている。

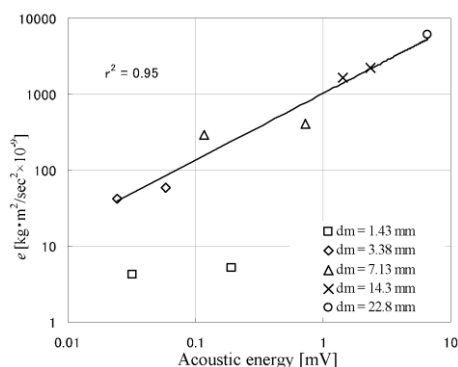


図 4.2.3 個別衝突実験における音響波形(音圧)の最大値と運動エネルギーの関係⁹⁾

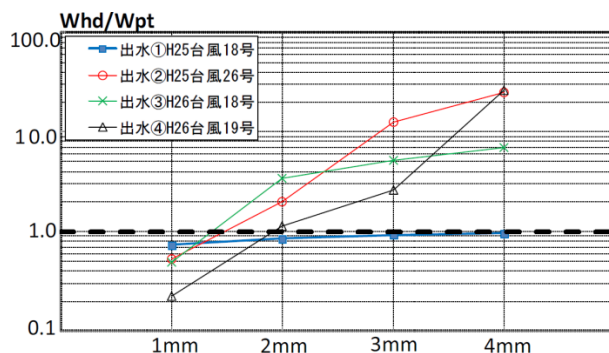


図 4.2.4 ハイドロフォンで計測された掃流砂量と土砂捕捉ピットで捕捉されたある粒径以上の土砂量の比と閾値とする粒径の関係¹⁰⁾

4) 音響波形の上限値の影響

ハイドロフォンによる音響波形の大きさは衝突する土粒子の運動量や運動エネルギーが大きくなるに従い大きくなることが現地実験や観測により確認されてきた（図 4.2.3, 図 4.2.5）^{9),11)}。しかし、金属管の音響特性による音響波形に上限値があるため、流砂の運動量・運動エネルギーが大きい領域では流砂の運動量・運動エネルギーが大きくなっても音響波形の大きさが変化しないことが指摘されてきた⁴⁾。

一方、蒲原ら（2015）の実験⁸⁾においては、図 4.2.6 に示すように音響波形の最大値に明瞭な頭打ちの傾向は確認されなかった。このことは、少なくとも本実験の範囲（粒径 16mm 以下、土粒子の運動量 150g cm/s 以下の範囲では、金属管の音響特性による音響波形の上限値の影響は見られないことが考えられる。

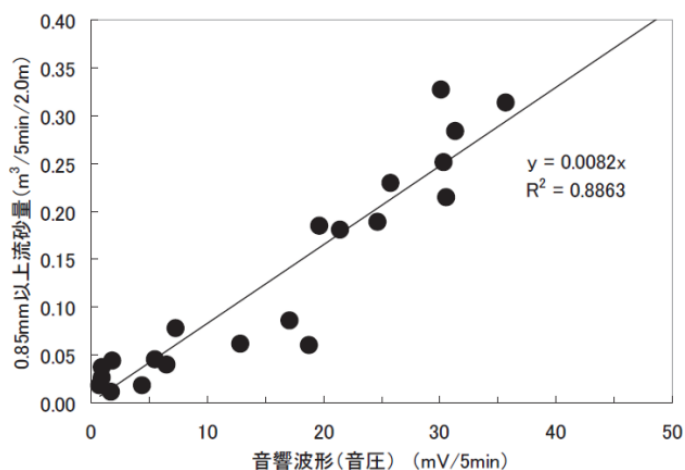


図 4.2.5 六甲山地白水谷流砂観測所におけるハイドロフォンの音響波形（音圧）と直接採水から求めた流砂量（0.85mm 以上）の関係¹¹⁾

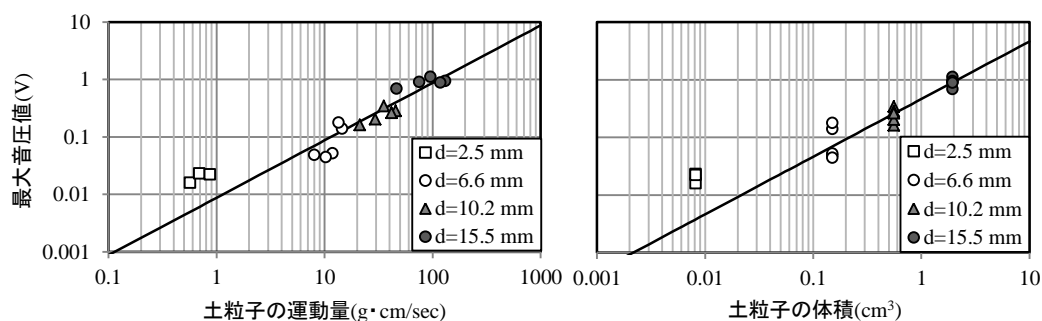


図 4.2.6 水路実験で求めた土粒子の体積・運動量と音響波形の最大値の関係

5) 横断方向のばらつきの影響

掃流砂は横断方向に大きなばらつきを有するため、河道の一部のみを計測している現行の手法では、場所によっては河道全体を代表していない可能性も考えられる。実際、姫川水系平川流域の源太郎堰堤では1つの断面で複数のハイドロフォンで計測した結果、掃流砂量が異なることが観測されている（図 2.2.2 参照）⁵⁾。

中谷ら（2010）は魚野川本川の大野原橋で流心部と右岸付近の 12.5m 離れた 2 箇所で観測ピットによる観測を行い横断方向の流砂量の分布を定量的に評価した（図 4.2.7）¹²⁾。その結果、5 分ごとに計測した逐次値はばらつきが大きく流心部と右岸部で相関はなかったものの、出水ごとで見た場合は両者に相関が見られ、回帰直線の傾きも 1 に近かった。さらに、ハイドロフォンによる計測値から求めた掃流砂量と砂防堰堤等の堆砂測量から求めた流砂量の比較からは掃流砂量がハイドロフォンにより良好に観測できていることが示唆されている（図 3.2.1 参照）¹³⁾。以上の結果から、1 出水上の期間を対象とした場合、ハイドロフォンによる観測は当該断面の流砂特性を表している可能性が考えられる。しかし、横断方向のばらつきの程度を定量的に評価した事例は少なく、今後はデータを蓄積し、横断方向の流砂のばらつきの実態の把握・評価手法の構築を進めていく必要がある。

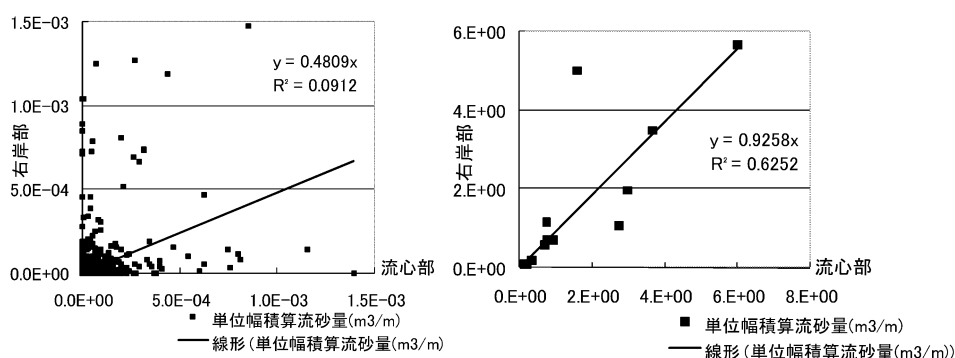


図 4.2.7 魚野川流域大野原橋における流心部と右岸側に設置された観測ピットから求めた流砂量の関係（左：逐次値（5 分間の積算値），右：出水ごとの積算値）¹²⁾

【参考文献】

- 1) 例えば、鈴木拓郎・水野秀明・小山内信智（2010）：音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂量計測手法に関する基礎的研究，砂防学会誌，62(5)，18-26.
- 2) 例えば、内田太郎・吉村暢也・林真一郎・鶴田謙次・鈴木拓郎・長谷川裕治・蒲原潤一・水山高久（2015）：ハイドロフォンの衝突率に関する実験，砂防学会誌，67(5)，24-29.
- 3) 例えば、小田晃・長谷川祐治・水山高久・野中理伸・宮本邦明（2003）：水理模型実験におけるハイドロフォンを用いた流砂量計測(その 2)ー粒径と感度の関係についてー，平成 16 年度砂防学会研究発表会概要集，82-83.

- 4) 例えば, Goto, K., Itoh, T., Nagayama, T., Kasai, M. and Marutani, T. (2014) : Experimental and theoretical tools for estimating bedload transport using a Japanese pipe hydrophone , *International Journal of Erosion Control Engineering*, 7, 101-110.
- 5) 例えば, 判田乾一・地中浩・石川一栄・宮澤和久 (2013) : 姫川流域における土砂移動モニタリング, *砂防学会誌*, 66(2), 74-78.
- 6) 鈴木拓郎・水野秀明・小山内信智 (2010) : 音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂量計測手法に関する基礎的研究, *砂防学会誌*, 62(5), 18-26.
- 7) 鈴木拓郎・内田太郎・岡本 敦・高橋健太・山下伸太郎・小菅尉多・福本晃久 (2013) : 音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂観測手法の現地適用性の検証, *砂防学会誌*, 66(1), 4-14.
- 8) 蒲原潤一・内田太郎・田中健貴・吉村暢也・鶴田謙次 (2015) : ハイドロフォンの衝突率・検出限界に関する水路実験, 平成 27 年度砂防学会研究発表会概要集, B268-B269.
- 9) Kanno, T., Yoshida, K., Miyazawa, K. and Hida, Y. (2010) : Bedload detection with a pipe geophone: field experiments at the Gentaro Sabo Dam on the Hira river, *Int. J. Ero. Cont. Eng.*, 3, 126-129.
- 10) 光永健男・守谷武史・内田太郎・富田邦裕・叶正興 (2015) : 富士川砂防事務所管内における流砂量観測, *砂防学会誌*, 68(1), 83-87.
- 11) 田村圭司・内田太郎・森東哲郎・日野健・小菅尉多・木下篤彦 (2014) : 六甲山系における水文・流砂観測, *砂防学会誌*, 66(6), 82-86.
- 12) 中谷洋明・鶴田謙次・吉村 暢也 (2010) : 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, *砂防学会誌*, 63(3), 11-18.
- 13) 岡本敦・内田太郎・林真一郎・木下篤彦・水垣滋・吉村暢也・小菅尉多 (2012) : 山地流域における流砂観測データの収集及び解析, 平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集, 176-177.

【参考】ピット掃流砂計測装置などを用いて計測した掃流砂量とハイドロフォンの計測値から経験的に掃流砂量を変換する手法における干渉・非衝突の影響について

ハイドロフォンを用いた総流砂量の推定は、当初、計測された土粒子の衝突音を変換器により数段階で増幅させ、その音響波形の振幅が閾値を超える回数（パルス数）を計測し、ピット掃流砂計測装置などを用いて別途計測した掃流砂量とのキャリブレーションから得られた相関を用いる手法が主であった^{a)}。このパルス数を用いた方法はデータの取り扱いが容易であるなどの利点があるが、流砂量が多いときにはパルス数が減少し、パルス数と掃流砂量が正の相関関係でなくなってしまう課題があった。それに対し水山ら^{b)}により、流砂量の多い場合の計測手法として、音響波形の大きさもしくはその積分値とピット掃流砂計測装置などを用いて別途計測した掃流砂量の関係を用いて、掃流砂量を計測することを提案された。これらの別途求めた流砂量とハイドロフォンの計測値の相関性を見て、経験的な換算式から流砂量に変換する場合は、①の干渉の影響と②の非衝突の影響は2つの影響がかけ合わさった形で経験式中で評価されているため、別途①、②の影響を考慮する必要はない。

【参考文献】

- a) 例えば、水山高久・野中理伸・藤田正治（2002）：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，55(3)，56-59.
- b) 水山高久・松岡美和・野中理伸（2008）：流砂量の多い状態のハイドロフォンによる流砂計測（音圧データの取得），砂防学会誌，61(1)，35-38.

5. おわりに

「1. はじめに」でも述べたように山地河川における流砂観測は、砂防基本計画、総合的な土砂管理の推進、国土保全のための流域監視のために重要である。しかしながら、山地河川における流砂の連続観測は困難な部分が多くあり、データの蓄積が進んでいなかった。これに対して、近年、直轄砂防事務所において積極的に流砂観測を実施されており、非常に多くのデータが蓄積されてきた。

また、本資料でとりまとめたように、数多くの成果が挙げられつつある。本資料が今後の流砂水文観測の実施及びデータの分析・利活用の一助になれば幸いである。

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 887

March 2016

編集・発行 国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地

企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675