

流砂観測技術の高度化を踏まえた  
流砂系総合土砂管理手法に関する研究

2023 年

富田 邦裕

# 目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 はじめに	1
1.1.2 河川の治水機能とダムの治水機能への影響	2
1.1.3 河川環境, 景観, レクリエーションと土砂管理の重要性	3
1.1.4 エネルギーの供給場としてのダムと土砂による影響	3
1.1.5 ダム堆砂問題 (治水, 利水, 環境)	4
1.1.6 渇水への課題	5
1.1.7 まとめ	5
1.2 土砂のモニタリングの体系	6
1.2.1 土砂の現地観測と評価	6
1.2.2 流砂系における土砂管理の評価	8
1.3 研究の目的	9
1.4 研究の構成	10
参考文献	13
第2章 流砂量観測技術	14
2.1 序説	14
2.2 流砂量観測技術	14
2.2.1 土砂動態の観測手法のレビュー	14
2.3 各土砂移動観測手法の適用位置等	29
2.4 まとめ	30
参考文献	32
第3章 ハイドロフォンの観測技術	33
3.1 序説	33
3.2 基礎理論	33
3.2.1 ハイドロフォンの概要	33
3.2.2 精度	35
3.3 ハイドロフォンの形態による特性比較	42
3.3.1 パイプ型ハイドロフォンの長さの影響	42
3.3.2 パルス式と合成音圧式の特性	43
3.3.3 新型 (プレート型, 肉厚パイプ型) ハイドロフォンの特性	44
3.4 ハイドロフォンの適用範囲	50
3.5 まとめ	54
参考文献	55
第4章 ハイドロフォンの土砂管理への利活用	57
4.1 序論	57
4.2 砂防域	57
4.2.1 富士川流域等	57
4.2.2 利根川流域	62
4.2.3 渡良瀬川流域	65
4.3 ダム域	70
4.3.1 はじめに	70
4.3.2 観測概要	70
4.3.3 結果と考察	72

4.3.4	まとめと今後の課題	78
4.4	まとめ	79
	参考文献	80
第5章	ハイドロフォン以外の流砂量観測技術の土砂管理への利活用	82
5.1	序説	82
5.2	黒部川の事例	82
5.2.1	はじめに	82
5.2.2	監視手法	83
5.2.3	監視方法	83
5.2.4	まとめ	85
5.3	松本砂防事務所管内(姫川、高瀬川、梓川)の事例	86
5.3.1	はじめに	86
5.3.2	対象地区	86
5.3.3	検討結果	86
5.3.4	まとめと今後の課題	90
5.4	富士川流域の事例	91
5.4.1	はじめに	91
5.4.2	検討手法	91
5.4.3	流砂量観測結果と SAR 画像解析結果による土砂収支の比較	97
5.4.4	まとめ	99
5.5	まとめ	100
	参考文献	100
第6章	土砂管理の観点から事業評価手法の提案	101
6.1	序説	101
6.2	土砂管理の観点からの事業評価の提案	101
6.2.1	はじめに	101
6.2.2	矢作ダム土砂 BP 事業の概要と効果	102
6.2.3	土砂マネジメントの必要性	104
6.2.4	土砂マネジメントの経済評価	106
6.2.5	まとめ	121
6.3	まとめ	122
	参考文献	123
第7章	流砂観測技術の高度化を踏まえた総合土砂管理の新しい展開	124
7.1	序説	124
7.1.1	総合土砂管理の現状と実情	124
7.1.2	砂防事業者との相互理解と協調	124
7.1.3	流下土砂量のリアルタイム情報と予測	125
7.1.4	ダム等の下流河道における河床地形の変化と環境	125
7.2	高度な土砂観測の必要性、重要性	126
7.3	ハイドロフォン等の土砂観測機器の今後の展望	127
7.4	まとめ	127
第8章	結論	130
	謝辞	135

## 図目次

図 1-1	総合土砂管理計画策定河川の位置図	2
図 1-2	研究の進め方のフロー	13
図 2-1	バンドーン式採水器	17
図 2-2	土研式掃流砂採取器Ⅱ型	18
図 2-3	可搬式流砂捕捉装置	19
図 2-4	濁度計の設置事例	20
図 2-5	濁度と SS 相関図(キャリブレーション式の推定)	20
図 2-6	ハイドロフォンの設置事例	21
図 2-7	TDR 計測システムの概念図	22
図 2-8	TDR 計測波形の例	22
図 2-9	ロードセルとハイドロの時系列図	23
図 2-10	ロードセル付きピット	23
図 2-11	河床変動の経年変化(阿武隈川事例)	24
図 2-12	河床高差分コンター図	25
図 2-13	航空レーザ測深システムの概念図	26
図 2-14	UAV 撮影風景	27
図 2-15	設置型 3D スキャナー	28
図 2-16	InSAR 解析	29
図 2-17	各土砂移動観測手法の河川における適用範囲	30
図 3-1	ハイドロフォンによる掃流砂検知の概念図	33
図 3-2	ハイドロフォンシステムの構成	34
図 3-3	観測機器の設置状況	35
図 3-4	ハイドロフォンとピット堆砂時系列図	36
図 3-5	出水ごとのピット堆砂の粒度分布図	36
図 3-6	最大水深と最大粒径、流砂量重量比	37
図 3-7	観測流砂量と理論曲線の比較	38
図 3-8	下限粒径とハイドロフォン観測値とピット堆砂量の比	39
図 3-9	粒子数 $n$ の衝突率	41
図 3-10	無次元掃流力 $\tau^*$ と衝突率 $r$	41
図 3-11	0.5m, 2.0m ハイドロフォン観測結果の比較	42
図 3-12	水路諸元	44
図 3-13	体積と音圧積分値の相関関係	46
図 3-14	H28 台風 16 号の観測結果	46
図 3-15	プレート型ハイドロフォンの音圧波形	46
図 3-16	パイプ型(肉厚 3mm, 7.5mm)の各鉄球のサイズに反応したセンサー出力電圧	48
図 3-17	パイプ型(肉厚 3mm, 7.5mm)の 32 倍と 128 倍のパルスカウント数の時系列図	49
図 3-18	ハイドロフォンの観測イメージ図	50
図 3-19	粒径と水深の相関図	52
図 3-20	粒度分布曲線	52



図 4-1	流砂量観測位置図	57
図 4-2	大武川計測器設置状況	58
図 4-3	栃原堰堤プレート型ハイドロフォン	58
図 4-4	観測値と理論式の比較	59
図 4-5	流砂量観測結果による土砂流出状況判定概念図	60
図 4-6	富士川砂防_大武川第 50 床固地点	61
図 4-7	利根川水系砂防_鎌田地点	61
図 4-8	観測地点の位置図	62
図 4-9	三原地点の無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係	63
図 4-10	三原地点の河床変動量	64
図 4-11	観測位置図	65
図 4-12	水位と単位幅掃流砂量の相関図	66
図 4-13	Q~Qs 曲線	66
図 4-14	全体構成のイメージ	69
図 4-15	流砂情報表示画面構成 (イメージ)	69
図 4-16	観測地点の概要	71
図 4-17	小渋川大河原地点の観測機器の設置状況	71
図 4-18	鹿塩川鹿塩地点の観測機器の設置状況	71
図 4-19	大河原地点における流量と掃流砂量 (2018 年 3 月:融雪期)	73
図 4-20	大河原地点における流量と掃流砂量 (2018 年 7 月:梅雨期)	73
図 4-21	大河原地点における流量と掃流砂量 (2018 年 9 月:台風期 1)	73
図 4-22	パイプ型による掃流砂計測	73
図 4-23	プレート型による掃流砂計測	73
図 4-24	2018 年大河原における洪水履歴と掃流砂量	75
図 4-25	大河原地点における掃流砂の流入特性	75
図 4-26	鹿塩地点における掃流砂の流入特性	75
図 4-27	流量と掃流砂量の関係 (2018 年 大河原)	76
図 4-28	流量と掃流砂量の関係 (2018 年 鹿塩)	76
図 4-29	大河原地点における無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係	77
図 5-1	不埒谷の位置図	82
図 5-2	UAV 写真撮影	83
図 5-3	地盤高変動図	83
図 5-4	カメラの比較	84
図 5-5	3D レーザースキャナーの観測結果	85
図 5-6	流量減少時の 1 年間あたりの出現回数	87
図 5-7	河道閉塞発生検出可能区間の事例	87
図 5-8	CCTV 画像の解析画面	89
図 5-9	CCTV 画像の解析結果事例	89
図 5-10	対象箇所位置図	91
図 5-11	流域空中写真	92
図 5-12	観測機器の状況写真	92
図 5-13	SAR 画像解析による変位算出フロー	94
図 5-14	調査地域の平面図	95
図 5-15	ブロック分割と干渉解析結果イメージ図	95
図 5-16	各解析期間の河床高変動量縦断面図	96
図 5-17	各解析期間における土砂移動量	96
図 5-18	河道内土砂収支経年変化	96

図 5-19	SAR 画像解析とハイドロフォン等による観測結果の比較	98
図 5-20	SAR 画像解析とハイドロフォン等による観測結果の相関	98
図 6-1	流砂系総合土砂管理の体系	102
図 6-2	矢作川流域の土砂還元に関わる主な施設	103
図 6-3	矢作ダムにおける土砂収支と土砂 BP の効果	103
図 6-4	矢作川における総合的な土砂マネジメントのイメージ	104
図 6-5	矢作川の土砂 B P 完成後の土砂の移動・掘削運搬モデル	107
図 6-6	ダム長寿命化便益のイメージ	109
図 6-7	長寿命化（堆砂の排除）による便益	109
図 6-8	CVM の結果	112
図 6-9	矢作川下流域の河川環境改善への WTP 推定結果	114
図 6-10	海浜環境改善への WTP 推定結果	115
図 6-11	土砂 BP とトラック運搬の B/C	118
図 6-12	土砂 BP とトラック運搬の $C' / C$ の比較	118
図 6-13	土砂 BP とトラック運搬の B/C の比較	120
図 6-14	土砂 BP とトラック運搬の $C' / C$ の比較	120
図 6-15	土砂マネジメント組織の事例	122
図 6-16	期待される土砂マネジメント組織の事例	122
図 7-1	流砂系と主要な管理項目	124

## 表目次

表 2-1	土砂移動観測手法の比較表	15
表 3-1	ハイドロフォン観測値とピット堆砂量	37
表 3-2	下限粒径ごとの捕捉土砂量	39
表 3-3	実験時の水理条件	45
表 3-4	実験時の対象粒径と音響変換機の倍率	45
表 3-5	各ハイドロフォンの特徴の整理	49
表 3-6	ハイドロフォンとピットの流砂量の一致度	51
表 4-1	各施設の観測機器の設置状況	65
表 4-2	足尾砂防堰堤の砂防整備事業	67
表 4-3	中居砂防堰堤の砂防整備事業	67
表 5-1	監視手法の特徴	83
表 5-2	衛星の諸元	93
表 5-3	解析に用いた資料一覧	93
表 5-4	SAR 画像を用いた解析期間	94
表 5-5	SAR 画像解析による土砂移動量	94
表 5-6	SAR 画像解析とハイドロフォン等による観測結果の比較	98
表 6-1	総合土砂管理における経済評価項目	106
表 6-2	アンケート対象地域	111
表 6-3	アンケート回収率と有効回答率	112
表 6-4	コンジョイント分析の結果	113
表 6-5	矢作川下流域におけるコンジョイント分析結果	114
表 6-6	海浜域におけるコンジョイント分析結果	115
表 6-7	費用便益評価の計算表(下流域)	117
表 6-8	費用便益評価の計算表	120

## 第1章. 序論

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 はじめに

近年は地球温暖化の影響もあり，降雨量の増大により大規模な洪水による災害が発生するとともに，次第に降雨の増減の振幅が大きくなり，これまでになかった洪水が発生するリスクも増えている．また，令和4年8月の新潟県村上町における洪水，土石流では，直轄河川荒川の洪水氾濫ではなく，支川などの小河川からの洪水流出や土石流により，土砂と流木が住家を襲い，大きな土砂災害を引き起こしている．

著者は現地に土木学会水害調査小委員会活動の一環で災害調査を行った．地元では羽越豪雨以来の55年ぶりの豪雨災害であったが，55年前の災害とは全く違う土砂災害であったと何人もの地元の方々から聞かされた．つまり，55年前の災害では径が50cm以上の大きな岩石が流れ落ちて来て，いわゆる典型的な土石流の形態であったが，今回は長く大きな流木と細かな土砂，泥流が押し寄せて来た災害であった．細かな成分を含む土砂と，流木が橋梁に引っ掛かり流れを塞いだために，水位が高く上がり迂回流が発生し，これらにより住家などが土砂混じりの水流に埋め尽くされ破壊されたと言う．特に，山の形態が昔と変わっていて，今は経済林である杉・檜等が多く植林され，これらが成長したが，維持管理が十分でなかったために，成長した多くの流木がそのまま流れ落ちて洪水とともに流下し，これら流木が人家近くの橋梁等に引っ掛かり，橋梁の下の河川を塞いで洪水も土砂流もせき止められ，3階の屋根まで届くくらいに高く水位が上がり迂回流により新たな水みちを作って，土砂流が下流の人家等に大きな被害をもたらしたとのことである．これは55年前の土石流の被害とは全く違った形態の災害であり，洪水が土砂や流木を巻き込み大きな被害をもたらしたのが原因であることを示した．すなわち，洪水による浸水被害だけではなく，近年は土砂の流下により流木も含めて大きなエネルギーとなって下流地域に被害を及ぼすことが発生するようになってきている．これは，洪水被害を防ぎ軽減するためには，増大する洪水に対する管理だけではなく，土砂の管理がより重要になってきていることを示している．

平成9年に，河川審議会に「総合土砂管理小委員会」（高橋保委員長）が設立され，総合土砂管理の必要性に関する国としての取り組みが始まった．しかし，その後20年以上経った今でも，現状は大きく進展していない．その理由としては，河川上流の土砂生産領域と砂防領域においては砂防事業者が，その下流のダム領域に関してはダム事業者及びダム管理者が，さらにその下流の河川領域においては，河川管理者である国（国土交通省）や自治体（都道府県，市町村）が管理しており，所掌が分断され，さらに，海岸領域においては国（国土交通省水管理・国土保全局，港湾局と，経済産業省，農林省）及び自治体が管理し，これらの縦割り行政が解消されずに，それぞれの所管の部局の利害や都合が優先されているために，本来目指した水系一環としての便益の創出や課題事項の解消のための真の協力が実施されてきたかどうか疑わしいということが考えられる．水系一貫での土砂管理と水管理及び流域管理が，治水，利水，環境を含めて連携して実施されて来たのであれば，もっ

と多くの河川で総合土砂管理計画が策定されて実践されて来たものと考えられるが、未だ全国で8河川しか策定されず、今後の進捗が望まれる状況にある。

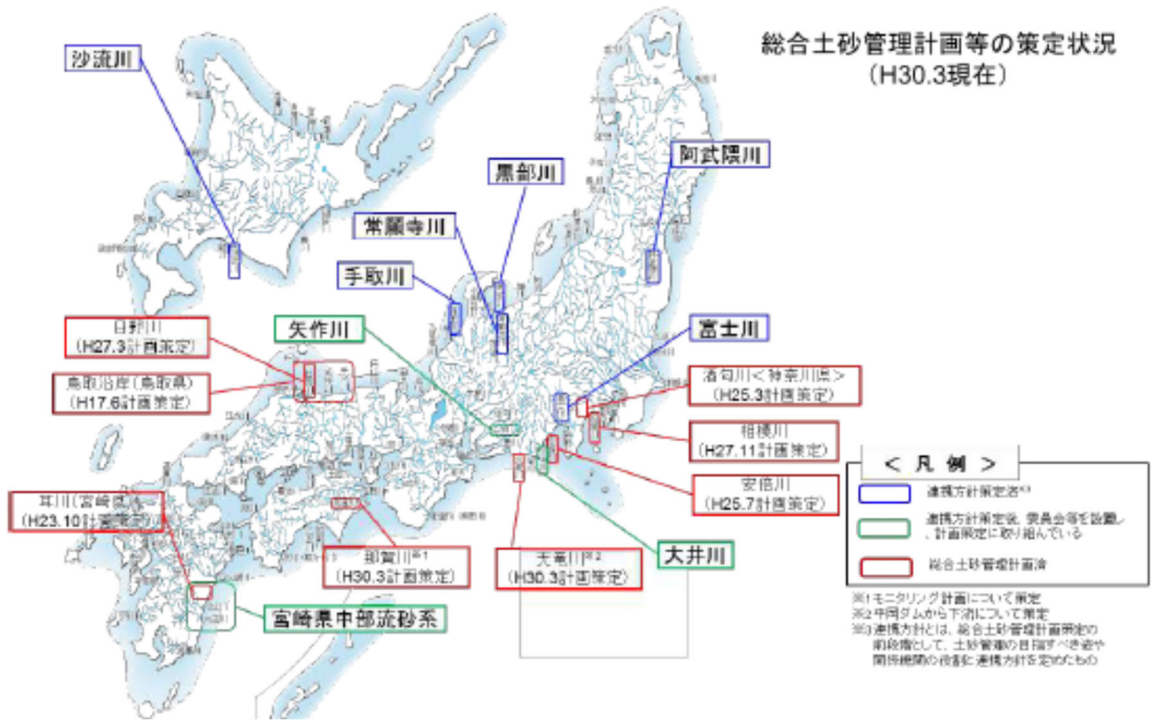


図 1-1 総合土砂管理計画策定河川の位置図<sup>1)</sup>

### 1.1.2 河川の治水機能とダムの治水機能への影響

流砂系河川においては、土砂生産領域や砂防領域などの上流からの土砂の流下により河床に土砂が堆積し、河道断面を小さくして流下能力を小さくして治水機能を減じる可能性がある。よって、流砂は河道の一定カ所にとどまるのではなく、連続して流下していくことが望ましい。

また、後述するように、河川環境面においても、土砂の流下で河床がクレンジング効果で新たに刷新され、アユ等の魚類の餌である藻類等が新鮮になり、河川生態系の新陳代謝が起こる。また、粗粒分の補給という効果もあり、土砂が適度に補給され流下することは、河川環境、生態系の保全の面でも大きな効果がある。

ダムへの土砂の流入によりダム貯水池に土砂が堆積し、ダム貯水容量を減少させる。特に、治水容量への影響は大きく、有効治水容量の減少分は確実に下流の洪水調節効果を低下させる。このため、計画堆砂量に対し想定以上のペースで土砂が堆積している場合などは、貯水池上流に貯砂ダムを作って、貯水池への土砂の流入を減じる方策が取られて来た。しかしながら、実際には、貯砂ダム建設後の維持掘削を完全に実施出来ないことや、土砂の細粒分は貯砂ダムを越えて貯水池に流入してしまうことから依然として堆砂は進行して

いるのが現状である。さらに、ある程度、掘削が実施されている場合も、継続的に貯水池への土砂の流入があり、治水機能を維持するためには常に維持管理掘削等が必要となっており、堆砂問題はダムの治水機能の維持の大きな課題となっている。

### 1.1.3 河川環境、景観、レクリエーションと土砂管理の重要性

平成9年に河川法が改正・施行され、治水、利水に加え環境が河川管理における第3の目的となった。ここでも、従来よりも、河川区域内にある土砂が環境面において大きな役割を担っていることが認識されている。

例えば、魚の産卵場はそれぞれの魚類により好む河床粒径が異なるし、水深、流速などの箇所ごとの河川特性や、土砂と水流が作る平常時の瀬、淵構造により産卵場や生活の場等が決まっている。魚類などの生態系にとって土砂は大きな役割を担う要素である。このために、土砂をせき止めてきたダムや砂防堰堤の下流では、土砂を還元するために置き土を実施して、土砂、特に粗粒分の補給を行うことや、覆砂実験を実施して粗粒分を持つ土砂が生態系に与える効果の計測実験や、箇所ごとに土砂の定着状況の把握などを行ってきた。筆者も、矢作川水系矢作ダムの下流、小丸川水系小丸川、及び相模川水系宮ヶ瀬ダムの下流での置土実験に参画して、土砂補給による生態系へのインパクト・レスポンスに関して、現地観測を行って効果を計測する経験をしてきた。土砂補給は河川の生態環境には必要不可欠なものであり、生態環境を変える重要な要素の一つである。

一方、細粒分は濁度を増し、河川水の濁水の原因にもなる。濁度があまり多くなると魚類の生息環境にも影響し、場合によっては魚の鰓に土砂が詰まって死んだり、アユなどは栄養源となる藻類が食めなくなると、痩せ衰えることもある。もちろん、河川水の濁りが多くなると景観的にも望ましいものではない。

さらに土砂は河川の景観や河川におけるレクリエーションの場の創造にも重要な役割を果たす。例えば、河川内の砂州の形成や、植生にも土砂との関係は大きい。砂礫河原という言葉があるが、自然河川における砂州は適度な粒径の砂礫河原である。細かな土砂、シルト交じりの土砂もあれば、急流河川に見られる玉石レベルの河原もある。これらは、周辺の山地景観や植生などと相まってその箇所の自然にふさわしい景観を形成してきた。土砂の性状に応じて景観と生態系が作られており、適切な河川環境とは、それら土砂との関係から決まる部分が多い。

### 1.1.4 エネルギーの供給場としてのダムと土砂による影響

近年はCO<sub>2</sub>対策が叫ばれSDGsが進められており、化石燃料から自然の力を活用した再生可能エネルギーの活用が叫ばれている。太陽光発電、風力発電や地熱発電が挙げられるが、水の落差を利用した水力発電は古くからの再生可能エネルギーの主役である。我が国の電力構成は、将来は火力発電を極力小さくする方針であり、原子力発電については、かつてはクリーンで発電効率の良いものとして扱われて来たが、原発事故を契機に安全性の観点から、多くの原子力発電所で運営に影響が出ている現状である。今後は、再生可能エ

エネルギー、地産地消のエネルギーへと転換が進められると考えられ、河川水を用いる水力発電のシェアは現在 8%程度であるが、ダム再開発の推進や小水力発電などによりさらに発電量の増大が求められている。

水力発電ダムは、一度設備投資を行えば、その後の燃料費用などは不要であり、構造物もその耐用年数が長く、長期的には非常に安価なエネルギーを供給し続けることが期待できる一方で、長期的な維持管理の課題として、流砂系の河川においては、土砂が上流から流入し、ダム貯水池での堆砂が進行し、利水容量、特に、水力発電による発電容量の減少や、取水口の閉塞などが懸念される。よって、流砂系河川では、平常時からの堆砂の監視と、貯水池掘削などにより貯水池の堆砂進行の管理を行い発電容量の確保をすることが重要である。

#### 1.1.5 ダム堆砂問題（治水、利水、環境）

ダムは、河川総合開発事業により、また、特定多目的ダム法（1957年施行）、水資源開発促進法（1961年施行）などにより、戦後、1930年代から1950年代にかけて多くのダムが計画され建設されて来た。当初は工業化のために発電事業が主体、その後は水道水、工業用水等の確保の利水事業として、そして、治水も含めた多目的ダム事業として利水だけでなく治水、そして、環境も考慮したダム建設が行われてきた。ダムでは細かなシルト混じりの土砂や浮遊砂の多くはダムを乗り越えて放流水と一緒に下流に流されることが多いが、粗い土砂や玉石の多くはダムを通過することが出来ずにダム貯水池に堆砂する。ダム計画では一般に100年間の堆砂容量を持つよう計画され建設されているが、流域で大きな洪水が発生した場合には、一度に大量の土砂がダムに流入し堆砂が進行する。例えば、平成12年の東海豪雨では、約320万 $\text{m}^3$ の土砂が矢作ダムに流入し堆砂した。このような土砂がダムの有効容量を減じて、治水、利水機能が小さくなったダムが現在も増え続けている。さらに、貯水池での土砂堆積により、取水口への堆砂による閉塞や、発電容量の減少により発電機能にも影響して減電につながる可能性もある。

2014年10月に、国土交通省が所管するダムのうち全国の約210カ所を会計検査院が調べたところ、約5割に当たる106カ所で堆砂の進行により治水容量が計画を超えて減少しており、適切な対応がなされないまま放置され、洪水を防ぐ機能が弱まっていることが指摘された。また、ダム湖の上流部においては、河床上昇によって洪水時に浸水する危険性が高まるため、会計検査院は堆砂の解消または軽減を行うことを勧告し、土砂がたまらないよう国土交通省に対策を求めた。具体的には、国土交通省直轄のダムと、国の補助を受け都道府県が建設したダムは全国で計約550カ所あるが、このうち、約2兆4千億円の国費を投じて建設された計約210カ所のダムを検査院が抽出して洪水調節機能などを調査した結果、106カ所で洪水を貯留するために空けておくべき容量に土砂が堆積し、洪水を防ぐ機能が減じていた。また、ダム稼働開始後100年程度の堆砂量を予測した計画堆砂量に対して、約20カ所で実績の堆砂量がこれを上回り、3倍以上にもなっているダムもあった。多目的ダムでは、それぞれの目的に応じて流水を貯留することが生命線であり、特に、治

水容量の 5%を超えて堆砂が進んでいるにもかかわらず放置しているダムが数多くあることを指摘した。

これについて、国土交通省は各ダムの実態を考慮して対策を実施しているものの、予算上の制約もあり、すべてが計画通りには対策できていないとしている。また、土砂の運搬先（処分先）、利活用方法も課題となり、なかなか堆砂対策が進まないのが現状である。置き土などにより下流河川に土砂を流すことや、ダム建設の当初から排砂設備をもつダム（黒部川の出し平ダムや宇奈月ダム等）の建設や、再開発によりバイパス形式の排砂設備を設けるダム（小渋ダム、美和ダム、旭ダム等）など、個別ダムごとに対策が進められているのが現状であり、継続的で抜本的なダム堆砂対策が必要である。

また、多くのダムで土砂が諫止されることにより、下流への土砂供給が止まり、生態系や環境への影響も発生している<sup>2), 3)</sup>。

さらに、近年は、地球温暖化の影響などにより、洪水頻度や大規模な洪水の発生が毎年のように繰り返されている。今後は、これまで以上にダム貯水池への土砂の流入が増大することも懸念され、これらを監視するとともに、土砂生産の抑制策を実施し、一方では、ダム湖に堆砂した土砂は貯水池掘削などにより計画治水容量の維持・確保を進めることが防災上も重要である。

#### 1.1.6 渇水への課題

1980 年頃迄に建設されたダムにはダム下流の維持流量の設定がなかった。このために 1987 年に発電利水のダムについて、当時の通産省、建設省においてガイドラインが定められ、少なくとも 100 km<sup>2</sup>あたり 0.1~0.3m<sup>3</sup>/s を維持流量として流すことが定められた。ここでも、ダムの堆砂が進み維持流量に係る容量が減じているダムがあり、ダム堆砂により維持流量の確保が難しくなることがある。また、地球温暖化により渇水の発生確率が上がってきていると言われている。このためにも、土砂の侵入や堆積を軽減して利水安全度や維持流量を維持する容量を確保することがますます課題になっており、土砂管理の目標にも維持流量のための容量の設定が考えられ、これらを総合化した「土砂管理目標」の設定が求められる。

#### 1.1.7 まとめ

これまでに述べたように、土砂の流下の諫止は、単にダムにより下流河川の河床材料の粗粒化や河床のアーマー化による環境、生態系への影響を与えるだけでなく、利水容量や維持流量のためのダム貯水容量の減少や、下流の河床低下、治水容量の減少から来る治水安全度の低下等といった複合的な河川の治水、利水、環境機能に影響を与えている。

現状ではこれらの課題に対応出来ていない。それには、水系一貫で総合土砂管理を行う必要があるが、現状では土砂のモニタリング（観測）を行い、現状を把握し、水系として必要な対策、施策を打ち立てるなどの対応が実施されていないのではないかとと思われる。それには土砂の動きや性状を正確に観測する「高度な観測技術」、すなわち、一定期間におけ



る土砂収支から計算される移動土砂量だけでなく、掃流砂と浮遊砂の構成比率や粒径分布に至るまで、特に、近年ニーズが高まっている防災への活用には、移動土砂の状況や粒径がリアルタイムにわかる観測技術が開発整備され必要な箇所に設置されネットでつながり、拠点事務所に情報がリアルタイムで集まって監視と情報を整理分析して、防災対策を検討して現場に指示する管理システムが必要であるが、その「土砂管理システム」が整備されていないのが現状である。そして、それをどう管理するのか、「水系一貫の土砂管理システム」がないというのが課題である。また、その必要性さえも関係者に認知され理解されていないのが現状ではないだろうか。

つまり、毎年のように各地で発生している土砂災害、洪水氾濫被害に対し、上流側での土砂の発生を事前に把握して、下流へ伝えること、さらには、次の洪水に備え対策する必要があるのであるが、これも十分に行なわれていないのではないだろうか。また、土砂の観測においても、近年普及が進んだ危機管理型水位計のような、3L（ローコスト、ロングライフ、ローカライズ）を考えた土砂観測システムが必要かつ重要であるが、十分に実施されていない。

現在の流砂系総合土砂管理では、計画論や管理上、土砂基準点を定めているが、土砂に関しては「各基準点で何を目的として、どうモニタリングするのか、そして、どう管理するのか。」という計画、管理思想が曖昧で、先に述べた「水系一貫の土砂管理システム」がないのが現状と言えるのではないだろうか。

さらには、土砂を資源としてとらえ、有効活用する考え方も今後ますます重要となってくる。有限な資源は水だけではない。土砂、特に砂は貴重かつ有限な資源である。

近年の社会経済状況の変化や世論、温暖化等の気象状況の変化を踏まえ、流砂系河川の総合土砂管理の必要性がさらに高まり、それを支える流砂観測技術の高度化は、ますます重要なものとなって来ている。

## 1.2 土砂のモニタリングの体系

### 1.2.1 土砂の現地観測と評価

流砂系河川における土砂観測として以前から実施されて来たのは、河床に土砂ピットを設置して土砂をトラップして、そこに流れてきた土砂の粒径分布や土砂量を調査することや、防災面ではワイヤーセンサーで土石流の発生を感知し下流に知らせること、また、2008年頃からは土砂粒径がメタル管に当たる時の音響から土砂量や粒径を知る「ハイドロフォン」の開発と設置が行われてきた。ヨーロッパではハイドロフォンによる音響データからではなく、河床に設置された鉄板に土砂が当たる時の振動から流下土砂を把握する「ジオフォン」が開発、活用されている（スイスのErlenbach川、Solisダム等）。その他、土砂の観測技術としては、画像処理による土石流の感知、観測や、H鋼に土砂埋設高を感知するセンサーを付けて流下してきた土石流や土砂の堆積高さを感知するセンサーなどがあり、様々な機器、方法が考案されて来た。

河川とその上流の溪流（土砂発生領域）における移動土砂量を知ることは、土砂対策を目

的とする砂防堰堤の計画やダム計画，そして河道計画やそれらの維持管理，環境対策等においてニーズが高く，これまで様々な観測手法が現地で行われてきた．しかし，観測地点が河川上流の険しいところで，設置観測には地形的な困難があり，観測したい豪雨時には危険で近づけない箇所であることが多い．

筆者らは，ハイドロフォンの設置と観測，データ整理等を現地で実施，経験し，その特性や精度向上を試みてきた．ハイドロフォンをはじめとする流砂観測技術は精度的には未だ十分なものではないが，大規模な土砂流出の有無や，それがいつ頃発生したかも察知することが可能な便利な観測手法であり，その箇所に光ファイバーや無線施設があれば，それらに繋いで現地の観測データを送信し離れた事務所等でリアルタイムに送り知ることが出来る．また，リアルタイムでなくても，洪水や土石流後に観測データを回収すれば土砂流出状況や，土砂量，粒径な等の情報が把握出来て，さらに今後の改善策に向けて検討することが出来る．

流砂系河川での地理空間的，経時的な移動土砂量の状況は，地域の形態，河川勾配等から以下に別けられる．

①土砂生産領域，②砂防領域，③ダム領域，④河川領域，⑤下流河川，海岸（沿岸）領域

これらのそれぞれの領域（区間）には，いろいろなハードな防災，利水施設等があり，土砂の移動状況を見て管理運用されている．

ここで，土砂の動きがある程度精度よく観測され，そのデータが河川，砂防等の管理所や防災部局にリアルタイムで送られるシステムが整備されていたら，施設の運用方法を最適にして被害を抑え，避難を的確に行うことが出来る．また，ダムや堰のゲート操作などにより，土砂を下流に流す施策が行われており，土砂を制御できれば，高度な管理運用が出来る．

これまでの土砂管理は静的な情報をもとにダム，堰のゲートなどで管理されて来た．先に述べたように動的な土砂管理を行って，上流から移動する土砂を量，質ともに管理するには，動的な土砂移動のデータがリアルタイムで必要となり，高度な流砂観測技術が必要になる．

総合土砂管理を行うには，高度な流砂観測技術により土砂移動を量，質ともに観測し，それらをもとに土砂を制御することが重要である．リアルタイムで動的な土砂管理を行なうと，より高度な防災や利水運用が可能となる．そのためには高度な流砂観測技術が必要である．

また，近年は地球温暖化等により洪水規模や頻度が大きくなっている．将来訪れる洪水規模を考慮した対策が必要であるが，洪水と同時に出て来る土砂の流出が大きな被害をもたらしている．よって，移動土砂量をリアルタイムで観測し予測することは，防災上も重要である．

さらに，災害後の復旧においても，治水機能を向上させることは勿論のことであるが，環境との調和が求められる．筆者が土木学会で水害調査を行った2019年10月の荒川水系入間川，都幾川の調査においても，樹木の影響を考慮して少なくすることや，土砂掘削によ

り流下能力を上げることが求められた。その一方では、樹木環境による生態、景観の維持増進が求められ、河道掘削や樹木伐採の位置、規模や掘削後の景観、環境配慮が求められた。ここでも流砂観測技術の高度化により、復旧前後の土砂移動をモニタリングして復旧計画や維持管理への活用が可能である。

ハイドロフォンは、計器の長さが2mほどで、河川横断においては、河川幅に比べてわずかな長さでしかない。流下土砂がハイドロフォンに重複して衝突したり、全部が当たっていなかったりすること（検出率、衝突率等）などから、ハイドロフォンの観測値と理論計算値との間には乖離がある。実際に、真の流砂量を観測することは出来ず、一部区間の流砂量から全量を推定するという意味で精度的な課題がある。

これまで、様々な観測技術が開発されてきたが、それらのある時点の堆積土砂から土砂収支を求めた「静的な観測機器」と、リアルタイムでの流砂量を観測する「動的な観測機器」に大別すると、以下のように分類される。これらを目的に応じて適材適所に選択し、土砂防災や、土砂関係の施設計画に役立てることが重要である。

#### (1) 静的な観測機器

- ① 土砂ピット
- ② 土石流ワイヤーセンサー
- ③ 土砂厚計（U字鋼に土砂感知センサーを付けたもの）

#### (2) 動的な観測機器（リアルタイムで観測）

- ① ハイドロフォン（管型、プレート型）
- ② ジオフォン
- ③ 画像解析
- ④ 3D レーザ測量
- ⑤ TDR（浮遊砂）
- ⑥ 濁度計

### 1.2.2 流砂系における土砂管理の評価

前述のように、わが国では動的な移動土砂量は、例えばハイドロフォン、そして、静的な移動土砂量はダム等における堆砂土砂量から土砂収支マップを作成し、水系での土砂の動きを捉える試みが行われて来た。しかし、現在は、砂防基準点等における土砂の量、質（粒径等）の「管理目標」が明確でなく、観測データを踏まえた水系一貫としての管理運用がなされていないのが現状である。

例えば、粗い土砂は上流の砂防領域で止めて、ダム領域では下流に粗粒分を流し、河川領域では治水、利水機能面で土砂の堆積は洪水氾濫をもたらすし、大きな深掘れは河川護岸等の破壊や堤防の水衝部、危険な深掘れ箇所となるので、上流からは適切な土砂の流下と、下流への土砂供給が必要である。また、河床への土砂堆積により河床面での土砂粒径は魚類やその餌となる底生動物、藻類の生育に重要な影響を与え、特に産卵場の条件が土砂粒径や水深、流速等で魚類毎に適用範囲値があることから、河川環境や生態系にとっても、

土砂の量、質における適切な管理が重要である。生態環境的な知見も多くの実績と経験が蓄積され明らかになって来ており、水系一貫の土砂管理の計画論と管理方法について合理的な検討がなされ、それを支える高度な流砂観測技術の整備が必要であると考えられる。

一方、静的な土砂収支はダム貯水池や河川における堆砂量から土砂収支図が作成され、流砂系河川の上流から下流、海岸に至るまでの区間で土砂収支が把握される。ここでは静的な土砂量の整理であり、海まで至った主に細粒分の移動土砂がカウントされていないという問題があるが、重要な箇所については粗粒砂で解決されるので、概ねマクロな状況は把握される。そうした状況の中で、上流の土砂生産領域から砂防領域、ダム領域、河道領域、海岸領域に至るまで水系一貫して土砂の動きについて情報を得て必要なコントロールする等、土砂管理の総合化が未だ十分に行われてはいないのではないかと考える。

このような土砂管理の現地における実践を支える流砂観測技術の高度化は、流砂系河川を多く抱えるわが国では重要な課題であり、さらに、流砂観測技術の高度化が進むと上下流において最適な土砂制御が行えるようになり、河川水の制御と併せて地域に根差した快適な河川づくりに資する。

土砂を制御できる施設としては、①土砂生産領域での管理、②砂防堰堤での監視、ゲート等による管理と制御、③ダムでの監視、管理とゲート等による制御、④河川領域での堰堤や河道整備、親水機能における川づくりの工夫など、治水、利水、環境機能の維持向上、⑤海岸域での土砂の監視、管理により海岸線の管理、漂砂の管理が可能となる。出来ることや技術に濃淡はあるが、これらは防災面、利水面、エネルギー確保や環境面において非常に重要なことである。

### 1.3 研究の目的

本研究は、これまで述べてきたような現状の社会状況を踏まえ、著者らが取り組んで来た流砂観測技術の高度化の取り組みと、それらを活用した流砂系総合土砂管理手法の新たな展開について研究を行ったものである。

特に、ハイドロフォン等の観測技術の高度化を踏まえ、流砂系河川の土砂管理方法への反映が可能となる。これまでの「静的な管理手法」から「動的な管理手法」への転換された場合に可能となる防災対策等について検討を行ったものである。

## 1.4 研究の構成

本稿は、以下の構成よりなる。

### 第1章 序論

#### 1.1 研究背景

##### 1.1.1 はじめに

##### 1.1.2 河川の治水機能とダムの治水機能への影響

##### 1.1.3 河川環境, 景観, レクリエーションと土砂管理の重要性

##### 1.1.4 エネルギーの供給場としてのダムと土砂による影響

##### 1.1.5 ダム堆砂問題 (治水, 利水, 環境)

##### 1.1.6 濁水への課題

##### 1.1.7 まとめ

#### 1.2 土砂のモニタリングの体系

##### 1.2.1 土砂の現地観測と評価

##### 1.2.2 流砂系における土砂管理の評価

#### 1.3 研究の目的

#### 1.4 研究の構成

### 第2章 流砂量観測技術

#### 2.1 序説

#### 2.2 流砂量観測技術

##### 2.2.1 土砂動態の観測手法のレビュー

#### 2.3 各土砂移動観測手法の適用位置等

#### 2.4 まとめ

### 第3章 ハイドロフォンの観測技術

#### 3.1 序説

#### 3.2 基礎理論

##### 3.2.1 ハイドロフォンの概要

##### 3.2.2 精度

#### 3.3 ハイドロフォンの形態による特性比較

##### 3.3.1 パイプ型ハイドロフォンの長さの影響

##### 3.3.2 パルス式と合成音圧式の特性

##### 3.3.3 新型 (プレート型, 肉厚パイプ型) ハイドロフォンの特性

#### 3.4 ハイドロフォンの適用範囲

#### 3.5 まとめ

## 第4章 ハイドロフォンの土砂管理への利活用

### 4.1 序論

### 4.2 砂防域

#### 4.2.1 富士川流域等

#### 4.2.2 利根川流域

#### 4.2.3 渡良瀬川流域

### 4.3 ダム域

#### 4.3.1 はじめに

#### 4.3.2 観測概要

#### 4.3.3 結果と考察

#### 4.3.4 まとめと今後の課題

### 4.4 まとめ

## 第5章 ハイドロフォン以外の流砂量観測技術の土砂管理への利活用

### 5.1 序説

### 5.2 黒部川の事例

#### 5.2.1 はじめに

#### 5.2.2 監視手法

#### 5.2.3 監視方法

#### 5.2.4 まとめ

### 5.3 松本砂防事務所管内(姫川, 高瀬川, 梓川)の事例

#### 5.3.1 はじめに

#### 5.3.2 対象地区

#### 5.3.3 検討結果

#### 5.3.4 まとめと今後の課題

### 5.4 富士川流域の事例

#### 5.4.1 はじめに

#### 5.4.2 検討手法

#### 5.4.3 流砂量観測結果と SAR 画像解析結果による土砂収支の比較

#### 5.4.4 まとめ

### 5.5 まとめ

## 第6章 土砂管理の観点から事業評価手法の提案

### 6.1 序説

### 6.2 土砂管理の観点からの事業評価の提案

#### 6.2.1 はじめに

#### 6.2.2 矢作ダム土砂BP事業の概要と効果

#### 6.2.3 土砂マネジメントの必要性

#### 6.2.4 土砂マネジメントの経済評価

#### 6.2.5 まとめ

### 6.3 まとめ

## 第7章 流砂観測技術の高度化を踏まえた総合土砂管理の新しい展開

### 7.1 序説

#### 7.1.1 総合土砂管理の現状と実情

#### 7.1.2 砂防事業者との相互理解と協調

#### 7.1.3 流下土砂量のリアルタイム情報と予測

#### 7.1.4 ダム等の下流河道における河床地形の変化と環境

### 7.2 高度な土砂観測の必要性、重要性

### 7.3 ハイドロフォン等の土砂観測機器の今後の展望

### 7.4 まとめ

## 第8章 結論

本研究は、図 1-2 研究の進め方のフローにより実施する。

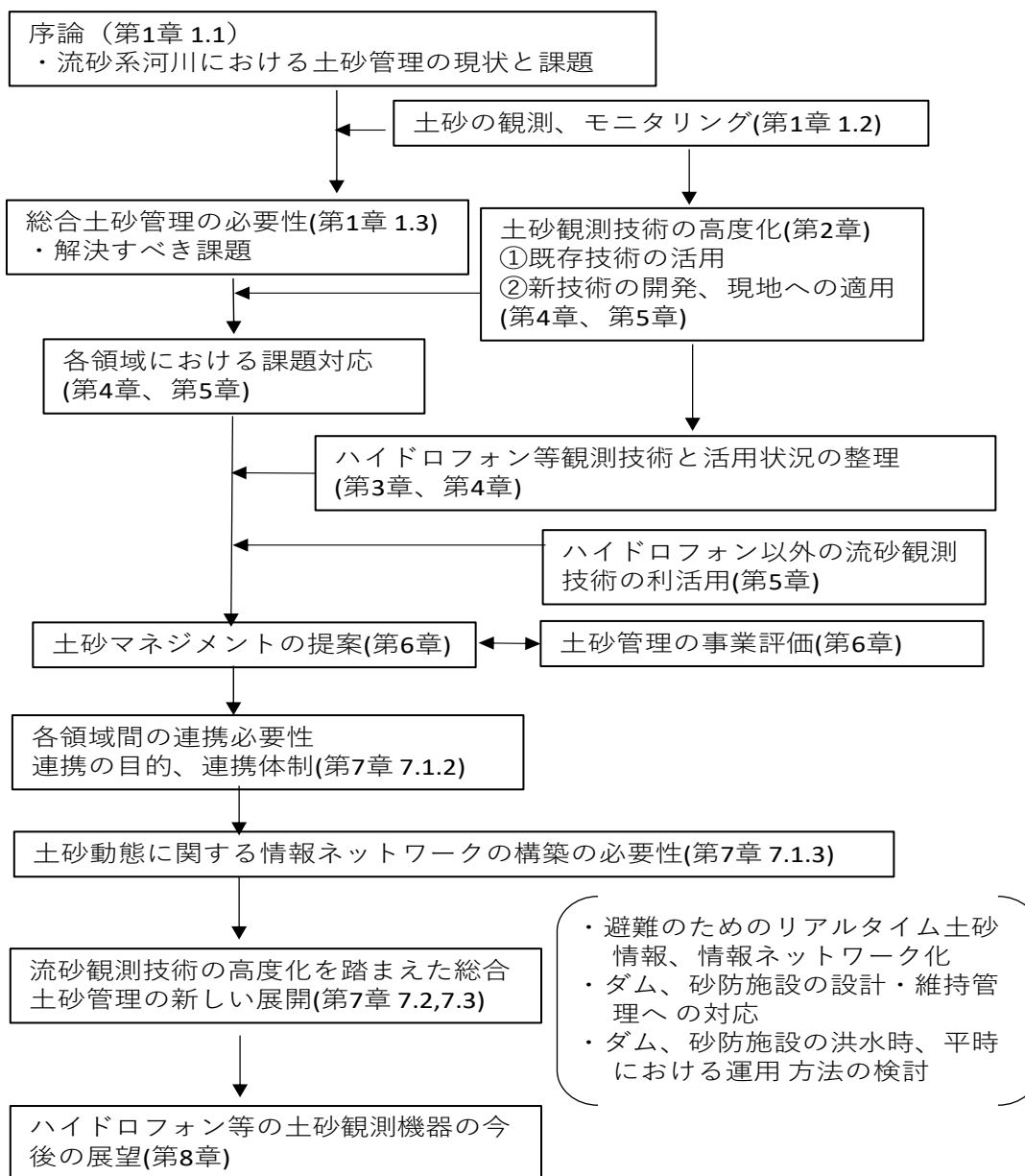


図 1-2 研究の進め方のフロー

参考文献

- 1) 総合土砂管理計画策定の手引き 第 1.0 版 平成 31 年 3 月 一般財団法人国土技術研究センター, 2019
- 2) 池淵周一編著：ダム下流生態系, 京都大学学術出版会, 2009
- 3) Gregory L. Morris・Jiahua Fan 著/角哲也, 岡野真久監修：貯水池土砂管理ハンドブック, 技法堂出版, 2010



## 第2章. 流砂量観測技術

### 2.1 序説

本章においては、既往の流砂量観測技術を土砂の時間的フラックス変化、空間的フラックス変化に分類し、整理した上で、複数の流砂量観測技術の特徴、メリット、デメリットについてレビューする。

### 2.2 流砂量観測技術

#### 2.2.1 土砂動態の観測手法のレビュー<sup>1)</sup>

##### (1) 土砂の時間的フラックス変化の計測と空間的存在量変化の計測

流砂系内における土砂の時間的・空間的移動実態を把握する手法として、現時点では、濁度計、ハイドロフォン等の間接的観測機器によるフラックス計測と、河床縦横断測量、航空レーザ (LP)、ALB (航空レーザ測深)、UAV、InSAR、Google Earth 等の地形測量による手法がある。各手法の主な特徴を示し、それぞれの概要を以降に示す。

表 2-1 土砂移動観測手法の比較表<sup>1)</sup>

観測手法	観測方向	計測項目	精 度	メリット (○), デメリット (△)
バケツ採水	時間的	SS, 粒径	ウォッシュロード, 浮遊砂	○特殊な技術, 準備が不要 ○ウォッシュロード, 浮遊砂を直接補足 △不連続なデータとなる △多くの人手が必要となる
掃流砂採取器	時間的	粒径	掃流砂	○掃流砂を直接補足 △不連続なデータとなる △多くの人手が必要となる
可搬式流砂量補足装置	時間的	SS, 粒径	ウォッシュロード, 浮遊砂, 掃流砂	○ウォッシュ, 浮遊砂, 掃流砂を直接補足 △不連続なデータとなる △重機等の準備が必要である △観測機器が高価で少ない
濁度計	時間的	濁度	最大粒径 30 $\mu$ m, 最大土砂濃度 10,000 mg/L	○継続的なデータ取得が可能, 簡易 △細粒分のみ適用, 計測上限あり
掃流砂間接観測 (ハイドロフォン, ジオフォン)	時間的	掃流砂量 粒径	概ね 2 mm - 100 mm	○連続的なデータを自動取得可能. ○流砂量と粒径が推定できる △換算流砂量の精度に課題あり △検知限界粒径あり
TDR	時間的	濁度	浮遊砂	○連続的なデータが自動取得可能 △細粒分のみ適用 △研究段階であり, 利用実績が少ない
ロードセル付き堆砂ピット	時間的	流砂量 粒径	浮遊砂~掃流砂	○ある期間の流下土砂量を直接捕捉 ○ロードセルにより土砂流下の時系列変化を把握可能 △ピット満杯までの短期間のみ適用 △維持管理, 運用に工夫が必要 △粒径については精度が良くない
河床横断測量	空間的	地形変化量	高さ 2 cm ~ 10 cm	○観測横断面における土砂量の変化を直接に計測 ○複数断面の測量により区間内の土砂収支を把握 △結果としての土砂収支のみ把握, 通過量の把握は不可.

観測手法	観測方向	計測項目	精度	メリット (○), デメリット (△)
航空レーザー測量 (LP)	空間的	地形変化量	高さ ± 15 cm 程度,	○対象範囲内における陸地の地形変化を面的に把握可能. 比較的安価 △水域の計測は不可 △粒径は計測不可
ALB (航空レーザー測深)	空間的	地形変化量	高さ ± 30 cm 程度	○水域を含む面的地形変化の把握が可能 △測深は水質に大きく依存する △やや高価 △粒径は観測不可
UAV	空間的	地形変化量	高さ数 cm ~ 10 cm	○対象範囲内における陸地の地形変化を面的に把握可能 △浅い水域で条件により計測可. ○河床表面の粒径を画像解析により判別可
3D スキャナー	空間的	地形変化量	2mm 程度 ※距離が遠くなると精度が低下	○対象範囲内における陸地の地形変化を面的に把握可能 △粒径は観測不可 △測量範囲が限定的
InSAR	空間的	地形変化量	数 cm 単位の地表変位	○地上に観測機器が不要. 昼夜・天候に関係なく全天候で観測可能 △解析に専門的知識が必要 △観測時期が限定される

## (2) 土砂の時間的フラックス変化の計測

ここでは流砂のうち、フローに該当する時間的フラックス変化を計測できる技術の概要を示す。

### 1) バケツ採水

バケツ採水は、従来から水質調査等で採用されており、橋梁からバケツを投下し、試料を採水し、分析する手法である。採水した試料をSS分析やレーザ分析することで、ウォッシュロードや浮遊砂の土砂濃度、粒度分布を把握することができる。

バケツ採水は特殊な技術が不要であり、簡便に実施できるため、流砂を把握する直接手法としてはメジャーである。

ただし、バケツは軽く表面のみの採水となるため、深度方向の濁度は観測できない。また、ダム湖等の水質調査では、バンドーン式採水器が活用され、深度別の水質調査が実施されているため、出水時の河川の流況次第では、バンドーン式採水器を活用することも有効である。



図 2-1 バンドーン式採水器<sup>2)</sup>

## 2) 掃流砂採取器

掃流砂採取器を用いた流砂観測は、橋梁から掃流砂採取器を投下し、試料を採取し、分析する手法である。採取した試料をふるい分析や重量計測することで、掃流砂の粒度分布、量を把握することができる。

ただし、掃流砂計は重量が大きいため、掃流砂採取器を河川に投下するにあたっては巻上機や搭載型トラッククレーンの機材が必要となる。これらの機材を使用するためには、橋梁の使用許可、占有許可等が必要になる場合があり、制約が大きい。

また、出水時に掃流砂採取器を投下するため、掃流砂計は流れにより安定せずに、掃流砂の捕捉が断続的になると推定される。そのため、採取時の掃流砂採取器の状況をモニタリングし、掃流砂量の評価に適用してよいか判断する必要がある。



図 2-2 土研式掃流砂採取器Ⅱ型<sup>3)</sup>

### 3) 可搬式流砂量補足装置

可搬式流砂捕捉装置は、掃流砂採取器と浮遊砂採取管が組み合わされたものである。浮遊砂採取管は水深別に設置されているため、水深方向の土砂濃度を把握することが可能である。

可搬式流砂量補足装置を用いた流砂観測は、高水敷等から低水路に向けて可搬式流砂捕捉装置を水面下に押し込み、試料を採取し、分析する手法である。採取した試料をレーザー分析、ふるい分析、SS 分析や重量計測することで、ウォッシュロード、浮遊砂、掃流砂の粒度分布、量を把握することができる。

ただし、可搬式流砂捕捉装置は、規格、重量が大きいため、水面下に押し込むにあたってはバックホウ等の重機が必要となる。そのため、可搬式流砂捕捉装置を重機に装着させるには時間を要するため、事前に重機を準備することが制約となる。

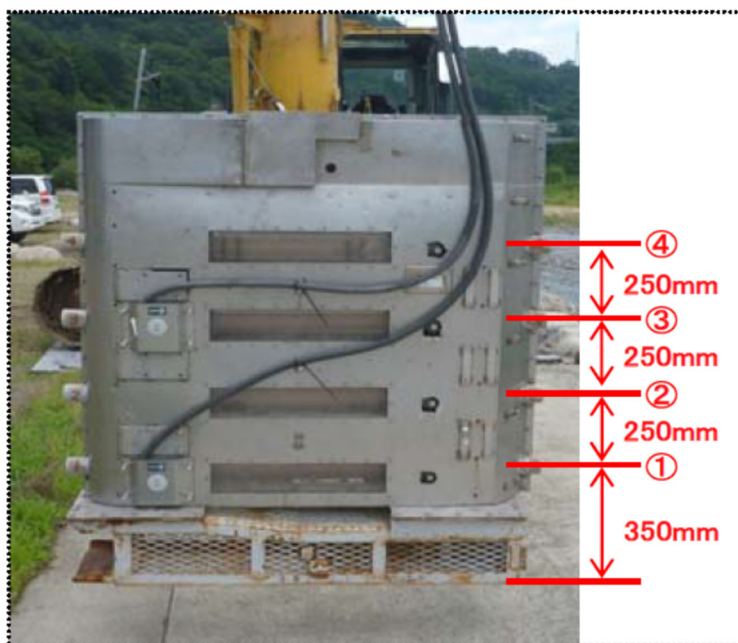


図 2-3 可搬式流砂捕捉装置<sup>4)</sup>

#### 4) 濁度計

濁度計は、広く使われている浮遊砂・土砂濃度計測装置である。濁度計は、河川に設置しておくことで、連続計測が可能であり、土砂移動のタイミング把握、年間及び出水時の浮遊砂量把握、また流域管理に対して有用である。計測に用いられる代表的な原理として、透過型と散乱型がある。前者は、機器から発した光の水中での透過率を測定し、その透過率と濁度の相関に基づいて算出する。また、後者は、液面に光を当て、その散乱の程度や性質から計測する方法である。

濁度計は、簡便性から広く使用されているが、およそ  $30\ \mu\text{m}$  を超える粒径による濁りが観測できない点や、浮遊砂を構成する物質の透過・散乱に対する性質差が誤差を生む点に注意を払う必要がある。

また、濁度計の観測結果は濁度や電圧のアウトプットとなることが多く、直接土砂濃度が求まるものではない。そのため、濁度計と観測値と現地の土砂を用いた濁水の土砂濃度の関係を整理し、濁度計から土砂濃度を算定するためのキャリブレーション式を算定する必要がある。



図 2-4 濁度計の設置事例<sup>5)</sup>

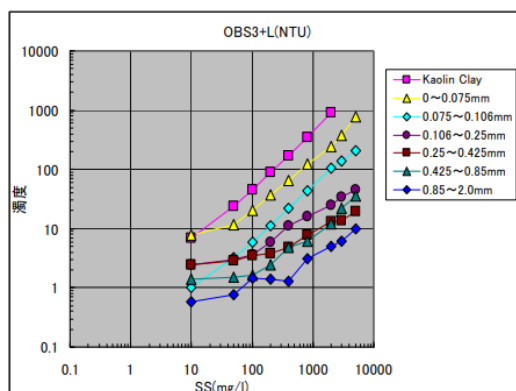


図 2-5 濁度と SS 相関図 (キャリブレーション式の推定)<sup>5)</sup>

## 5) 間接的掃流砂観測（ハイドロフォン，ジオフォン）

間接的掃流砂計測は，直接計測や連続時間的な流砂観測が難しい河川における有用な計測装置として数多くの研究事例が報告されている．これらの研究では，マイクロフォンや振動センサーなどが格納された鋼製パイプやプレートを河床に埋設し，掃流砂の衝突による音響エネルギーや振動を記録する．そして，得られた信号を解析し流砂量や粒径を推定するという過程が一般的にとられる．

実務での使用歴もある代表的な間接的掃流砂計測装置として，日本で開発されたパイプ式ハイドロフォン（Japanese Pipe Microphone, JPM）とスイスで開発されたプレート式ジオフォン（Swiss Plate Geophone, SPG）がある．前者は，河床に設置されたスチールパイプの中にマイクロフォンを導入したもので，高感度（最小で粒径 2 mm 程度の礫まで計測可能）であることが特長で，国内を中心に 300 地点以上で導入されている．しかし，強い衝撃に対する耐性が小さく容易にパイプが変形し，音響特性が変わることによる精度の低下が課題である．一方，SPG は頑丈なスチールプレートの内部に加速度計が格納されており，大きな礫の衝突にも耐えうる強度を持っている．しかしながら，ジオフォンは本来地震動など超低周波振動の計測を対象としていることから，高周波を含む礫の衝突インパクトの計測に関しては精度が低く，数 cm オーダー以上の礫が計測対象である．

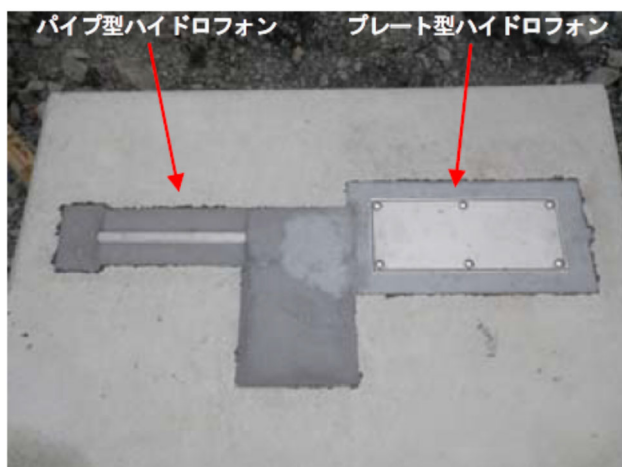


図 2-6 ハイドロフォンの設置事例<sup>6)</sup>



## 6) TDR<sup>7)</sup>

TDR とは、物質の電気的特性である比誘電率を計測し、浮遊砂濃度を観測できる装置である。

TDR 計測システムは、ケーブルテスタとセンサープローブを結ぶ同軸ケーブルで最小単位が構成される。ケーブルテスタから発射された電磁波パルスが同軸ケーブルとセンサーを通過して戻ってくる反射強度の時間変化を計測するものであり、計測結果は横軸が見かけの長さ (= 時間×光速)、縦軸が反射強度の波形で得られる (図 2-8)。この波形を解析してプローブの見かけの長さを求めることでセンサー周辺の物質の比誘電率を計測することができる。

TDR は 1 台の計測器にて多数のセンサーでの計測が可能であることから、河川での浮遊砂の鉛直分布計測が期待できる。

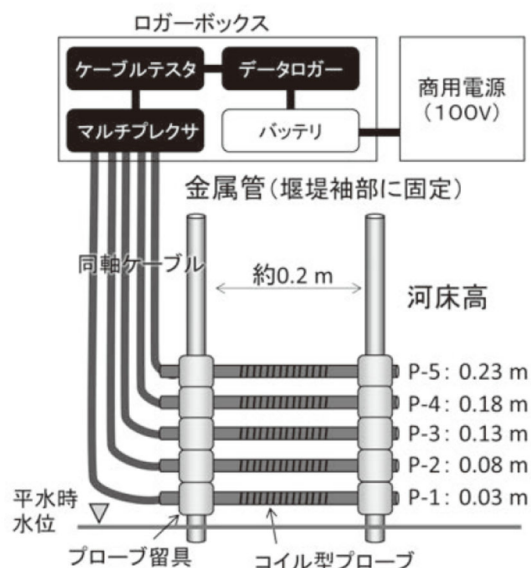


図 2-7 TDR 計測システムの概念図<sup>7)</sup>

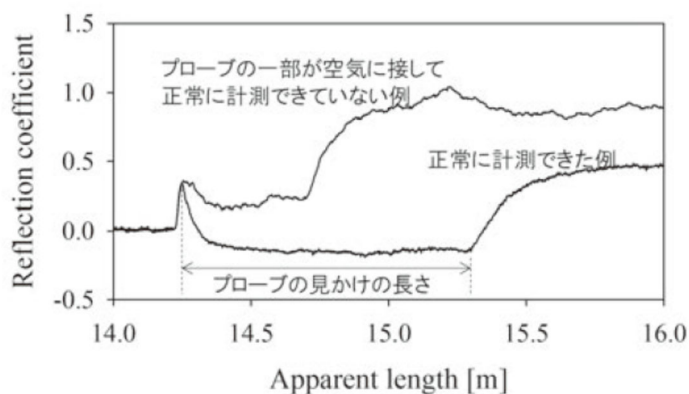


図 2-8 TDR 計測波形の例<sup>7)</sup>

### 7) ロードセル付き堆砂ピット<sup>8)</sup>

河道内にロードセルを装備した堆砂ピット（開口部に開閉装置あり）を設置して、出水時に流下する土砂がピット内へ流入・堆積することによって出水中に流下土砂の量・粒径を直接に計測把握する。

また、ロードセルは経時的に観測可能であるため、経時的な通過土砂量を把握可能である。

加えて、出水後の堆砂ピットの捕捉された土砂の段階的に除去し、除去した土砂の粒度分布を計測することで、流砂の粒度分布を観測することが可能である。

加えて、その上流側にハイドロフォン等を設置すれば、ハイドロフォンによる計測流砂量と堆砂ピットによる捕捉土砂量の比較検討により、間接的観測装置による流砂量観測結果の精度検証及び補正にも利用できる。

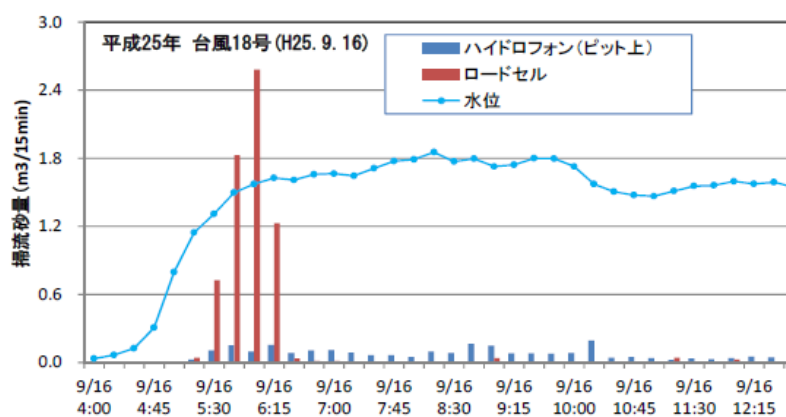


図 2-9 ロードセルとハイドロの時系列図<sup>8)</sup>

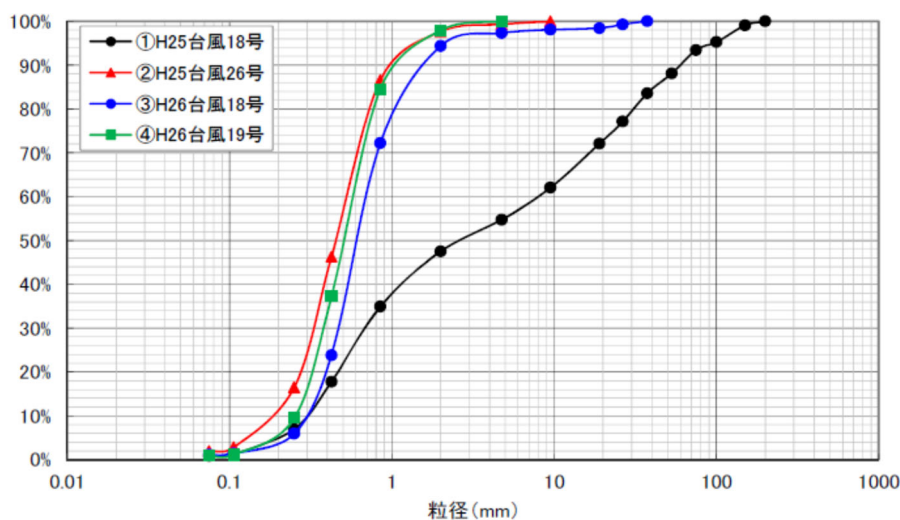


図 2-10 ロードセル付きピット<sup>8)</sup>

### (3) 空間的存在量変化の計測

ここでは流砂のうち、ストックに該当する空間的存在量変化を計測できる技術の概要を示す。

#### 1) 河床横断測量

対象の河道区間において、河川流下方向に複数の横断測量断面を設定し、出水期の前後で河床横断の地形測量を行う。そして、各断面内における土砂量の変化を求めることにより、出水に伴う対象河川区間における土砂量の収支を算出する手法である。継続的に定期河床横断測量を実施すれば、対象区間における河床変動や土砂移動の特徴が把握できる。

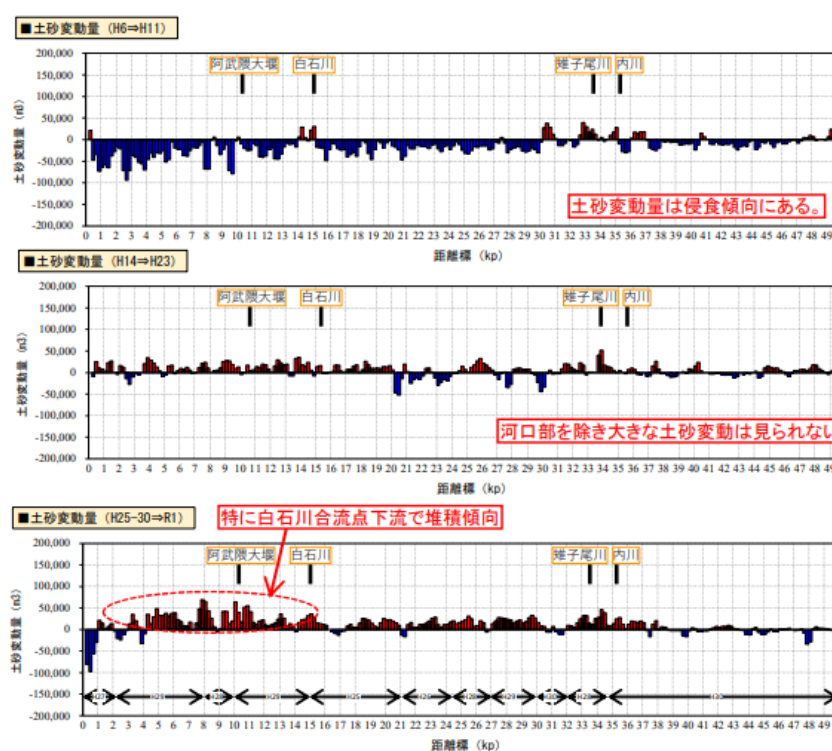


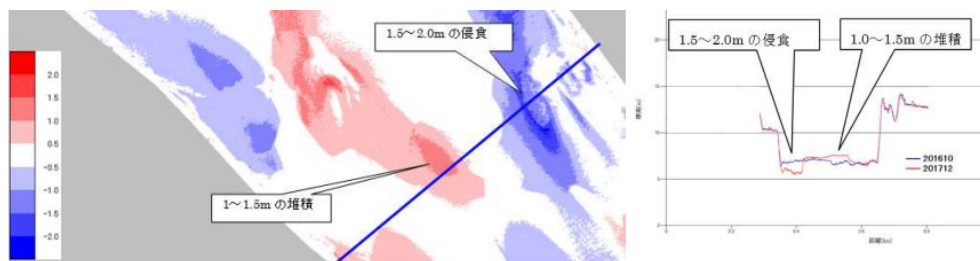
図 2-11 河床変動の経年変化（阿武隈川事例）<sup>9)</sup>

## 2) 航空レーザ (LP)

航空機に搭載したレーザスキャナーから地上にレーザ光 (遠赤外波長) を照射し, 地上から反射するレーザ光との時間差より得られる地上までの距離と GPS 測量機, IMU (慣性計測装置) から航空機の位置情報より地上の標高や地形の形状を計測する測量技術である. 出水期前後の 2 時期の航空測量を実施すれば, この間に流域内で発生した地形変化, 土砂移動の状況 (斜面崩壊, 河道内の土砂堆積, 河床洗堀等) が把握できるが, 移動量などの連続データは取得できない.

## 3) ALB (航空レーザ測深)

2) に示す航空レーザ測量では, 遠赤外レーザ光を用いるため, レーザ光が水面で反射され, 水中の河床面に届かず, 水域の地形測量が不可である. 航空レーザ測深機 (ALB) は, 従来の航空レーザ測量と原理的には同じであるが, 航空機から遠赤外波長のレーザ光と水中を透過する緑波長のレーザ光を同時に照射することで, 陸部と水域部の河床地形データを同時に取得する測量技術である. 但し, ALB の測深性能は, 水域の透明度や水質に大きく影響されるため, 使用に当たっては, 河川の特長, 特に水質に配慮して調査時期を設定することが重要である.



ALB による土砂堆積の解析 (二時期の差分)

図 2-12 河床高差分コンター図<sup>10)</sup>

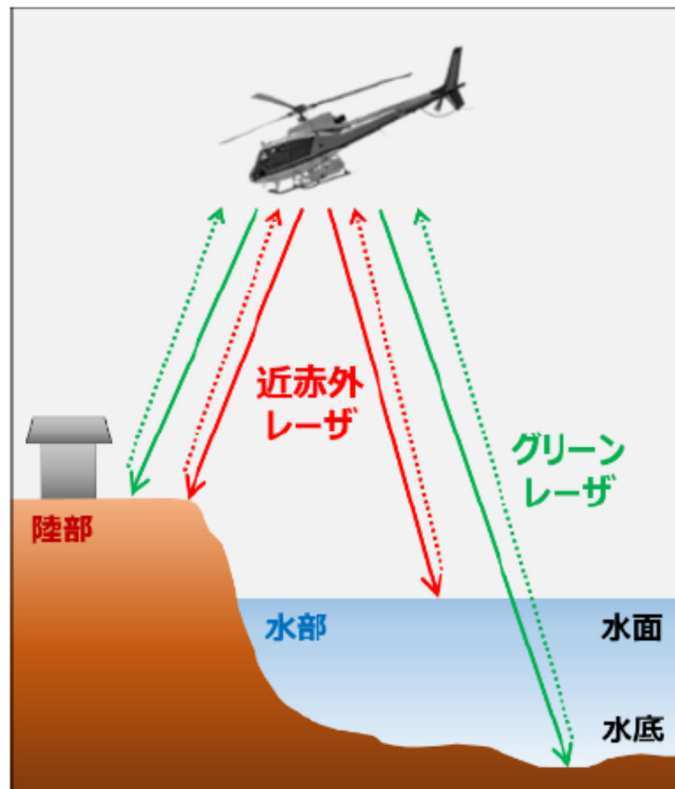


図 2-13 航空レーザ測深システムの概念図<sup>11)</sup>

#### 4) UAV

UAV 搭載のカメラにより空中写真測量が行える。一定の高度 (30 - 150 m など) で飛行する UAV から、カメラを下に向け、撮影範囲を少しずつずらしながら対象範囲全体を撮影する。このとき、縦横の隣り合う画像同士で撮影範囲が十分に重なることが重要である。Metashape や Pix4D など市販ソフトによりステレオ写真測量の解析を行うことで、多数の画像から半自動的に立体地形をおこし、3 次元メッシュモデル、DEM (digital elevation model)、オルソ化画像などが得られる。

また、対象範囲内において、複数点で測量を実施し、精度よい座標を取得し、DEM に反映させることで、数センチレベルの誤差の標高値が期待できる。加えて、UAV に LP もしくはグリーンレーザーを搭載した機種もあり、これらの機種を活用すれば、精度よく標高値を計測できる。

さらに、写真測量とは別に、UAV で撮影した画像から河床表面の粒径の評価を行うことも可能である。



図 2-14 UAV 撮影風景

## 5) 3D スキャナー

3D スキャナーとは対象物にレーザー光を照射し、反射光から戻ってくる時間と照射角度から対象物の空間座標を取得するものである。

そのため、3D スキャナーを活用して、地形を測量することで密な空間座標を取得ことができ、微地形まで表現することが可能となる。3D スキャナーで取得された複数時期の空間座標の差分から、土砂の堆積量、洗堀量を評価することができる。

ただし、3D スキャナーは人力で移動させるため、広い範囲で活用するには多くの労苦がかかる。

また、3D スキャナーは水面下の測量はできず、陸域のみが対象となる。

近年では設置型の3D スキャナーが開発されており、定期的に地形測量を実施することができるため、地形変動が顕著であり、監視が必要な地点への適用が推奨される。

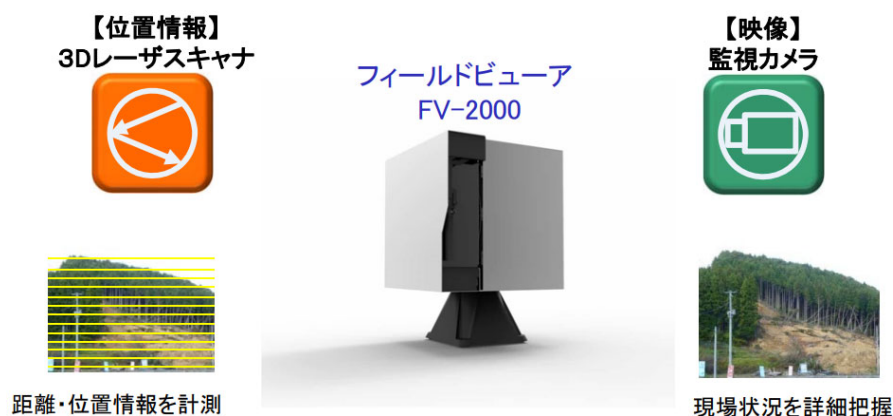


図 2-15 設置型 3D スキャナー<sup>12)</sup>



## 6) InSAR 解析

人工衛星に搭載した合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar) より、マイクロ波を地表面に斜めに照射し、地表面からの後方散波を受信することで取得した画像データを用いて、隣り合った 2 回の観測画像の干渉解析によりその間に生じた地表面変動量が求められる。地上での観測装置が不要で、天候や昼夜に影響されることがなく全天候の観測が可能である。地表の変位を数 cm 単位で解析、確認できる。

図 2-16 に 2017 年に富士川水系・大武川下流の例を示す。約 8.0 km 区間において、2014～2017 年の間に撮影した 8 期の衛星画像を用いて、SAR 画像解析により隣り合った期間内で発生した河道土砂移動量を求めた。これにより、河道内の土砂量の変動を経年的かつ広域的に把握することが可能である。



図 2-16 InSAR 解析<sup>13)</sup>

(上:河道状況航空写真, 下:2 期間の間に生じた比高差のコンター図)

### 2.3 各土砂移動観測手法の適用位置等

2.2 流砂観測技術の表 2-1 で示した各土砂移動観測技術が、河川のどの位置、範囲で適用が可能か示す。各観測手法を観測目的や得られる精度、現地条件などを考慮し、表 2-1 に示すメリット、デメリットも勘案しながら、観測手法を決めることになる。

また、複数の観測手法を併せて実施することにより、単一の方法では精度が良くなかったことも、精度向上した観測が可能となる。ここでは、一般的に考えられる観測手法の適用範囲を河川のセグメントとの関連で図 2-17 に示す。



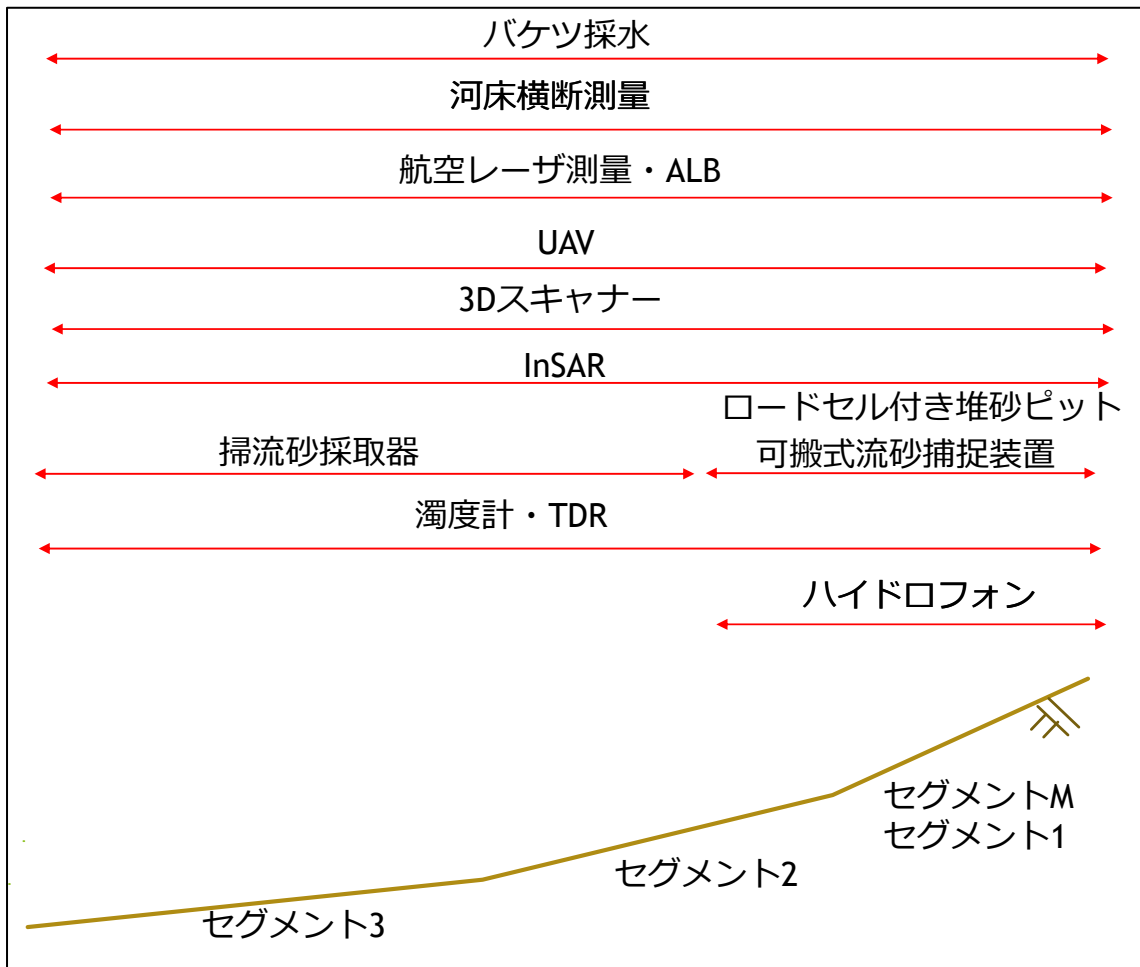


図 2-17 各土砂移動観測手法の河川における適用範囲

## 2.4 まとめ

本章では、既往の流砂量観測技術を土砂の時間的フラックス変化、空間的フラックス変化に分類し、整理した上で、複数の流砂量観測技術の特徴、メリット、デメリットについてレビューした。

土砂の時間的フラックス変化に関する流砂量観測技術では、出水時に流下する土砂を把握することが可能であり、土砂のフローの把握に適用できる。また、こちらの技術は砂防区間で適応されていることが多い傾向にある。

土砂の空間的フラックス変化に関する流砂量観測技術では、出水前後に観測データの差分から河道等の土砂量の変化（堆積、洗掘）を把握することが可能であり、土砂のストックの把握に適用できる。また、こちらの技術は流域一貫で適用されているが、定期的には実施されているのは、ダム、河川区間であることが多い。

上記に示すとおり、土砂の時間的フラックス変化、空間的フラックス変化に関する流量観測技術により観測されるデータの精度や適用範囲等が異なるため、総合土砂管理に関する

運用データを評価にするにあたっては、評価対象を明確にした上で、モニタリングに適用する流砂量観測技術を選定する必要がある。

なお、第3章、第4章で、ハイドロフォンを主とした流量観測技術の特徴、利活用方法の検討を行い、第5章ではハイドロフォン以外の流砂量観測技術の利活用方法の検討を行う。

## 参考文献

- 1) 小柴孝太,富田邦裕,叶正興,小林草平,角哲也,土砂観測技術を用いたダムの土砂管理の高度化,ダム工学投稿予定
- 2) 宮本理研工業 株式会社 HP
- 3) 健全な水循環系・流砂系の構築に関する研究,国総研プロジェクト研究報告第 16 号 平成 19 年 2 月,2007
- 4) 富田邦裕,叶正興,井内拓馬,重村一馬,田中秀基,小町谷章,小暮一也,角岳志,山野利勝,藤田正治:富士川水系・大武川第 50 床固工における浮遊砂観測結果の分析と考察:第 67 回平成 30 年度砂防学会研究発表会概要集 p.379-380,2018
- 5) 蒲原潤一,内田太郎,林真一郎,矢部浩規,渡邊和好,水垣滋: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) 国総研資料 第 792 号 平成 26 年 3 月,2014
- 6) 富田邦裕,叶正興,重村一馬,田中秀基,藤田正治,堤大三:ハイドロフォンデータを用いた上流域の土砂流出状況の評価手法に関する提案:第 64 回平成 27 年度砂防学会研究発表会概要集 p.A-128-129,2015
- 7) 内藤秀弥,宮田秀介,岸本昌之,服部浩二,石塚忠範,永田葉子,小菅尉多,藤田正治:TDR による土砂濃度計測を用いた山地河川での浮遊砂鉛直分布の観測,砂防学会誌,Vol. 71,No. 4,p. 3-12,2018
- 8) 叶正興,富田邦裕,藤田正治,堤大三,内田太郎,光永健男,守谷武史,渡辺正彦:大武川におけるハイドロフォンを用いた流砂量観測とその評価:第 64 回平成 27 年度砂防学会研究発表会概要集 p.A-126-127,2015
- 9) 第 119 回 河川整備基本方針検討小委員会 参考資料 2-4 阿武隈川水系河川整備基本方針 土砂管理等に関する資料(案) p10
- 10) 河川管理用三次元データ活用マニュアル(案) 令和 2 年 2 月,国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 河川保全企画室,2020
- 11) 島内尚之,高原晃宙,青木謙治:砂防分野における航空レーザー測深(ALB)の適用について:令和 2 年度四国地方整備局管内 技術・業務研究発表会,2020
- 12) 三菱電機エンジニアリング株式会社 HP
- 13) ハイドロフォンおよび偏光 SAR データを用いた動的土砂管理に関する検討:第 78 回年次学術講演会投稿予定

### 第3章. ハイドロフォンの観測技術

#### 3.1 序説

本章においては、流砂観測技術のうち、ハイドロフォンの観測技術に着目して記載する。

既往の流砂量調観測において、バケツ採水や濁度計による浮遊砂，ウォッシュロードの観測事例は多い。

しかし、ハイドロフォンによる掃流砂の観測事例は少なく、今後より多くの地点に拡大することが望まれる。

本章では、ハイドロフォンの基礎理論，ハイドロフォンの形態による特性比較，ハイドロフォンの適用範囲について記載する。

#### 3.2 基礎理論

##### 3.2.1 ハイドロフォンの概要<sup>1), 2), 3)</sup>

ハイドロフォンとは、内部にマイクロフォンを装備した金属製パイプ等を河床に設置し、河床上を流れる土砂粒子がこのパイプ等に衝突した際に発生する音を検知することで、掃流砂量を推定する装置である。その計測方法を概念図として示す。ハイドロフォンは、堰堤の水通し部やコンクリート製の水路河床に、水流に直行する角度で設置されることが一般的である。ただし、欧米諸国では潜水艦ソナーのように水中で発生する音を検知する装置全般を Hydrophone と呼んでおり、必ずしも掃流砂量を計測する装置に限定して使われる用語ではない。そのため、広義の Hydrophone と区別するため、最近では、パイプハイドロフォン、パイプマイクロフォン、または日本で開発されたことを明示するために Japanese pipe microphone と呼ぶこともある（対して、同じく掃流砂量を計測するためにスイスで開発された観測機器は Swiss plate geophone と呼ぶ）。

澤井ら<sup>4)</sup>により、河床に設置したパイプに掃流砂が衝突した際の音響から流砂の観測が始まった。ハイドロフォンを用いた流下土砂の観測の始まりである。宮本ら<sup>5)</sup>は、水理模型実験を行ってハイドロフォンを使用した混合砂の粒度分布の推定に関する研究を行った。また、堤ら<sup>6)</sup>は、パイプハイドロフォンの観測値から掃流砂量、粒度分布が推定される方法についてパルス法を活用して直接法による掃流砂量の計測を必要としない方法について研究を行っている。小柴<sup>7)</sup>は、パルス法による流砂量、粒度分布の推定にガウス分布による統計分析手法を適用する研究を行った。

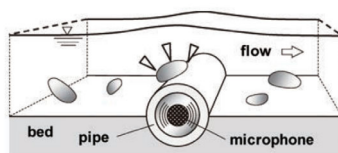


図-1 ハイドロフォンによる掃流砂検知の概念図：土砂粒子が河床に設置された金属製パイプに衝突した際に発する音を、パイプ内部に装備されたマイクロフォンが検知し、流砂量を推定する

図 3-1 ハイドロフォンによる掃流砂検知の概念図<sup>1)</sup>

また、パイプ型とプレート型ハイドロフォン（以降、パイプ型、プレート型と呼ぶ）の特徴として、パイプ型は細粒土砂を計測でき、土砂は衝突しやすく衝突音が大いことが特徴である。しかし、土砂流出が激しい場合は砂礫によってパイプが変形するため、正常なデータが取れないことが多発し、維持管理が必要である。一方、プレート型は中～大粒径土砂を対象としている。パイプ型より感度が鈍く、面的に重複して衝突する傾向があるが、パイプ型よりも強度が大きく変形しにくいいため、耐久性に優れる。強度が高い例として、長野県小渋ダム SBT で 2016 年の初回の運用からパイプ型およびプレート型を用いたサンドバイパストンネル内流砂観測を行ってきた。10 m/s を超える流速と高い土砂濃度により、パイプ型は初回で完全に破損してしまった一方、プレート型は 8 回の運用を終えるまで計測を続けることができたことから、プレート型の強度の高さが高いことがわかる。

続いて、ハイドロフォンを用いた流砂量計測は、図 3-2 に示す流砂がハイドロフォンに衝突する際に生じる音響信号を得るセンサー部、音響信号の波形を整形する一次処理、デジタル信号に変換後、流砂量を推定するための二次処理から構成される。二次処理には流砂の衝突回数（パルス数）を記録する方法、振幅の時間積分値を記録する方法がある。谷口・板倉<sup>8)</sup>は連続衝突や残響が長引く大礫の衝突に対して検出率（パルス数/流砂量、積分値/流砂量）の低下を確認して、流砂量が多くなると積分値の検出率の落ち込みがより大きくなることを示した。

また、鈴木ら<sup>9)</sup>は砂礫の衝突によって発生する音響波形から求められる音圧値と掃流砂量と検出率の積の間に比例関係があることを実験的に確認し、数値シミュレーションによって土砂粒子衝突頻度の増加に伴う検出率の低下を定量化し、音圧値から掃流砂量を求める方法を提案した。つまり、掃流砂量と音圧値は比例関係にあることに着目し、掃流砂量を算出する。ただし、ハイドロフォンへの衝突回数が多い場合では衝突回数が少ない条件と比較し、比例関係が小さくなるので、この小さくなる割合を検出率と定義し、計測データの元データと変換データのそれぞれの音圧値の比から検出率を求め、衝突回数を算出して、掃流砂量と平均粒径を算出する方法を提案した。

本研究では、主に鈴木らの手法（音圧値）により推定される流砂量の値を用いている。

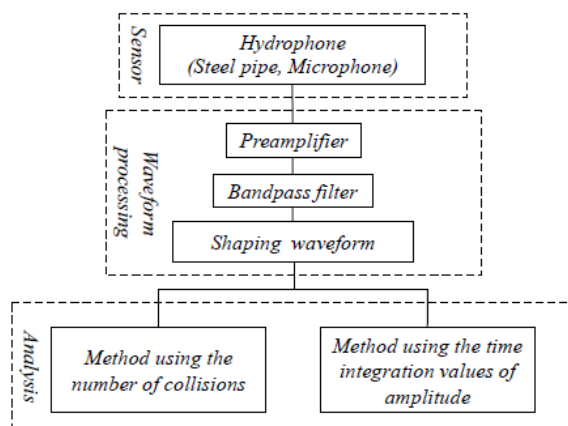


図 3-2 ハイドロフォンシステムの構成<sup>3)</sup>

### 3.2.2 精度

#### (1) ハイドロフォン観測の精度評価<sup>10)</sup>

ハイドロフォンの観測精度を評価するため、ハイドロフォンとロードセル付きの流砂捕捉装置の観測を比較した。

##### 1) はじめに

富士川砂防管内では、平成 22 年から計 7 箇所ではイドロフォン、濁度計、水位計による流砂量観測が実施されている。しかし、その一方、山地流域の流砂観測手法は発展途上の面もあり、流砂量観測値の検証が十分とは言い難い。そこで、平成 24 年に大武川において、ハイドロフォンの観測値の検証や、掃流砂量、粒径の時間的な変化を捉えるため、ハイドロフォンとロードセル付きの流砂捕捉ピットを縦列に並べ、また流速計や水位計、濁度計など流砂量に係わる諸数値を観測できる計器を一同に設置して、各観測値を比較、検証できる観測機器を整えた(図 3-3)。



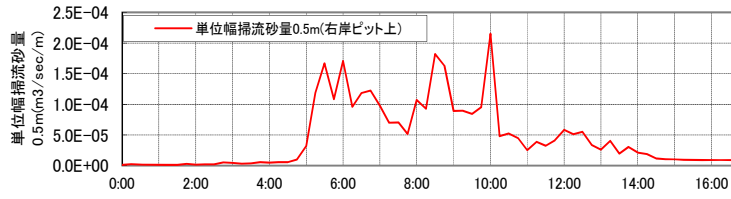
図 3-3 観測機器の設置状況<sup>11)</sup>

#### 2) 流砂量観測結果とその解析評価

##### ①観測結果の概要

大武川第 50 床固におけるハイドロフォン、堆砂ピット等の集約的観測システムによる流砂量観測は平成 25 年度から開始され、これまで 4 回の出水時観測が実施された。出水時のハイドロフォンとピット堆砂の時系列データの一例を図 3-4 に示す。また、出水ごとのピット堆砂の粒径分布を図 3-5 に示す。なお、ハイドロフォン観測値の流砂量への換算は、鈴木<sup>9)</sup>らの音圧による振幅の時間積分値を記録する方法で行った。

第1回出水時調査 単位幅掃流砂量0.5m【大武川第50床固右岸ピット上:平成25年9月16日】



第1回出水時調査 ロードセル【大武川第50床固右岸:平成25年9月16日】

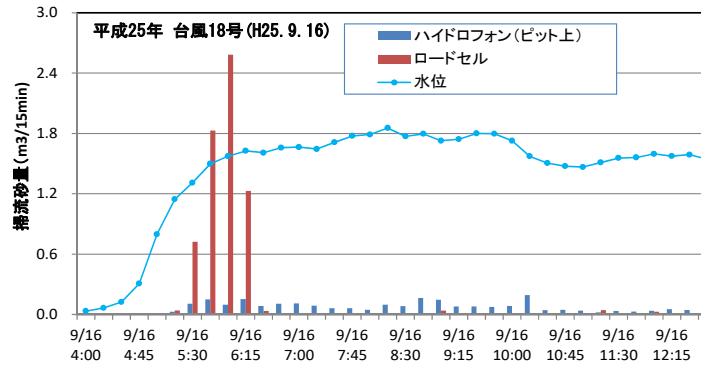
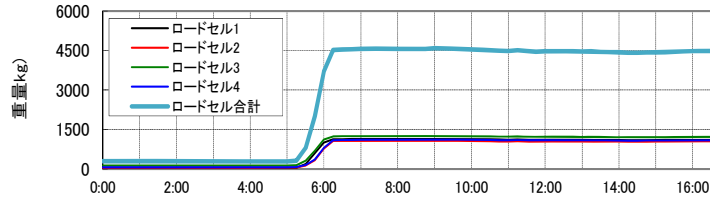


図 3-4 ハイドロフロントとピット堆砂時系列図<sup>10)</sup>

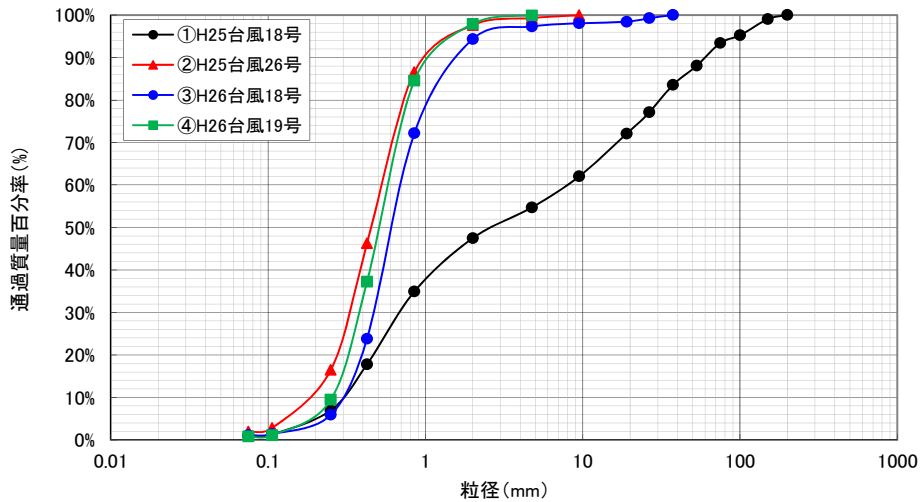


図 3-5 出水ごとのピット堆砂の粒径分布図<sup>10)</sup>

これらの観測データより整理した各出水時の土砂移動状況を表 3-1 に示す。また、各出水時の最大水深と堆砂の最大粒径、ハイドロフォン観測流砂量 (Whd) とピット捕捉流砂量 (Wpt) 比の関係を図 3-6 に示す。

ハイドロフォン観測値とピット実測値の比は、出水規模により差はあるが、ハイドロフォン観測値がピット実測値の 2.4%~45%程度であり、最大水深が大きくなると、ハイドロフォン観測値がピット実測値に近づくことがわかる。つまり、水深(掃流力)が大きくなれば移動粒径も大きくなり、ハイドロフォンで検知可能な粒径の割合も多くなると伺える。

表 3-1 ハイドロフォン観測値とピット堆砂量<sup>10)</sup>

対象出水	ハイドロフォン観測流砂量 Whd (kg)	ピット捕捉流砂量 Wpt (kg)	堆砂の最大粒径 (mm)	最大水深 (m)	重量比 Whd/Wpt (%)
①H25台風18号	1961.0	4335.0	178.3	0.62	45.2%
②H25台風26号	159.0	3166.4	19.0	0.38	5.0%
③H26台風18号	344.5	3322.7	37.5	0.40	10.4%
④H26台風19号	79.5	3348.3	9.5	0.13	2.4%

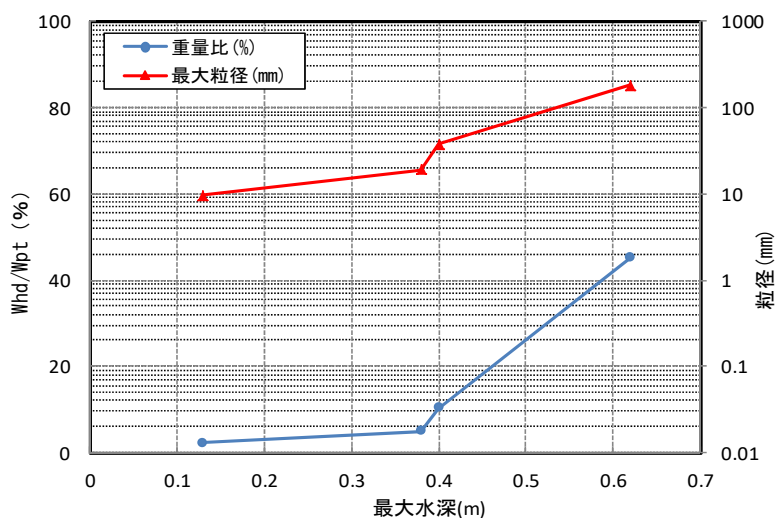


図 3-6 最大水深と最大粒径，流砂量重量比 (Whd/Wpt)<sup>10)</sup>



②ハイドロフォン観測値と理論値との比較

近傍の河床材料調査（容積法）による粒度分布曲線から代表粒径（D60）とハイドロフォン観測結果からの換算粒径を用いて算出した無次元掃流力と無次元掃流砂量との関係と一般的な掃流砂理論式との関係を図 3-7 に示す。理論式の値に比べて実測値が 1/50～1/100 と小さい値を示す。

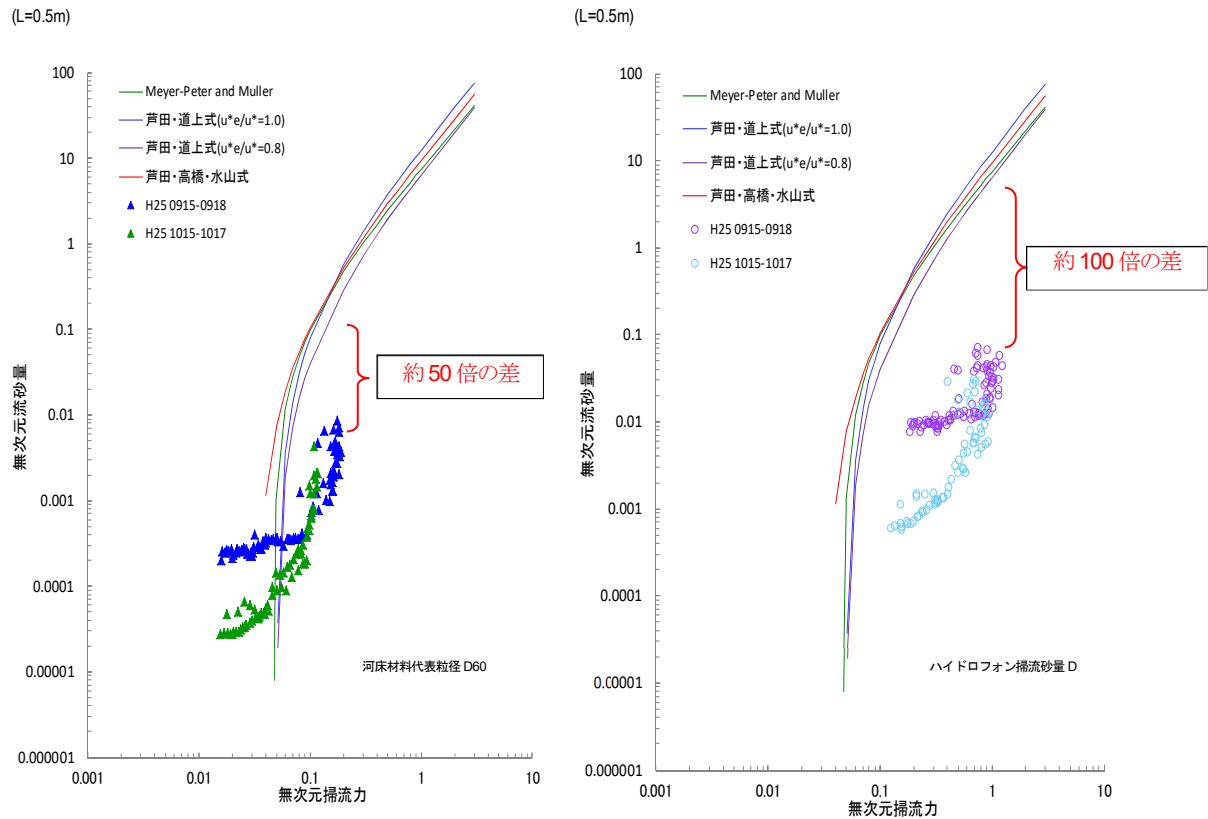


図 3-7 観測流砂量と理論曲線の比較<sup>10)</sup>

③ハイドロフォン観測値とピット実測値の乖離の原因分析

既往の研究成果及び観測条件から、ハイドロフォン観測値と実測値(ピット)及び理論値の大きな乖離について、以下の原因が考えられる。

- ア. 衝突率が小さいことによるハイドロフォン観測値の過小評価<sup>12)</sup>
- イ. 検出率が大きいことによるハイドロフォン観測値の過小評価
- ウ. ハイドロフォンが検出可能な下限粒径の影響
- エ. ピット横からの土砂流入による実測値の過大評価。

このうち、ア、イは、現地観測や水路実験により検討が進められ、現在の解析手法により検出率（イ）の影響はある程度取り除かれること、衝突率(ア)は最小で 0.1 程度であること

が報告されている。また、エについて不明ではあるが、出水時の流向を考えればそれほど大きくないと想定される。ここでは、大武川第 50 床固における集約的流砂量観測の結果に基づき、ウについて検討する。

平成 25 年、平成 26 年の 4 出水においてピット堆砂の重量を下限粒径 1mm 刻みで設定してハイドロフォンとピット捕捉流砂量の関係を表 3-2 と図 3-8 に示す。

これによれば、水深の大きい場合（①出水）ではピット捕捉土砂量とハイドロフォン観測値は近いが、水深の小さい場合（②，③，④出水）では、下限粒径 1mm とした場合はピット実測値がハイドロフォン観測値より大きく、下限粒径 2mm 以上とした場合は、逆にハイドロフォン観測値が大きくなることを示す。つまり、小規模の出水ではハイドロフォンの検知可能な下限粒径はおよそ 2mm 程度と推測される。

表 3-2 下限粒径ごとの捕捉土砂量<sup>10)</sup>

	ピット捕捉土砂量 (kg)				ハイドロフォン 観測値(kg)	最大水深(m)
	Wp1 (p1 ≧ 1mm)	Wp2 (p2 ≧ 2mm)	Wp3 (p3 ≧ 3mm)	Wp4 (p4 ≧ 4mm)		
①H25 台風 18 号	2688	2298	2124	2037	1961.0	0.62
②H25 台風 26 号	301.0	79.2	12.7	6.33	159.0	0.38
③H26 台風 18 号	697.8	99.7	66.5	49.8	344.5	0.40
④H26 台風 19 号	354.9	70.3	30.5	3.0	79.5	0.13

※一部改変

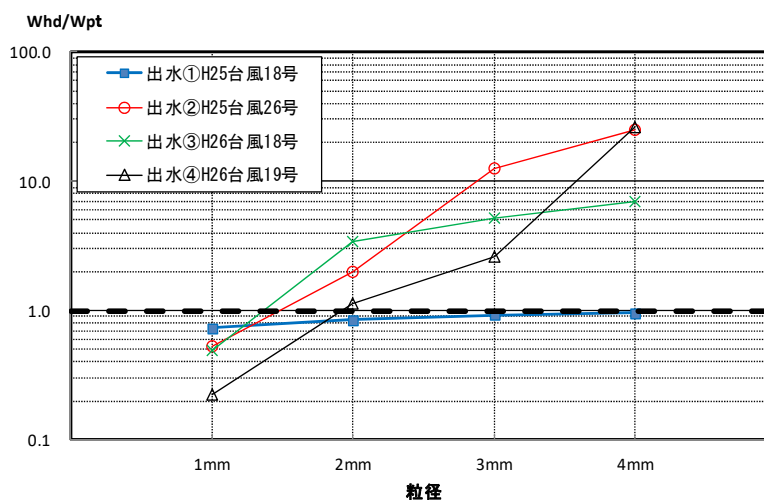


図 3-8 下限粒径とハイドロフォン観測値とピット堆砂量の比<sup>10)</sup>

### 3) まとめ

大武川第 50 床固におけるハイドロフォン，堆砂ピット，水位計等による集中的な流砂量観測より，以下のことが確認できた。

- ・ハイドロフォンにより，流下土砂量の変化がリアルタイムで把握できることがわかった。
- ・ハイドロフォン観測値は，理論値に比べてかなり小さい値を示してる。
- ・ハイドロフォン観測値とピット実測値の乖離は，従来指摘されている衝突率，検出率のほか，流下土砂の中でハイドロフォンが検知不能な細粒分が含まれることもその要因と考えられる。
- ・ハイドロフォンの検知可能な粒径は，出水規模の影響を受けるが，中小規模の出水では，2mm 程度がその下限値になる可能性が高いと推測される。

## (2) 衝突率に関する研究

掃流砂の一部は跳躍しており、河床から一時的に離れることが知られている。そのため、ハイドロフォンにおける観測においても掃流砂一部はハイドロフォンに衝突せずに、下流に流出している。

吉村らによる衝突率の研究<sup>13)</sup>では、下記の報告がなされており、無次元掃流力によって、衝突率が変化することが示唆された。

実験結果から図 3-9 の横軸に供給土砂の粒子数  $n$ 、縦軸に計測した音響データの時間積分値  $S_p$  と衝突音の干渉の影響が無いと仮定した場合の音圧積分値( $\alpha \cdot Q_{sc}$ )との比を整理した。また、図中には衝突率  $r=10\%$ 、 $40\%$ 、 $100\%$  のラインも示した。また整理には計測値のバラツキが大きかった  $\tau^*=0.1$  未満のケースを除いた。

整理した図 3-9 によると、実験の計測値から計算した衝突率  $r$  は、およそ  $10\%$  から  $100\%$  の範囲となり、極端に衝突率  $r$  が小さくなることはなかった。

また、無次元掃流力  $\tau^*$  との関係調べると図 3-10 に示すとおりで無次元掃流力  $\tau^*$  が大きくなると衝突率  $r$  が低下する傾向となった。値としては、無次元掃流力  $\tau^*=0.2$  で衝突率  $r=20\% \sim 60\%$ 、 $\tau^*=0.4$  で衝突率  $r=10\% \sim 40\%$  となった。

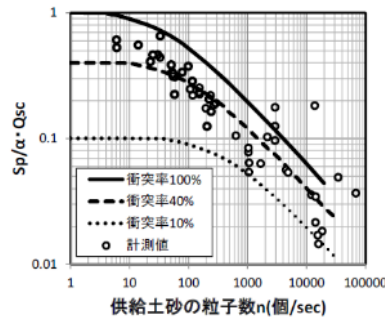


図 3-9 粒子数  $n$  の衝突率  $r$ <sup>13)</sup>

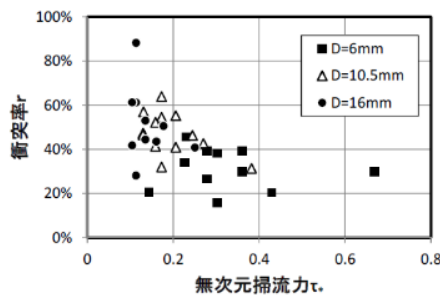


図 3-10 無次元掃流力  $\tau^*$  と衝突率  $r$ <sup>13)</sup>

### 3.3 ハイドロフォンの形態による特性比較

パイプ型ハイドロフォンは長さが長さ 0.5m, 2.0m と異なる 2 種類がある。

また、解析方法もパルス式、音圧式の 2 種類がある。

続いて、当初のパイプ型ハイドロフォンでは粒径の大きい土砂が衝突する変形し、適切に流砂を観測できない問題が発生した。そのため、プレート型ハイドロフォン、肉厚なパイプ型ハイドロフォンが導入されている。

上記に示すようにハイドロフォンにいろいろな形態があるため、それぞれの特性について、整理し、示す。

#### 3.3.1 パイプ型ハイドロフォンの長さの影響

岡本らの研究<sup>14)</sup>により、同一観測所に設置された長さが異なる 0.5m, 2.0m のパイプ型ハイドロフォンの観測値の相関図を整理した結果、ほぼ同じ値を示すことが報告されている。そのため、長さ 0.5m, 2.0m のパイプ型ハイドロフォンの観測精度はほぼ同等であると評価されている。そのため、掃流砂観測を目的としてパイプ型ハイドロフォンを新規設置するにあたっては、施工が容易な長さ 0.5m のハイドロフォンを採用してよいことが示唆されている。

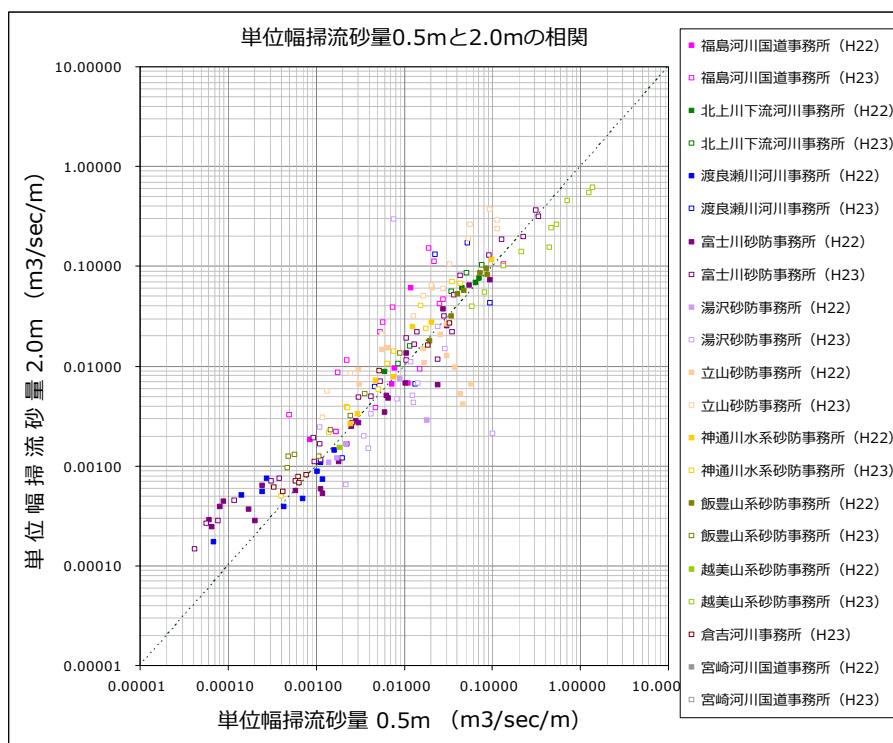


図 3-11 0.5m, 2.0m ハイドロフォン観測結果の比較<sup>14)</sup>

### 3.3.2 パルス式と合成音圧式の特<sup>15)</sup>

掃流砂量の推定においては、計測した砂礫の衝撃による音を増幅させ、その振幅（音圧値）が閾値を超えた回数（パルス数）に基づき、別で実測した掃流砂量と正の相関が高いパルス数を用いるパルス法<sup>16), 17)</sup>と、音圧値そのもの、または音圧の積分値をあらかじめ算出した関係式に適用して推測する合成音圧法<sup>18)</sup>がある。

パルス式は別で実測した掃流砂量のデータが必要であり、ある期間の流砂量をセットで計測する必要があるが、精度高く掃流砂量を観測することができる。ただし、流砂量が多いときにパルス数が減少する場合があります、その場合はパルス数と掃流砂が正の相関関係がなくなってしまうことから、一定の閾値のパルス数から掃流砂量を定量的に評価することが困難であることが報告されている<sup>19)</sup>。

また、合成音圧式はマイクロフォンから得られる音響データのみを用いて掃流砂量を解析する手法であり、マイクロフォン単体で掃流砂量の観測が可能である。ただし、粒子数と検出率の関係式には一定の式を用いること、音圧値と流砂量の比例係数については一定値を与えること、マイクロフォンへの衝突率を考慮していないことなどの実験等で求められた仮定条件が含まれている。<sup>15)</sup>

よって、マイクロフォンの観測値から掃流砂量に変換するパルス式、合成音圧式には一長一短があり、現在でも両方が採用されている。採用されている傾向として、大学等の研究機関ではパルス式、国土交通省等の行政機関では合成音圧式が見受けられる。

### 3.3.3 新型（プレート型，肉厚パイプ型）ハイドロフォンの特性

パイプ型ハイドロフォンは，大規模な出水や大粒径の礫が衝突することにより，ハイドロフォンのパイプが変形し，計測値が不安定に，または装置自体が破損して，パイプ内に水が入り，計測が不可能となってしまう問題が生じている．これらの問題を解決するため，肉厚パイプ型ハイドロフォンやプレート型ハイドロフォンが開発されている．

#### (1) プレート型ハイドロフォン

富田ら<sup>20)</sup>により，プレート型ハイドロフォンの現地実験が実施されており，それらの研究事例を示す．

##### 1) 現場実験の概要

###### ア) 水路実験

栃原砂防堰堤において，パイプ型(L=0.5m，φ=0.0486m)とプレート型(L=0.5m×B=0.2m)が堤体天端に隣接して設置されており，平常時は流水のない状態であるため，実験時は，春木川の滯筋より人工導水路を設置し，必要な流量・水深を確保した．

試験は，整備した人工水路において，プレート型とパイプ型が設置された実験水路にコンパネを用いて半分に区分し，ハイドロフォンの直上流より砂礫を1個体ずつ直接投入し，データロガーにより砂礫の衝突時の音圧データを時系列に記録した．また，試験中の水理条件等を把握するため，ハイドロフォン設置位置での水深・流速を計測した．

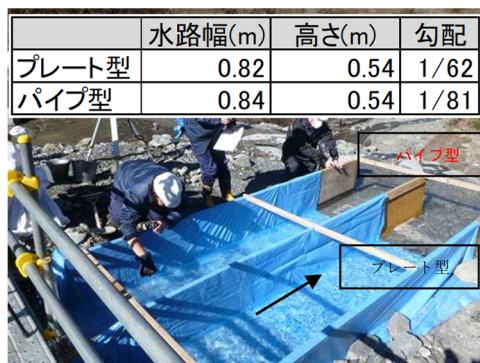


図 3-12 水路諸元<sup>20)</sup>

##### イ) 実験内容

ハイドロフォン(パイプ型，プレート型)のそれぞれに対して，異なる粒径の砂礫を用いて，水中でハイドロフォンに1個体が衝突した場合の音圧を記録した．また，粒径別に音響変換機の倍率を変更し，ハイドロフォンの音圧を記録し，各粒径に対して音圧が頭打ちしない倍率について確認した(表 3-4 参照)．

表 3-3 実験時の水理条件<sup>20)</sup>

	流速(m/s)	水深(m)	流量(m <sup>3</sup> /s)
プレート型	1.7	0.1	0.14
パイプ型	1.56	0.1	0.13

表 3-4 実験時の対象粒径と音響変換機の倍率<sup>20)</sup>

対象粒径 (mm)	音響変換機の倍率	
	プレート型	パイプ型
3以下	4	4
3	4	4
5	4	4
10	4	4
20	4	4
30	4	2
40	4	2
50	2	1
100	2	1

### 3) 実験結果とその考察

実験で用いた1個体の体積と衝突時の音圧積分値の相関関係を整理し、図 3-13 に示した。なお、音圧積分値は音響変換機の倍率を4倍に設定した場合の値である。また、対象粒径が小さい1個体は、ハイドロフォンへの衝突を視認できないため、実験結果の整理の対象外とした。

図 3-13 より、本実験のパイプ型の体積と音圧積分値の近似式とパイプ型の一般式の比例係数を比較すると小さい。長谷川ら<sup>17)</sup>によると、パイプ型では運動量  $1,000\text{g} \cdot \text{cm/s}$  以上になると体積と音圧積分値の比例係数が小さくなることが報告されている。本実験では流速が  $1.56\text{m/s}$  のため、体積  $2.4\text{cm}^3$  の礫が運動量  $1,000\text{g} \cdot \text{cm/s}$  程度に該当し、図 3-13 から本実験で整理可能であったプロットは体積  $2.5\text{cm}^3$  以上の範囲であり、パイプ型の一般式より小さくなる範囲となっており、長谷川らの報告と一致する結果である。

次に、プレート型の体積と音圧積分値の比例係数は、パイプ型の一般式の  $2/5$  程度となっているが、近似式と実験プロットの関係より、比例係数が変化する傾向が見られないため、プレート型では粒径  $100\text{mm}$  までは、体積と音圧積分値の比例係数は一つで対応可能と推定される。

また、プレート型の体積と音圧積分値の比例係数がパイプ型の一般式より小さいことから、パイプ型の換算手法を用いて、プレート型の掃流砂量を算定すると過小評価になると推定される。実際に台風 16 号の結果(図 3-14 参照)をみると、9月21日1時～6時ではパイプ型よりプレート型の掃流砂量が小さい。ただし、水位の大きい9月20日15時～20時ではプレート型とパイプ型の掃流砂量は同程度となっている。プレート型とパイプ型の掃流砂量が同程度になる要因として、プレート型では1個体が複数回衝突することが想定され、出



水規模が大きくなると流下土砂量が増加し、面で掃流砂量を観測するプレート型は、複数回衝突する砂礫が増加し、データ収集期間内の音圧積分値が増加したためと推定される。

次に、本実験でプレート型に1個体が複数回衝突した音圧波形を確認すると、連続して2回の波形が発生することが確認され、音圧波形から衝突回数を把握できる可能性が示された(図 3-15 参照)。

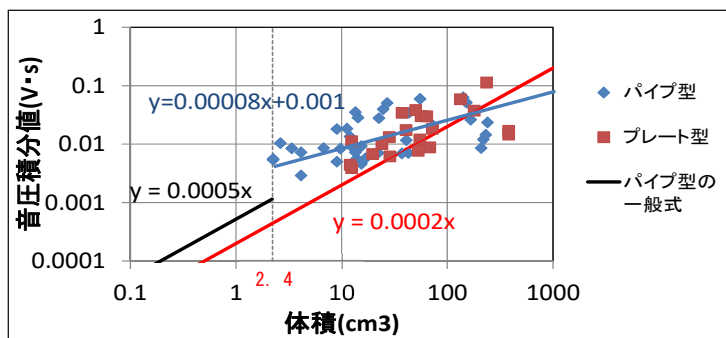


図 3-13 体積と音圧積分値の相関関係<sup>20)</sup>

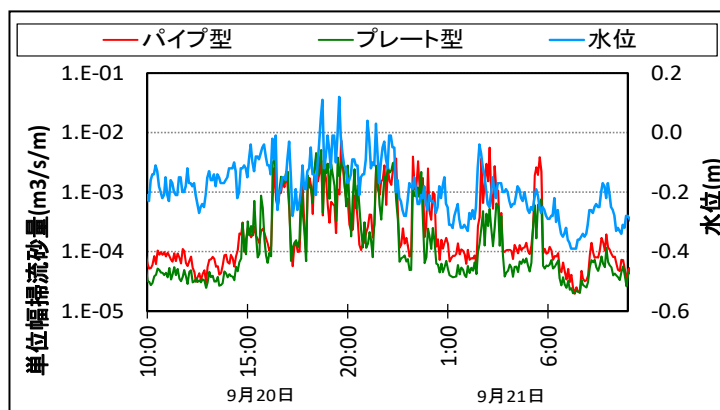


図 3-14 H28 台風 16 号の観測結果<sup>20)</sup>

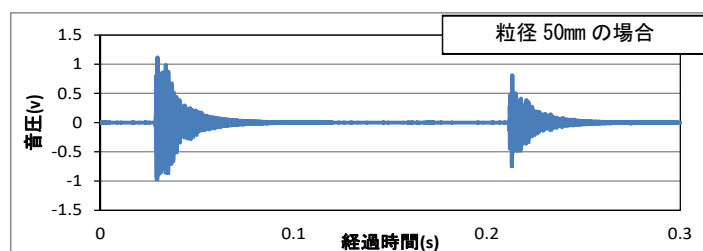


図 3-15 プレート型ハイドロフォンの音圧波形<sup>20)</sup>

#### 4) まとめと課題

本実験結果より、以下のことが確認された。

- 流下土砂の粒径が大きくなると音響変換機の倍率を下げる(4倍→2倍 or 1倍)必要がある。
- パイプ型の音圧積分値と体積の関係の勾配は、プレート型の一般的な勾比例係数より小さくなることが確認された。
- パイプ型は従来通り運動量  $1,000\text{g} \cdot \text{cm/s}$  (本実験の水理条件では粒径  $17\text{mm}$  に該当) まで一般的な比例係数の適用範囲となり、プレート型は粒径  $100\text{mm}$  (本実験の最大粒径) までパイプ型の一般的な比例係数と異なるが、一つの比例係数で適用可能な範囲と推定される。
- プレート型では、礫が複数回衝突すると、複数回の音圧波形が発生し、データ収集期間の音圧積分値が大きくなることと推定される。
- 今後は、プレート型の体積と音圧積分値の比例係数と音圧波形から1個体が何回衝突したかを推定し、プレート型から掃流砂量の換算方法を検討する必要があることが確認された。

## (2) 肉厚パイプ型 hidroフォン

野中ら<sup>22)</sup>により、厚さが異なるパイプ型 hidroフォン の現地比較観測が実施されており、それらの研究事例を示す。

通常のパイプ型の肉厚が 3mm、肉厚パイプ型の肉厚が 7.5mm で観測が実施されている。

### 1) 室内実験

直径 1.5mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 6mm, 7mm, 8mm, 10mm の鉄球を直上約 45mm の高さから落下させ、その時の hidroフォン センサーの出力波形を 100kHz で取得した。記録時間は 5 秒間となり、記録時間内に落下することが可能な鉄球は 3 個とした。

図 3-16 に、パイプ型 (肉厚 3mm) とパイプ型 (肉厚 7.5mm) の各鉄球による、波形の最大振幅 (V) を示す。この結果、パイプ型 (肉厚 3mm) とパイプ型 (肉厚 7.5mm) の感度特性は良く似ており、出力電圧の差は最大約 2 倍である。

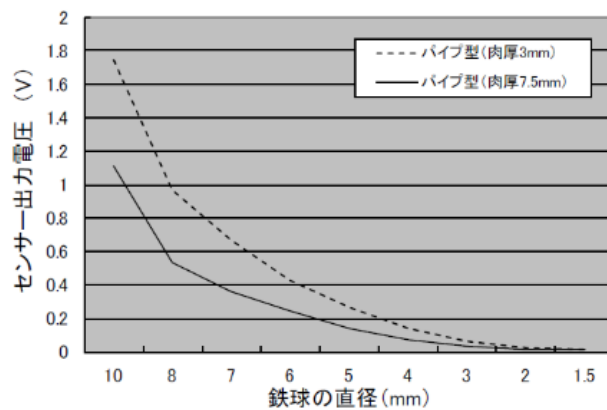


図 3-16 パイプ型 (肉厚 3mm, 7.5mm) の各鉄球のサイズに反応したセンサー出力電圧

22)

### 2) 現地観測結果

2016 年 10 月 1 日に現地に設置後、10 月 9 日と 10 月 28 日に水深が 2~3cm 程度増える規模ではあったが、小さな出水を 2 回観測することができたので、この 2 回の観測データで比較を行った。

比較に用いたパイプ型 hidroフォン の仕様は、水路右岸のパイプ型 (肉厚 3mm) は、直径 48.6mm、露出している検出部分の長さが、350mm、パイプ型 (肉厚 7.5mm) は、直径 57.0mm、露出している検出部分の長さが、350mm である。

データの収録は 1 分毎のパルス数を記録しているが、10 分毎の積算値に変換し、センサーの横断方向の検出長さを 50cm に換算している。図 3-17 にパイプ型 (肉厚 3mm) とパイプ型 (肉厚 7.5mm) の ch5 (アンプ倍率 32 倍) と ch7 (128 倍) のパルスカウント数の時系列を示す。

32 倍と 128 倍の違いは、32 倍の方が比較的粒径の大きな礫のカウント数を、128 倍は、粒径の小さな礫のカウント数を意味している。

図 3-17 より、粒径の大きな礫（倍率 32）では、パイプ型（肉厚 7.5mm）よりパイプ型（肉厚 3mm）のカウンタ数が多いが、粒径の小さな礫（倍率 128）は、パイプ型（肉厚 3mm）とパイプ型（肉厚 7.5mm）のカウンタ数が、粒径の大きな礫に比べて差が小さい。

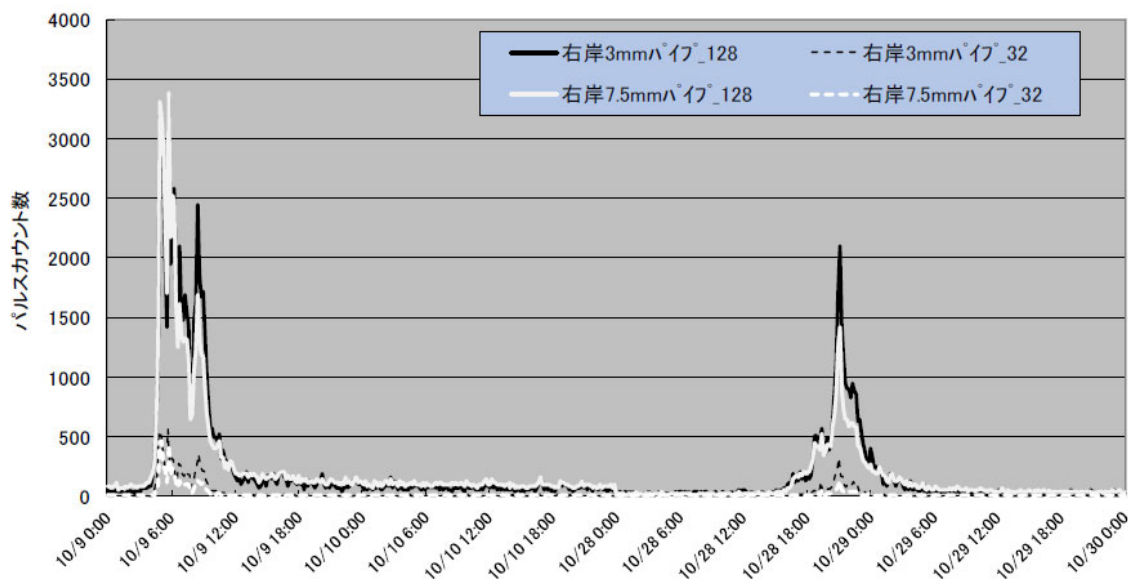


図 3-17 パイプ型（肉厚 3 mm，7.5 mm）の 32 倍と 128 倍のパルスカウンタ数の時系列図  
22)

### 3) まとめ

現地観測では、パイプ型（肉厚 3mm）の方がパイプ型（肉厚 7.5mm）より感度が良く、特に、比較的大きな礫の検出感度が高い傾向があることが分かった。

ただ、パルスカウンタ数の波形の形状はパイプ型（肉厚 3mm）とパイプ型（肉厚 7.5mm）とも同じであり、大きな礫が衝突し、パイプが凹み交換が必要になることを考慮すると、パイプ型（肉厚 7.5mm）も十分観測に使用可能であると思われる。

表 3-5 にこれまでに開発した各ハイドロフォンの特徴を整理した。実際の観測に際しては、設置する河川の特徴を考慮し、ハイドロフォンのタイプを選定し、設置することにより、各々のハイドロフォンの短所を補ったハイブリット観測が可能になる。

今回比較解析に用いた観測データは、出水の規模が非常に小さく、今後も継続し、比較データを蓄積し、各ハイドロフォンの特性の把握を行って行く。

表 3-5 各ハイドロフォンの特徴の整理 <sup>22)</sup>

	検出感度	凹み難さ	設置し易さ	耐土砂堆積
パイプ型（肉厚 3mm）	◎	△	○	△
パイプ型（肉厚 7.5mm）	○	○	○	△
プレート型	△	◎	△	○

### 3.4 ハイドロフォンの適用範囲<sup>23)</sup>

上述したとおり、ハイドロフォンでは観測できる粒径の限界や衝突率等があり、掃流砂の観測値を評価にするにあたって、留意することが必要である。

そのため、ここではハイドロフォンを用いた流砂量観測の適用範囲に着目した留意点を示す。

#### 1) これまでの観測研究における問題点

ハイドロフォンを用いた流砂量観測にはまだ多くの技術的課題が残されているが、本研究では観測可能な粒径の下限値と水理条件について、ハイドロフォンとピットを用いた観測データに基づいて検討した。最初に観測可能な粒径範囲に関しては、ハイドロフォンで流砂量を計測するにあたっては、粒径が小さいとノイズのレベル程度の音圧反応が出力され、流砂量が適切に観測できず、観測可能な粒径範囲の下限値があるものと考えられる。そこで、ハイドロフォンの直下流でピットに捕捉された粒度分布から計測できる粒径の下限値を調べようとした。<sup>1)</sup>しかし、最近の研究で、近年では粒径が小さくても団塊であると音圧が大きくなりハイドロフォンで流砂量の観測が可能であるのではないかと<sup>20)</sup>も示され、ハイドロフォンで流砂量を観測することのできる粒径の下限値を単一粒子の衝突のみでは決めることはできないと考えられる。(図 3-18①に該当)次に、水理条件については、流量が大きくなると砂礫が浮遊運動やサルテーション運動するため、ハイドロフォンを跳び越すものが増え、計測精度が低下する。したがって、流量が大きくなると衝突率を考慮した補正が必要になる。(図 3-18②に該当)

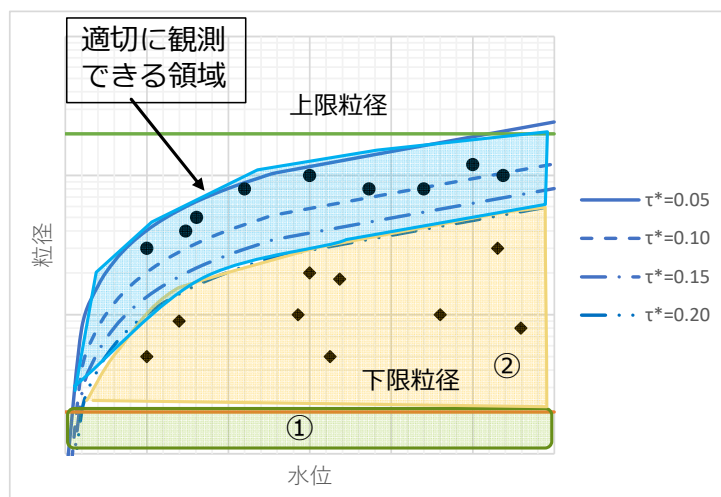


図 3-18 ハイドロフォンの観測イメージ図

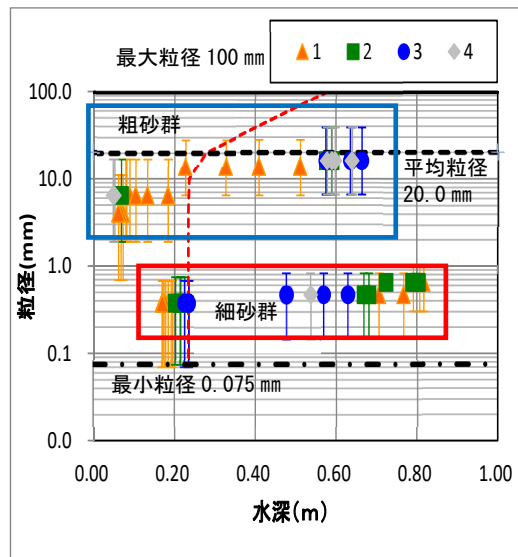
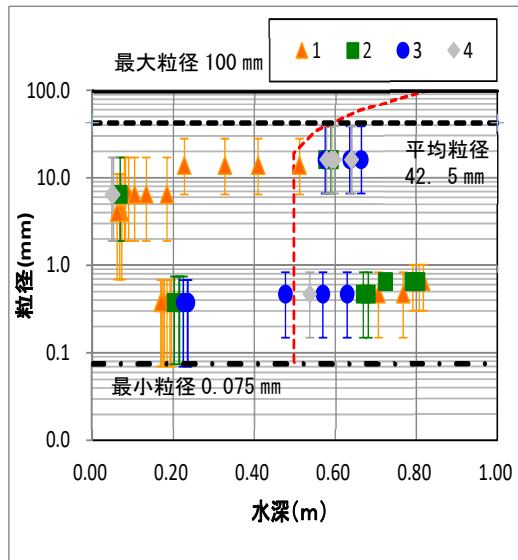
## 2) 観測データ

ピットの改良以降の平成 28 年台風 18 号，平成 29 年台風 5 号，台風 21 号，平成 30 年台風 24 号の 4 出水を対象に，ピットで捕捉された粒度分布とピット近傍で計測された水深を用いて，水深と捕捉された土砂の平均粒径・粒径範囲の関係を整理した（図 3-19）．また，各水深に対する河床材料の移動可能な粒径範囲を Egiazaroff 式および芦田・道上の修正式<sup>21)</sup>より算定し，図 3-19 に赤の点線で示す．ただし，計算には河床材料の最大粒径，最小粒径，平均粒径が必要である．図 3-20 に観測地点近隣の平成 25 年度河床材料調査の結果を示す．この図から最大粒径は 100 mm，最小粒径は 0.075 mm とした．また，この河床材料の平均粒径は 42.5 mm であるが，洪水時の平均粒径はよくわからないので，図 3-20 に示すように平均粒径 20 mm の場合の仮定の河床材料を設定した．図 3-19 には最小粒径，最大粒径，平均粒径の値も示している．各水深に対する移動可能な粒径は最小粒径の線と赤の点線で挟まれる領域である．ハイドロフォンによる流砂量とピットによる流砂量の一致度を表 3-6 のように分類した．

分類 1，2 はハイドロフォンによる流砂量がピットによるものよりかなり小さい場合，分類 3 は両者がよく一致している場合，分類 4 はハイドロフォンの方が大きい場合を表す．

表 3-6 ハイドロフォンとピットの流砂量の一致度<sup>23)</sup>

分類	関係
1	ハイドロフォンの観測値 < ピットの観測値 × 0.3
2	ピットの観測値 × 0.3 ≤ ハイドロフォンの観測値 < ピットの観測値 × 0.8
3	ピットの観測値 × 0.8 ≤ ハイドロフォンの観測値 < ピットの観測値 × 1.2
4	ピットの観測値 × 1.2 ≤ ハイドロフォンの観測値



赤点線はEgiazaroff式及び芦田・道上の修正式から算定した移動限界曲線

図 3-19 粒径と水深の相関図（上：河床材料 H25，下：仮定）<sup>23)</sup>

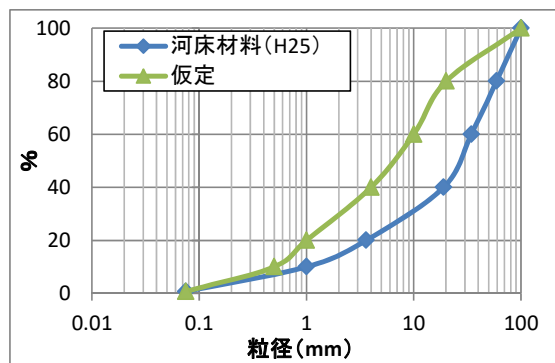


図 3-20 粒度分布曲線<sup>23)</sup>

s

### 3) 考察

図 3-19 において、理論的な移動可能な粒径と実際に洪水時に移動している粒径を比べると、平均粒径を 20 mmにした方が両者の隔たりが小さいことがわかる。河床材料調査による粒度分布はタルボット型であり、洪水後に河床がアーマーリングしたときのものであると推察される。洪水中は細粒成分がもう少し多いものと考えられる。そこで、図 3-19 の下図について詳しく見ると下記のようなことが考察される。

- ①ピットに捕捉された粒径範囲と理論的な移動可能な粒径範囲から見て、図 3-20 の河床材料の一部がピットの上流の河床を構成しており、それが移動したものと考えられる。河床材料が平面的に一様でないことを意味するが、それが砂州や地形によるものかは今後の詳細な調査が必要である。
- ②ピットに捕捉された砂礫群は、細砂群（粒径 0.1~0.8mm）と粗砂群（粒径 5~20mm）に分けられることは興味深い。同じ水理条件でも流砂の粒度分布は大きく異なることを意味する。したがって、河床材料の粒度分布調査で得られるような平均的な河床材料の粒度分布に基づく流砂と局所的な流砂は、大きく異なることが推察される。
- ③細砂群に対して、ピットによる流砂量とハイドロフォンによる流砂量がよく一致するのは、水深 0.22m 以上、0.65m 以下である。0.2m 付近で分類 1 から 3 に急に変化している。水深が 0.2m 以下ではハイドロフォンに一度にあたる砂の量は少なく、ノイズに埋もれてうまく観測できないと考えられる。また、水深 0.65m 以上になるとピットとハイドロフォンの関係が悪くなるのは、粒径が小さく、浮遊砂形式で運ばれるものが多くなったためと考えられる。
- ④粗砂群では水深 0.55m 以上でピットとハイドロフォンの関係はよいが、水深 0.5m まではハイドロフォンによる流砂量のほうがピットによるものよりかなり小さい。これについては、機械的な原因か水理学的な要因があるかについては今後検討する必要がある。
- ⑤河床材料調査による粒度分布を用いて流砂量を計算しても、移動土砂の粒径範囲が相違しており、計算と実現象と合わないことがわかる。そのため、モニタリングによる実現象把握の意義が理解される。

### 4) まとめ

ハイドロフォンとピットによる流砂量観測によって、混合砂礫の洪水時の流砂特性が考察されたが、河床形態などの局所的な流砂現象に影響を及ぼす要因の検討やハイドロフォンへの砂礫の衝突率などを明確にする必要があることなどが示された。今後、さらに観測を継続し、これらの問題の解決を図る必要がある。



### 3.5 まとめ

本章では、ハイドロフォンの基礎理論、ハイドロフォンの形態による特性比較、ハイドロフォンの適用範囲についての研究成果及び既往事例を記載した。

ハイドロフォンの基礎理論では、ハイドロフォンの概要と精度について示した。精度では、ハイドロフォンとは別の観測機器で掃流砂量を観測し、お互いの観測結果より、粒径 2mm 以下の土砂がハイドロフォンでは観測が困難であることを示した。また、ハイドロフォンに対する土砂の衝突率については、無次元掃流力により異なることを示した。

続いて、ハイドロフォンの形態による特性比較では、パイプ型ハイドロフォンの長さの影響、パルス式と合成音圧式の特性（データ処理方法の相違）、新型ハイドロフォンの特性について示した。パイプ型ハイドロフォンの長さの影響では、長さが 0.5m と 2.0m と異なるハイドロフォンでもほぼ同等の観測結果となることを示した。また、パルス式と合成音圧式の特性では、観測結果を算出するための一長一短の内容を示した。続いて、新型ハイドロフォンの特性では、プレート型ハイドロフォンはパイプ型ハイドロフォンと比較して音圧積分値と体積の関係の勾配比例係数が小さいことが確認されたが、パイプ型ハイドロフォンと同様に一つの比例係数で適用可能な範囲があることが示唆された。さらに肉厚パイプ型ハイドロフォンは従来のパイプ型ハイドロフォンよりパイプが肉厚となるため、比較的大きな礫の検出感度が低い傾向にあることが分かったが、パルスカウント数の波形はパイプの肉厚に影響せず同じであるため、パイプの凹みが確認される観測地点では肉厚パイプ型ハイドロフォンの適用も可であることを示した。

ハイドロフォンの適用範囲では、混合砂礫の洪水時の流砂特性の考察について示したが、明確な適用範囲については今後の検討が必要である結果となった。そのため、今後も観測を継続し、これらの適用範囲を確認する必要がある。

## 参考文献

- 1)堤大三：ハイドロフォンによる掃流砂計測，砂防学会誌，Vol. 72，No. 2，p.36-39，2019
- 2)三浦爽，富田邦裕，叶正興，小柴孝太，角哲也：ダムの排砂バイパストンネル運用のためのパイプ型およびプレート型インパクトセンサーを用いた流入土砂動態把握手法の高度化，河川技術論文集，第26巻，p.125—130，2020.6
- 3)長谷川祐治，宮田秀介，今泉文寿，中谷加奈，堤大三：流砂の衝突回数を考慮したハイドロフォンデータによる解析手法の提案と現地への適用，土木学会論文集 B1(水工学)Vol.73，No.4，p. I 523—528，2017
- 4)澤井健二，小倉久直，板倉安正，中山純一，谷口伸一，沢田豊明，諏訪浩，宮本邦明：可聴音による間接的流砂量測定方法（パイプ法）の基礎実験，昭和63年度砂防学会研究発表会概要集，p130-140，1988
- 5)小田晃，長谷川祐治，水山高久，宮本邦昭，野中理伸：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 Vol.58，No.2，p15-25，2005
- 6)東豊，堤大三，宮田秀介，藤田正治：パルス法による山地河川における流砂量手法の高度化，砂防学会誌，Vol.74，p.3-13，2022
- 7)小柴孝太：Improvement of Signal Analysis for Surrogate Bedload Monitoring at Sediment Bypass Tunnels(Abstract\_要旨)，京都大学学位論文，2020
- 8)谷口伸一，板倉安正：音響法による流砂量計測のための信号解析，滋賀大学紀要（彦根論叢），第276・277号，p.323-346，1992
- 9)鈴木拓郎，水野秀明，小山内信智，平澤良輔，長谷川祐治：音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂計測手法に関する基礎的研究，砂防学会誌，Vol.62，No.5，p.18-26，2010
- 10)叶正興，富田邦裕，藤田正治，堤大三，内田太郎，光永健男，守谷武史，渡辺正彦：大武川におけるハイドロフォンを用いた流砂量観測とその評価：第64回平成27年度砂防学会研究発表会概要集 p.A-126-127，2015
- 11)富田邦裕，叶正興，重村一馬，藤田正治，堤大三；ハイドロフォンによる流砂量の現地計測精度と問題点の改良，平成29年度砂防学会研究発表会概要集 p.450-451，2017
- 12)内田太郎，吉村暢也・林真一郎・鶴田謙次・鈴木拓郎・長谷川祐治・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，Vol.67，No.5，p.24-29，2015
- 13)蒲原潤一，内田太郎，田中健貴，吉村暢也，鶴田謙次：ハイドロフォンの衝突率・検出限界に関する水路実験，第64回平成27年度砂防学会研究発表会概要集 p.B-268-269，2015
- 14)岡本敦，内田太郎，林真一郎，丹羽諭，叶正興，野頼成嘉，重村一馬：ハイドロフォンを用いた掃流砂観測：平成22・23年度の全国の観測結果の整理・分析：第62回平成25年度砂防学会研究発表会概要集 p.A-216-217，2013

- 15)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: 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 Vol.66, No.1, p.4-14, 2013
- 16)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: 流砂等計測システム(六甲住吉型)と観測事例, 砂防学会誌, Vol. 56, No. 6, p.27-32, 2004
- 17)中谷洋明・鶴田謙次・吉村暢也: 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, Vol. 60, No.3, p.20-25, 2007
- 18)鈴木拓郎・水野秀明・小山内信智: 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, Vol. 62, No.5, p.18-26, 2010
- 19)小田晃・長谷川祐治・水山高久・宮本邦明・野中理伸: 水理模型実験におけるハイドロフォンを用いた流砂計測, 水工学論文集, 第 48 巻, p.745-750, 2004
- 20)田中秀基, 小町谷 章, 樽林哲也, 角 岳志, 内田太郎, 泉山 寛明, 井内拓馬, 富田邦裕, 叶正興, 重村 一馬: 現地実験によるハイドロフォン(パイプ型, プレート型)の観測特性に関する考察: 第 66 回平成 29 年度砂防学会研究発表会概要集 p.452-453, 2017
- 21)長谷川裕治・宮本邦明: ハイドロフォン内部の音響特性と流砂量計測に関する実験, 砂防学会誌, Vol.66, No.5, p.23-32, 2014
- 22)野中理伸, 水山高久, 堤大三: 新しいパイプ型ハイドロフォンの現地比較観測: 第 66 回平成 26 年度砂防学会研究発表会概要集 p.B-268-269, 2014
- 23)萬徳 昌昭, 小島 隆, 木暮一也, 三雲 浩司, 藤田正治, 富田邦裕, 叶 正興, 井内拓馬, 重村一馬: ハイドロフォンを用いた流砂量観測の留意点: 第 68 回 2019 年度砂防学会研究発表会概要集 p.476-477, 2019
- 24)ハイドロフォンを用いた掃流砂観測における流水によるノイズ・非衝突の影響に関する水路実験, 井内・内田ら 砂防学会誌 Vol.69 No.3 p.4-14, 2016
- 25)移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究 芦田・道上 土木学会論文報告集 第 206号 p.59-69, 1972.10

## 第4章. ハイドロフォンの土砂管理への活用

### 4.1 序説

本章においては、砂防域 3 事例、ダム域 1 事例のハイドロフォンの土砂管理に利用した研究事例を示す。

### 4.2 砂防域

砂防域における、ハイドロフォンの土砂管理への活用をした事例を 3 つ示す。

#### 4.2.1 富士川流域等<sup>1)</sup>

##### (1) はじめに

ハイドロフォンを用いた掃流砂量観測については、検知可能な粒径範囲の問題や検知率、衝突率等の検討がなされており、一定精度の観測が可能となっている。一方、近年は土砂災害が頻発しており、ハードな砂防施設だけでは被害を抑えることができず、流域監視やリアルタイムでの流出土砂情報の早期取得と関係機関等への伝達により、警戒避難システムを整備して被害軽減を図る必要性が高まっている。このため、警戒・避難情報への利用も考えてリアルタイムで掃流砂の状況が観測できるハイドロフォンデータの活用や、中長期的な土砂流出の状態把握と、その評価にハイドロフォンデータの履歴を整理・分析して実施する方法等が考えられる。近年、富士川砂防、利根川水系砂防管内で実施された流砂量観測結果より得られた知見をもとに、ハイドロフォンデータにより上流域の土砂流出状況を評価する方法について検討した。

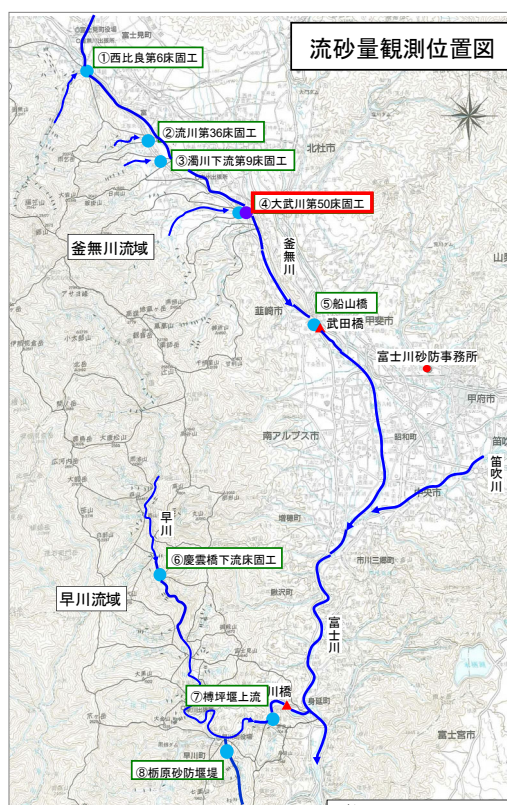


図 4-1 流砂量観測位置図<sup>1)</sup>

平成 24 年度には，大武川第 50 床固工において，ハイドロフォン，濁度計，水位計に加えて，ロードセル付き土砂捕捉ピット，流速計等を増設し，様々な観測方法やデータから流砂量について検討出来る体制が整備された．また，平成 26 年度には，ヨーロッパ等で使われている振動センサーを活用したプレート型のジオフォンの観測を参考に，春木川の栃原堰堤でもプレート型のハイドロフォンが設置され，平成 27 年度から観測を開始している（図 4-3）．



図 4-2 大武川計測器設置状況<sup>1)</sup>

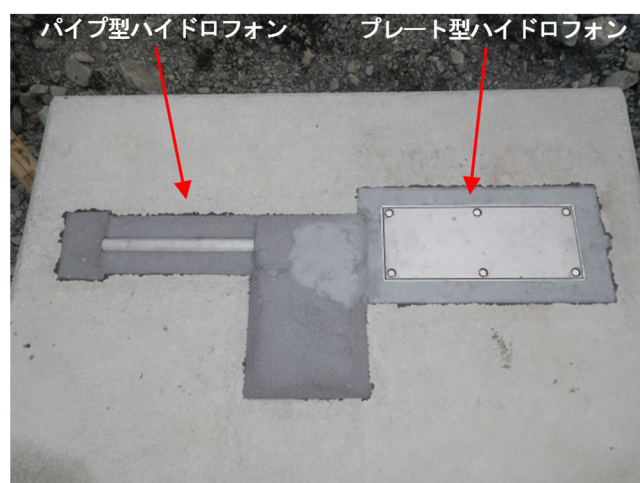


図 4-3 栃原堰堤プレート型ハイドロフォン<sup>1)</sup>



### (3) ハイドロフォンによる掃流砂量観測データの現状について

ハイドロフォン観測データ（水深，単位幅掃流砂量  $q_b$ ）を用いて，一般的な掃流砂量式より求めた無次元掃流力（ $\tau^*$ ）と無次元掃流砂量（ $q_b^*$ ）の関係を理論曲線と比較すると，図 4-4 に示すとおり，観測値の解析に用いた代表粒径（ $d$ ）の大きさによって両者の関係が大きく違うことがわかる．ここに， $d_{60}$  および  $d_{90}$  は通常時の河床材料の粒度分布調査結果によるものである．出水中の河床材料の粒度分布を正確に把握することは困難であるが，両粒度分布に大きな隔たりがあることが図 4-4 に反映されていると考えられる．つまり，流砂量式と観測流砂量との乖離は，現地で流下している土砂の粒径は河床材料調査で求めた粒径と異なり，もっと大きな粒径である可能性を示唆している．

そこで，この問題を逆手にとって，出水中の河床材料の粒度分布を推定し，それと 2 つの両極端な粒度分布，すなわち生産土砂の細粒分を多く含むものと，アーマーコートが十分に発達した粒度分布と比較することで，流域の土砂流出の状況を把握することが可能であると考えた．これを以下の P-A 曲線による土砂流出状況の評価方法として提案する．

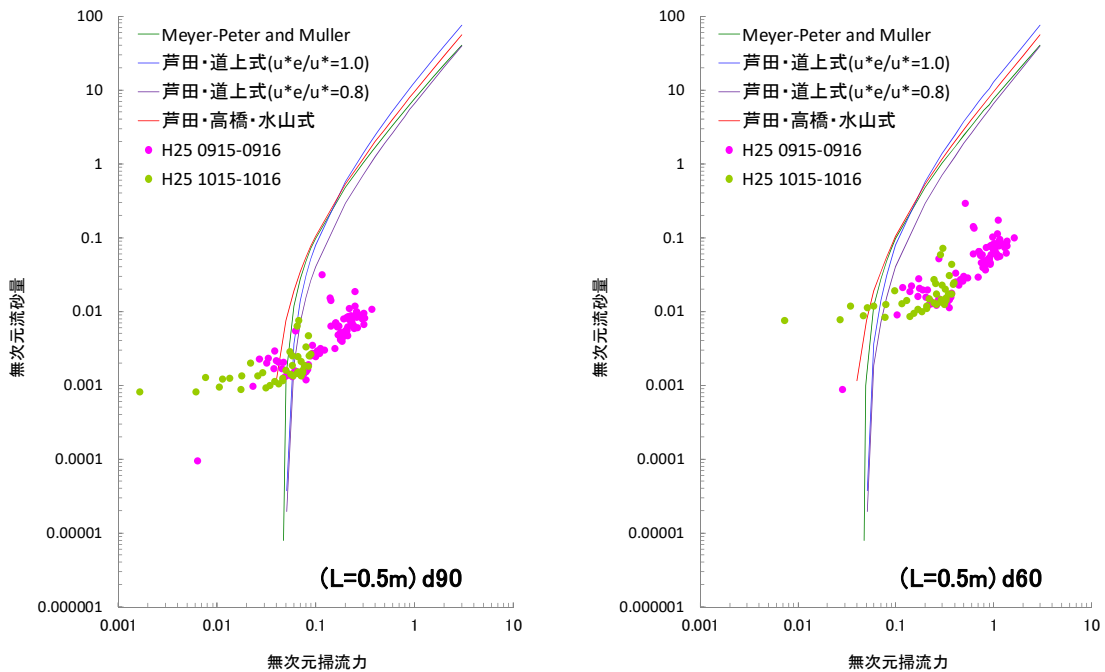


図 4-4 観測値と理論式の比較<sup>1)</sup>

### (4) 流域の土砂流出状況の推定方法の提案

#### 1) P-A 曲線の考え方

砂防河川区間で掃流砂量の計測値と理論値を比べると大きな差が見られる場合がある．その原因のひとつは計算に用いる土砂粒径と出水中の実測値に差異があることが影響していると考えられる．また，河床材料の分布は空間的にもばらつきが多く，正確に粒度分布を調べることが難しい．ここでは，これを逆に利用して出水中の河床材料の粒度分布を観

測値と理論値から推定し、その粒度から土砂流出の状況をモニタリングする方法を提案した。

つまり、河床材料の粒度分布は、一般には生産土砂の粒度分布（P：Production）と発達したアーマールコートの粒度分布（A：Armaring）の間にある。生産土砂の粒度分布を流域で一つに決めることはできないが、ここでは平均的な粒度分布とする。出水中の河床材料が P 線に近ければ土砂生産・流出量が多く荒廃した条件、一方、A 線に近ければ土砂流出が少ない状態を表す。A 線と P 線のどちらに近いかで流域の状況を知ることができると考えた。

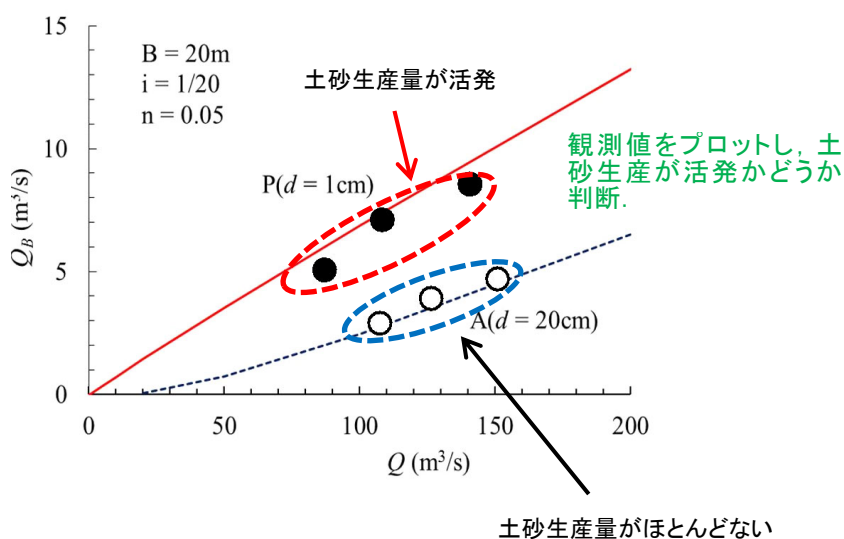


図 4-5 流砂量観測結果による土砂流出状況判定概念図<sup>1)</sup>

## 2) 観測データによる検証事例

提案する手法について適応性の検討を行うため、流砂量データが比較的継続的に取れており、かつ上流域の土砂生産状況が明確な箇所として富士川砂防管内の大武川と利根水系砂防管内の鎌田地点について整理した（図 4-6、図 4-7）。

ここで、仮に土砂生産が活発な曲線（P 線）は、流出土砂が少ない時においてもハイドロフンの検知可能と言われている粒径 5mm とし、土砂生産が少ない曲線は、観測地点周辺の河床材料調査で得られた粒度分布曲線の d90 相当粒径を用いた。

富士川砂防管内の釜無川支川である大武川は、近年、上流域で砂防施設の整備が進められ、また近年大きな出水による土砂生産のイベントも発生していないため、土砂生産が少なく、全体的に沈静化していると伺える。一方、利根水系砂防の片品川に位置する鎌田観測地点は、上流側に平成 23 年の台風出水で土砂生産があり、土砂流出が活発（P 線に近い）になり、その以降は大きな出水もないため、土砂流出がだんだん安静化に向かっていること（P 線→A 線へシフト）が確認される。つまり、P-A 曲線は、流域の土砂流出の実現象と概ね符合しており、土砂流出の状況が概ね説明できることを示している。

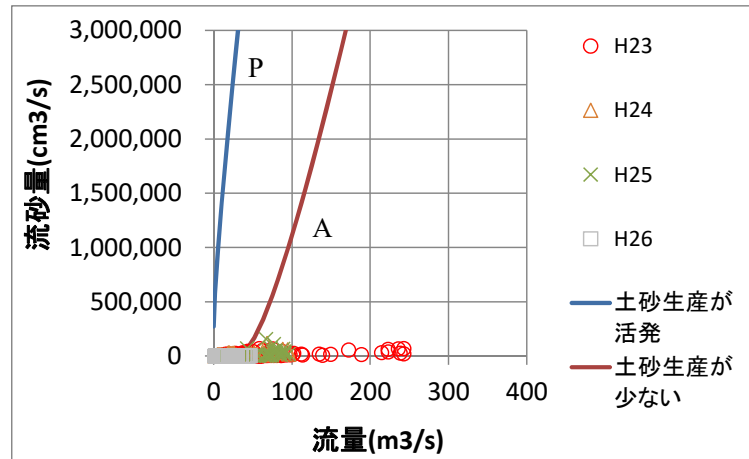


図 4-6 富士川砂防\_大武川第 50 床固地点 <sup>1)</sup>

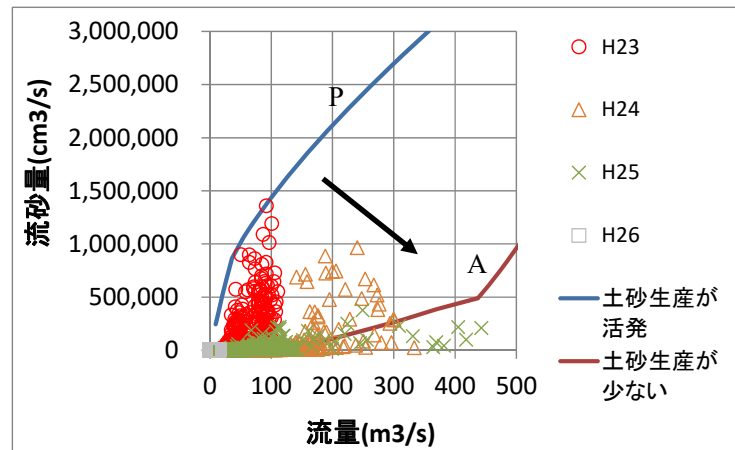


図 4-7 利根水系砂防\_鎌田地点 <sup>1)</sup>

#### (5) まとめと今後の課題

本研究では、①ハイドロフォンの観測レベルの現状を把握するため、現地データ等により、定性的には土砂流出状況を表現出来ることを確認した。しかし、②定量的には一般的な理論式による計算結果やピットでの観測結果等と比較し、未だ精度は不十分であり、その原因は出水中の代表粒径に多くよるものと考えた。さらには、その考え方をを用いて、③ハイドロフォンデータの  $Q \sim Q_s$  曲線の履歴線から、土砂流出状況とその変化が表現出来る可能性を確認した。

今後、さらに観測データが蓄積され、分析、活用方法が考案され、土砂防災、流域監視技術に活用されることが期待される。



## 4.2.2 利根川流域<sup>2)</sup>

### (1) はじめに

近年、豪雨の発生頻度が増加し、土砂災害が発生している。中でも、平成25年台風28号による伊豆大島、平成26年8月局所豪雨による広島及び令和元年度東日本台風で発生した福島で発生した大規模土砂害は記憶に新しい。一方、近年、施設の老朽化など施設の適切な維持管理が求められている。そこで、流域に応じた施設配置計画立案等の観点で平常時からの土砂流出に係わる流域の状態把握（流域監視）の重要性が高まっている。

これまで、流域の土砂生産状況の把握や施設管理を目的として、河床変動量調査や砂防堰堤等の堆砂量の調査が実施されてきた。また、近年では全国の直轄砂防事務所において、ハイドロフォンや濁度計を用いた流砂量の連続観測も実施されてきている。

そのため、本研究では、複数の観測手法を組み合わせ、流域の土砂生産や流出土砂の状況を把握することによる流域監視の評価手法について検討した。

### (2) 対象地点

利根川水系砂防事務所管内の鎌田、三原、横川、向屋の4地点で観測された流砂水文観測データのうち、水位計、ハイドロフォンの観測値について検討した(図4-8参照)。このうち、土砂生産が活発とされる三原地点を代表例として研究を行った。

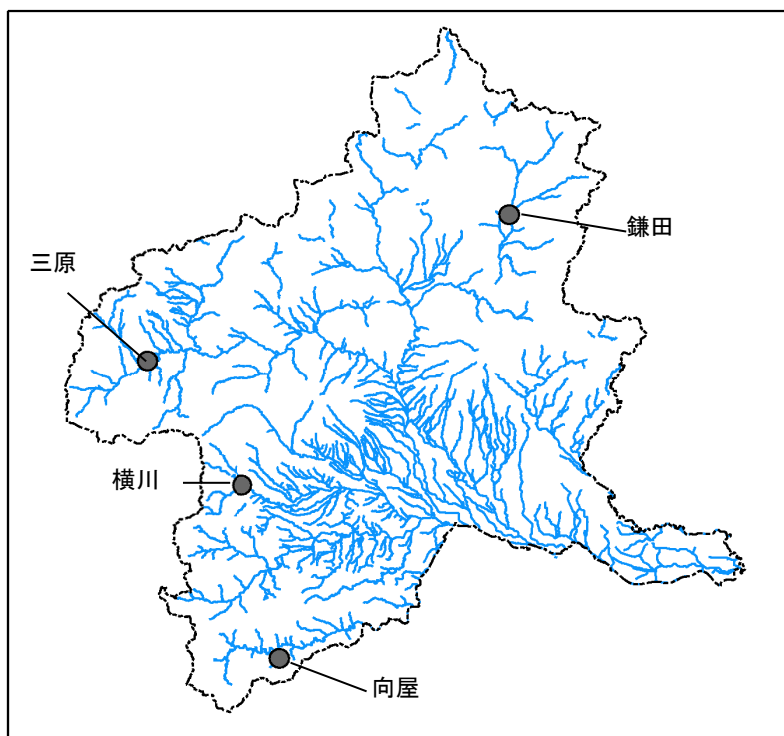


図 4-8 観測地点の位置図<sup>2)</sup>

### (3) 検討結果

#### 1) ハイドロフォンの観測値を用いた土砂流出状況の評価

平成 23 年～平成 26 年の 4 年間のハイドロフォンで観測された掃流砂量を用いて、土砂生産の状況の評価した。土砂生産の状況の評価は、観測値を無次元化し、芦田・道上の式等の一般的な掃流砂理論式と比較し、実施した。観測された掃流砂量を無次元化するにあたっては、観測地点周辺で河床材料調査の結果の粒度分布から  $d_{60}$ 、 $d_{90}$  を判読した粒径を適用した。

三原地点において掃流砂量の発生が多い出水を対象に、無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係を整理し、図 4-9 に示す。図 4-9 より、 $d_{60}$  で無次元化した無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係が  $d_{90}$  より、一般的な掃流砂理論式と近い関係にあることが確認された。これより、掃流砂として流下している代表粒径は、観測地点周辺の  $d_{60}$  に近い土砂が流下しているものと推定される。

また、図 4-9 より、観測値のプロットが平成 23 年から平成 26 年にかけて右から左にシフトしている傾向が確認された。これは、掃流砂力が小さい状態でも、同レベルの掃流砂量が発生する状態へ移行していることを示しており、流出土砂量は増加する可能性が高いと考えられる。

これより、三原地点では同じ掃流力に対しての掃流砂量が経年的に増加する傾向あり、現地での掃流砂の粒径は観測地点周辺の  $d_{60}$  粒径に近いと推定されるため、河道に安定して土砂が供給されて流下していると推定できる。

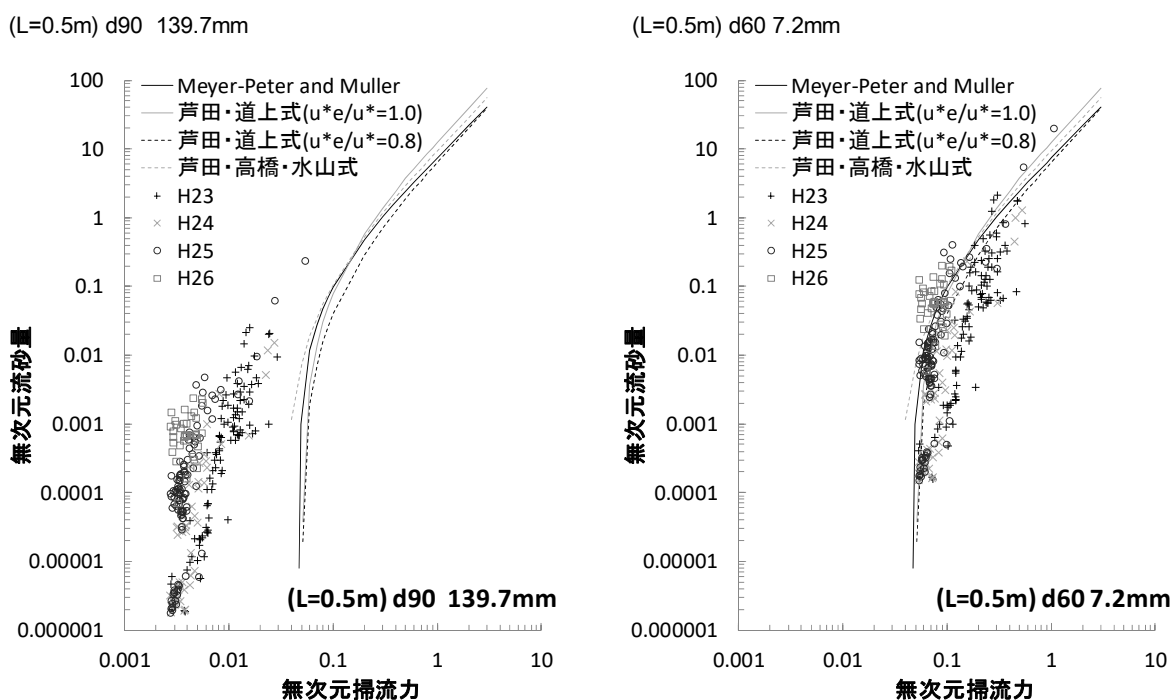


図 4-9 三原地点の無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係<sup>2)</sup>

## 2) 土砂生産域の河床変動量等を用いた土砂生産状況の評価

観測地点を含む流域の河床変動量調査結果を経年的に比較し、流域内の土砂の増加、減少傾向を確認することから、土砂生産の変化状況について推定した。なお、河床変動量調査等は、調査年によって前回調査から経過年数が異なるため、前回から今回までの経過年数あたりに換算した。

三原地点での河床変動量の経年変化を図 4-10 に示す。図 4-10 より、平成 18 年～平成 25 年の河床変動量は、平成 15 年～平成 18 年と比較すると、洗掘から堆積に変化している。これにより上流域からの土砂供給量が増加したと考えられ、この間に、上流域の土砂生産イベントが発生したと推定される。よって、三原地点は、近年は土砂生産が活発であると推定される。

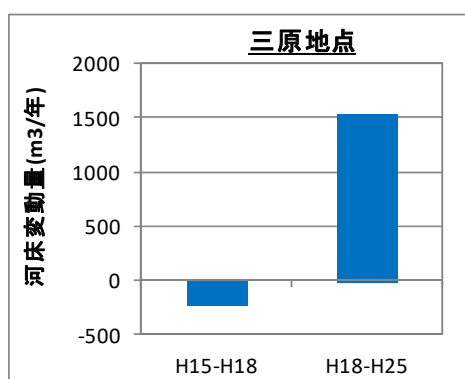


図 4-10 三原地点の河床変動量<sup>2)</sup>

## 3) まとめ

1)と 2)の整理結果より、三原地点では土砂生産が活発になり、その影響により流出土砂量が増加したことがハイドロフォンデータの履歴から推定された。事実、河床変動量調査からも流入土砂量は増加し、堆積傾向にあるため、今後も流出土砂量が活発な状態が継続するものと考えられる。なお、平成 23 年は全国的に土砂災害の多い年であり、群馬県においても土砂災害が確認されており、研究成果は妥当なものであると判断される。

## (4) まとめと今後の課題

本研究で得られた成果のまとめと課題を以下に示す。

- ・無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係から、土砂流出量の増加傾向、減少傾向を知ることが可能である。
- ・上記に観測地点を含む流域の河床変動量や砂防堰堤等の堆砂状況を組み合わせて評価することで、今後の土砂流出状況を定性的に推定できる。
- ・近年、利根川水系砂防事務所管内の 4 観測地点上流では、大規模な土砂生産イベントが発生しておらず、大規模な土砂生産が発生したときのデータがないため、その時に、無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係がどのように変化するかが不明である。そのため、今後もデータを取得、蓄積して検討を継続する必要がある。

### 4.2.3 渡良瀬川流域<sup>3)</sup>

#### (1)はじめに

渡良瀬川河川事務所では、平成23年度からハイドロフォン、濁度計等の観測機器を用いた流砂量観測を実施している。

しかし、平成23年度大規模出水の影響等により観測機器が破損・損傷し、復旧までに期間を要したため、観測データの取得状況は断続的である。

平成29年では、足尾砂防堰堤、中居砂防堰堤、赤岩橋、川口川下流砂防堰堤の4地点で流砂量観測を実施している（表4-1、図4-11参照）。

表 4-1 各施設の観測機器の設置状況<sup>3)</sup>

施設名	観測機器
足尾砂防堰堤	ハイドロフォン, 濁度計, 水位計, 浮遊砂サンプラー
中居砂防堰堤	ハイドロフォン, 濁度計, 水位計, 浮遊砂サンプラー
赤岩橋	濁度計, 水位計, 浮遊砂サンプラー
川口川下流砂防堰堤	ハイドロフォン, 濁度計, 水位計, 浮遊砂サンプラー



図 4-11 観測位置図<sup>3)</sup>

## (2) 流砂量観測結果の整理

4 観測地点のうち、草木ダムの上流に位置する足尾砂防堰堤、中居砂防堰堤の出水時の水位と単位幅掃流砂量の関係(対象：平成 23 年度，平成 28 年度，平成 29 年度)について整理した結果，2 地点の水位と単位幅掃流砂量の経年的な変化が異なることが確認された（図 4-12 参照）。

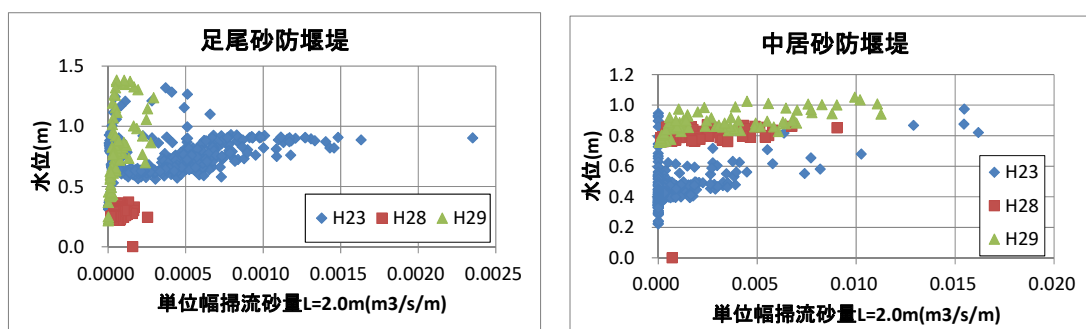


図 4-12 水位と単位幅掃流砂量の相関図(左：足尾砂防堰堤，右：中居砂防堰堤)<sup>3)</sup>

足尾砂防堰堤では，平成 23 年度と比較して，平成 28 年度，平成 29 年度は同じ水位に対して，掃流砂量が減少する傾向が確認される。

一方，中居砂防堰堤では，平成 23 年，平成 28 年，平成 29 年の水位と掃流砂量の反応は同様の反応であり，流下土砂量の減少や増加は確認されない。なお，平成 28 年度の補修の際に水位計を水通し部より約 70cm 高い位置に再設置したため，平成 28 年以降の低い水位データが取得出来ていない。

この結果より，足尾砂防堰堤では近年流下土砂量は減少しており，中居砂防堰堤では流下土砂量に変化はないと推定される。

ちなみに，足尾砂防堰堤と中居砂防堰堤における  $Q \sim Q_s$  曲線を図 4-13 に示す（渡良瀬川河川事務所データ提供）。ここでも，流砂量の減少による河床の安定と，流下土砂量に変化のないことが読み取れる。

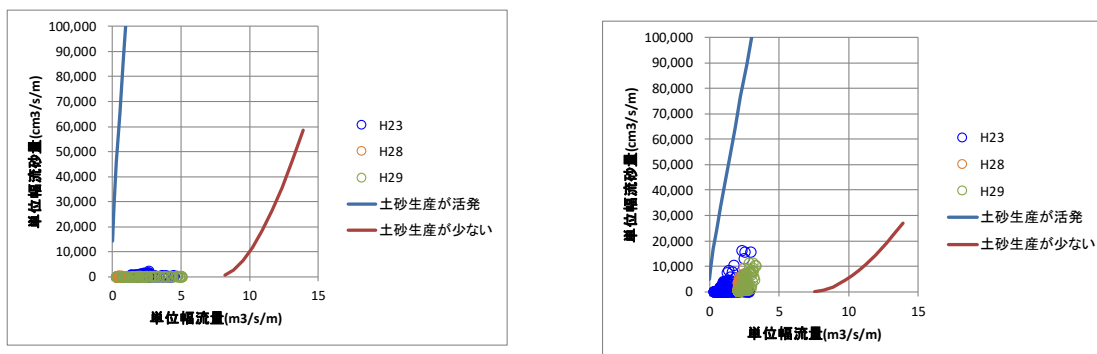


図 4-13  $Q \sim Q_s$  曲線（左：足尾砂防堰堤，右：中居砂防堰堤）

### (3) 観測地点上流の整備事業

(2)で示した流下土砂量の変化の要因を考察するため、足尾砂防堰堤、中居砂防堰堤の各流域の砂防の整備事業について整理した。

#### 1) 足尾砂防堰堤

足尾砂防堰堤の流域は、渡良瀬川流域における砂防の最重点箇所として、荒廃した斜面からの土砂流出を防ぎ、失われた緑を復元する松木山腹工の整備やNPOを通じた植樹が継続されている。

それらの効果により足尾砂防堰堤の流域では、土砂生産が年々と減少すると推定される。また、多くの砂防堰堤も整備されており、生産され、流下する土砂の多くは砂防堰堤により捕捉されていると推定される。

なお、足尾砂防堰堤の流域において、砂防堰堤の除石を実施した実績はないため、除石により流下土砂量が減少した影響はないと推定される。

表 4-2 足尾砂防堰堤の砂防整備状況<sup>3)</sup>

施設	整備状況
山腹工	松木山腹, 松木山腹工
砂防堰堤	足尾砂防堰堤, 松木1号砂防堰堤等の33基
床固群	オオガキ沢床固群

#### 2) 中居砂防堰堤

中居砂防堰堤の残流域では、神子内川流路工を始め、複数の流路工が整備されており、支流からの流出土砂が渡良瀬川本川まで流下しやすい環境に整備されている。また、床固群も整備されており、河床勾配は安定しており、土砂流出の環境は安定している。

そのため、中居砂防堰堤の残流域では、足尾砂防堰堤の流域と比較して、生産された土砂は支流を経由し、本川に供給され、土砂が下流に安定して流下しやすい環境にあると推定される。

表 4-3 中居砂防堰堤の砂防整備状況<sup>3)</sup>

施設	整備状況
砂防堰堤	中居砂防堰堤, 神子内砂防堰堤等の40基
流路工	神内子川流路工, 下平沢流路工等の3基
床固群	足尾ダム床固群, 神内子川上流床固群等の6基



#### (4) 土砂流出に関するまとめと課題

上記の(2)と(3)の結果より，以下のことが確認され，水位計とハイドロフォンの観測結果に基づき，上流域の砂防事業の効果を評価できると考えられる。

- ①足尾砂防堰堤の流域では，平成 24 年度以降も松木山腹工の整備や植樹が進められており，また流砂量観測機器が設置される以前からも整備されている効果が寄与し始め，平成 23 年度と比較して，平成 28 年度，平成 29 年度は土砂生産が抑制されていると推定される．そのため，水位と掃流砂量の相関関係より，平成 28 年度，平成 29 年度は平成 23 年度と比較して，水位が上昇しても掃流砂量が増加しない環境であると推定される．
- ②中居砂防堰堤の流域では，流路工，床固群の整備により，土砂流出が安定していると推定される．そのため，水位と掃流砂量の関係より，平成 23 年度，平成 28 年度，平成 29 年度ともに水位の上昇に伴い，掃流砂量が増加しており，安定して土砂が流出する環境であると推定される．
- ③以上より，水位と掃流砂量の関係に基づき，上流域での砂防事業の効果を確認でき，経年的にデータを蓄積すれば，砂防事業の事業評価にも活用できることがわかった．

今後の課題を以下に示す．

- ・足尾砂防堰堤，中居砂防堰堤の観測データは平成 23 年度，平成 28 年度，平成 29 年度の 3 か年のみであり，データが少ないため，今後もデータを蓄積する必要がある．
- ・本論文では，ハイドロフォンに着目してデータ整理を実施したが，濁度計で観測された土砂容積濃度を用いた整理も含めた研究も必要である．

#### (5) 警戒避難情報提供システムの検討

ハイドロフォンのリアルタイム流砂観測情報を警戒避難情報として活用できないか検討した．ハイドロフォンで観測される掃流砂量のデータ値の精度には未だ課題があるが，掃流砂量の変化は確実にとらえている．よって，観測された掃流砂量の絶対値ではなく，観測された掃流砂量の経時的な変化に着目して，上流域での土砂イベントの発生の有無，発生時刻などを知ることが出来る．また，渡良瀬川上流域では光ファイバーによる通信システム網が配備されており，ハイドロフォンによる流砂量や水位計，濁度計の観測値がリアルタイムで演算されグラフ化されて事務所の PC 画面で見ることが出来る．図 4-14 に渡良瀬川上流域でのハイドロフォンによる流砂量情報等の情報システムの全体構成のイメージを示す．また，事務所 PC の表示画面構成（イメージ）を図 4-15 に示す．

渡良瀬川上流域では，このようなシステムが整備されており，また，富士川砂防管内でも整備検討が実施されている．土砂災害は土砂の到達時間が短いことから，このような土砂災害避難情報システム（案）を整備していくことは有効かつ必要と考える．

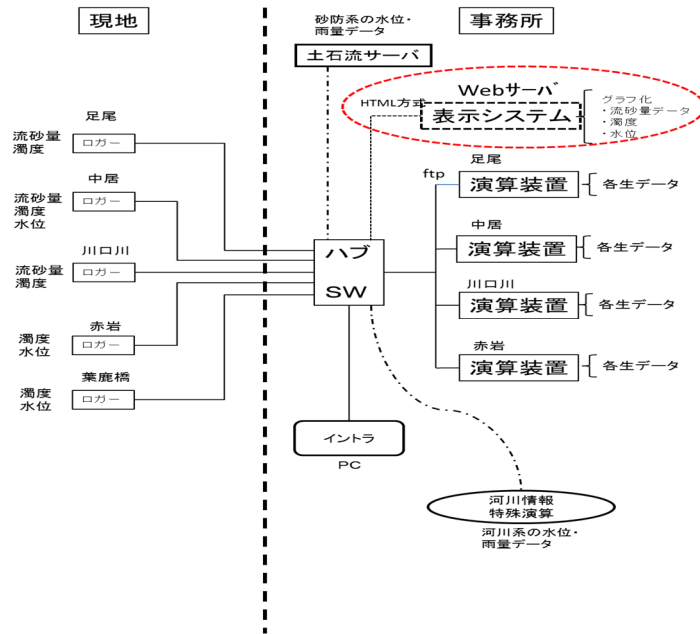


図 4-14 全体構成のイメージ

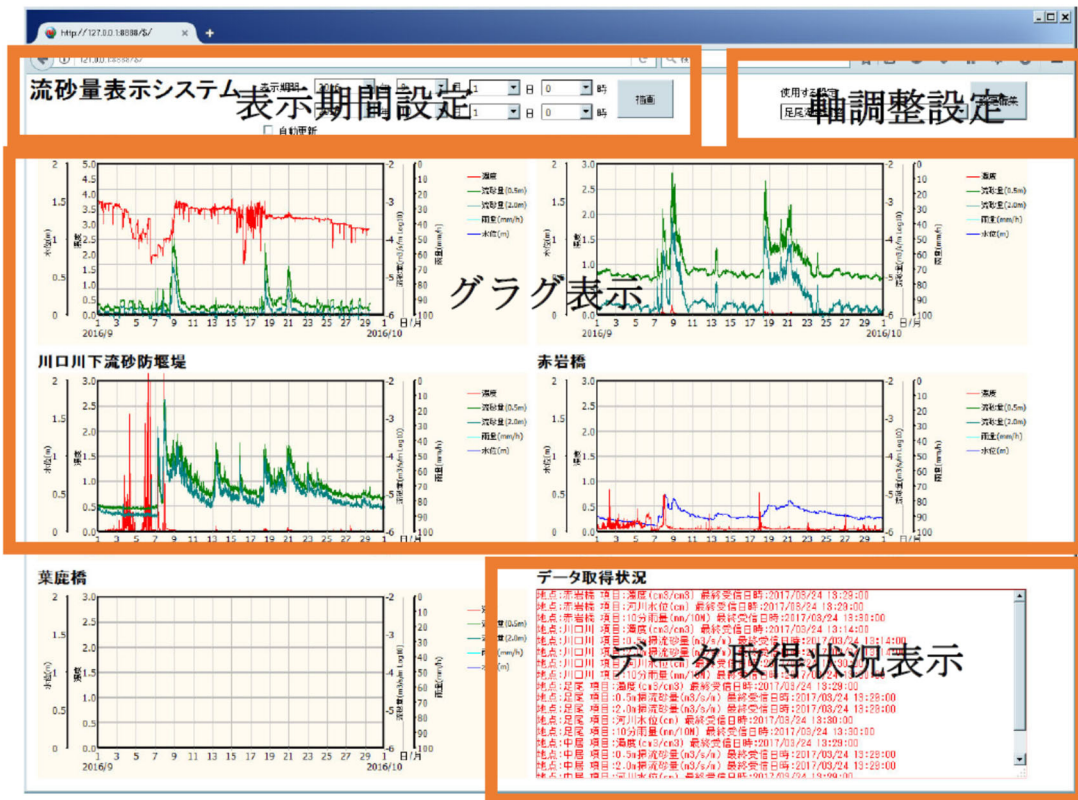


図 4-15 流砂情報表示画面構成 (イメージ)



### 4.3 ダム域<sup>4)</sup>

#### 4.3.1 はじめに

日本のダムでは、計画堆砂容量を設けているものの、中部地方を中心に急速に堆砂速度が増加し、堆砂率が100%に近付いている。ダムの堆砂は、発電取水口の土砂埋没や貯水池の利水・治水容量の減少、下流河川への土砂供給の減少などを引き起こし対策が喫緊の課題である。ダムの堆砂対策には、貯砂ダムと組み合わせた掘削や浚渫、スルーシングやゲート排砂等がある。その一つである排砂バイパストンネル(Sediment Bypass Tunnel 以後 SBT)は、旭ダム、美和ダムなどで実用化され、流入土砂の迂回により堆砂量の抑制に貢献しており、天竜川の小渋ダムでも2016年から運用が開始されている。<sup>5), 6), 7), 8)</sup>

SBTの運用上の課題は、洪水ハイドロの中で、洪水調節や利水容量の回復に伴う貯水池の水位操作と、ダムへの土砂流入を防止するバイパス運用操作の、いわば相反する切り替え操作を、いかに効率的に行うかであり、久保田ら<sup>9)</sup>は、SBT入口(分派湖)の土砂堆積量が分派効率に影響することを指摘した。

一方、ダム上流からの土砂流入は一定ではなく、より一層のダムの土砂管理の高度化のためには、ダム上流河道での流砂観測との連携が重要であるが、具体的事例は美和ダム<sup>10)</sup>などに限られ、特に掃流砂を観測している事例はほとんど見られない。天竜川の支川に位置する長野県の小渋ダム上流部では、砂防の土砂動態の把握のために、流入する小渋川と支川の鹿塩川にプレート型とパイプ型のハイドロフォンや濁度計などが設置され、連続的な流砂観測が行われている。ハイドロフォンに関する研究は砂防分野を中心に進められてきている<sup>11)</sup>が、ダム運用には活用されていない。

そこで本研究では、これら観測システムのデータを分析することで、より精度を高めた複数の洪水波形に伴う流入土砂の動態を明らかにし、下流に位置するSBTの効率的な運用操作に活用するための知見を整理することを目的としている。

#### 4.3.2 観測概要

##### (1) 観測地点の概要(小渋ダム)

小渋ダムは長野県天竜川水系小渋川に建設された多目的ダムである。本ダムはSBTを導入しており、流量が100 m<sup>3</sup>/s以上の時にバイパスゲートを開けることとしている。小渋ダムの上流(流域面積288 km<sup>2</sup>)は本川の小渋川と支川の鹿塩川に分かれており、この2か所で観測している(図4-16)。小渋川大河原地点(大河原床固工1・2号)は、流域面積134.8 km<sup>2</sup>、川幅60 m、河床勾配約1/70(図4-17)、また、鹿塩川鹿塩地点は、流域面積52.3 km<sup>2</sup>、川幅31.7 m、河床勾配約1/31である(図4-18)。



図 4-16 観測地点の概要<sup>4)</sup>

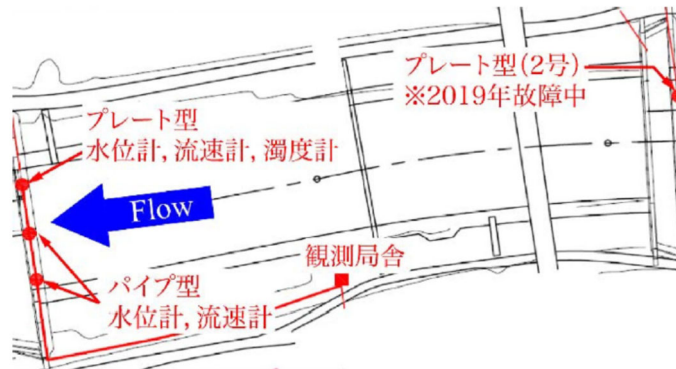


図 4-17 小渋川大河原床固1号地点の観測機器の設置状況（国交省提供）<sup>4)</sup>

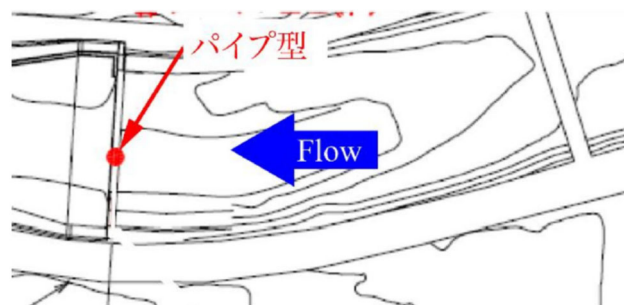


図 4-18 鹿塩川鹿塩（大河原床固2号）地点の観測機器の設置状況（国交省提供）<sup>4)</sup>

## (2) 観測施設の概要

小渋ダム上流部では、流入する小渋川（大河原）と支川の鹿塩川それぞれにおいて、2016年から2019年まで1分間隔で水文及び流砂観測が行われている。大河原床固工1号では掃流砂観測のために、左岸・中央・右岸側の3か所にハイドロフォン（ハイドロフォン）が設置されており、右岸がプレート型（L=幅50cm×長20cm，板厚12mm）で、中央・左岸はパイプ型（L=幅50mm，径48.6mm，肉厚3-4mm）である。大河原床固工2号はパイプ型1基のみであるが2019年から故障している。鹿塩川はパイプ型を1基用いた計測が行われた。

パルス数が記録されている年もあるが、観測機器設置時に現地水路実験を行って作成したキャリブレーション式を用いて掃流砂量へ変換済みのデータを入力している。計測項目は、掃流砂量、水位、流速、濁度である。

### 4.3.3 結果と考察

#### (1) 出水イベントの抽出

2016年から2019年まで計測しているが、2019年は観測機器の故障による欠測値やエラー値が多いため、2016年1月から2018年10月に発生した出水を対象とする。その中でも大小様々な流入量がある2018年の出水を中心に示した。

#### (2) パイプ型とプレート型による掃流砂観測値の比較

図4-19、図4-20、図4-21に、それぞれ2018年融雪期中から最初の1出水を抜き出したもの、7月の梅雨期、9月前半に発生した台風21号による出水の台風期1における大河原地点の流量と全幅掃流砂量の関係を示す。▼印は洪水ピーク流量を観測した時点を示し、それ以前を増水期、以後を減水期とする。融雪期における出水（図4-19）では、流量の低減に伴い掃流砂量も低減することが確認できる。一方、梅雨期（図4-20）、台風期1（図4-21）の掃流砂量のピークは、流量ピークよりやや遅れるとともに、流量低減期も長時間流砂が継続する傾向がある。

プレート型（右岸）とパイプ型（左岸）それぞれの計測データについて詳細に示す。図4-22にピーク流量が約25 m<sup>3</sup>/s、約100 m<sup>3</sup>/sの出水のパイプ型（左岸）による掃流砂観測値を示す。ピーク流量が約25 m<sup>3</sup>/sの出水規模では、流量と掃流砂量の波形は一致しており、出水後の減水に従って掃流砂量も減っている。一方ピーク流量が約100 m<sup>3</sup>/sの時は、流量と掃流砂量の立ち上がりは一致しているが、流量のピークや減水期は反映されておらず、計測値が頭打ちとなり、掃流砂量の過小評価を招いた可能性が考えられる。

図4-23にピーク流量が約25 m<sup>3</sup>/s、約100 m<sup>3</sup>/sにおけるプレート型（右岸）による掃流砂観測値を示す。プレート型においても、ピーク流量約25 m<sup>3</sup>/sでは、流量と掃流砂量の波形は一致しており、良好に計測できている。ピーク流量が約100 m<sup>3</sup>/sの時は、パイプ型同様に流量ピーク時の掃流砂量はやや頭打ちとなっているものの、立ち上がりは良好に反映できており、パイプ型よりも良好に計測できている。

これらのことから、小・中規模出水時はパイプ型もプレート型も良好に計測できているが、大規模出水時にはパイプ型は観測値の頭打ち（飽和）が発生していることから、プレート型の観測値の方が流砂量評価には適していると考えられる。

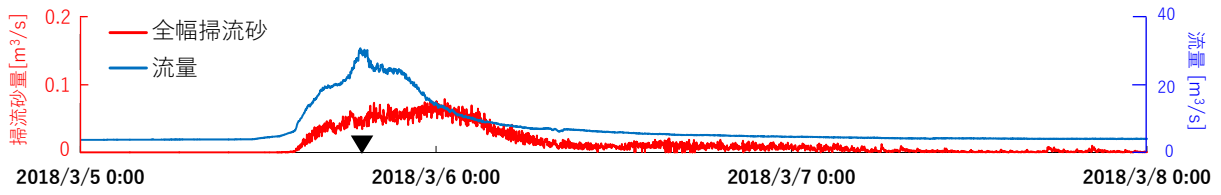


図 4-19 大河原地点における流量と掃流砂量（2018年3月：融雪期）<sup>4)</sup>

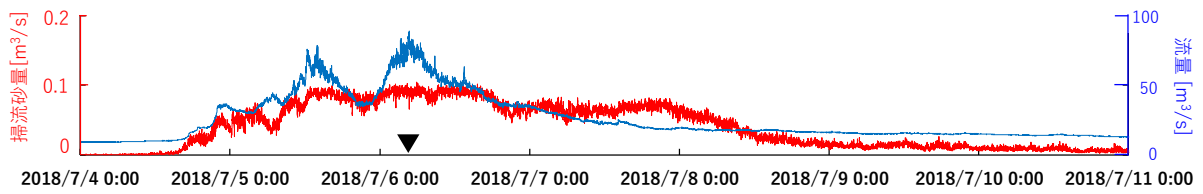


図 4-20 大河原地点における流量と掃流砂量（2018年7月：梅雨期）<sup>4)</sup>

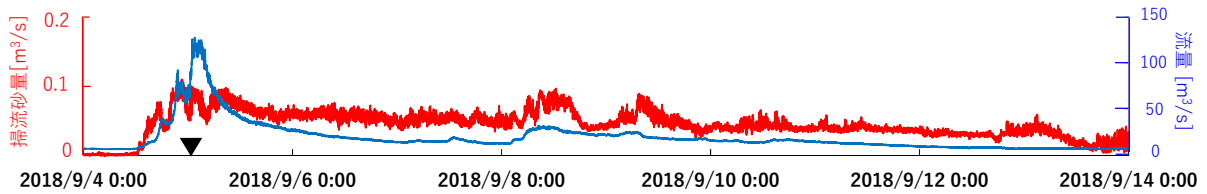


図 4-21 大河原地点における流量と掃流砂量（2018年9月：台風期1）<sup>4)</sup>

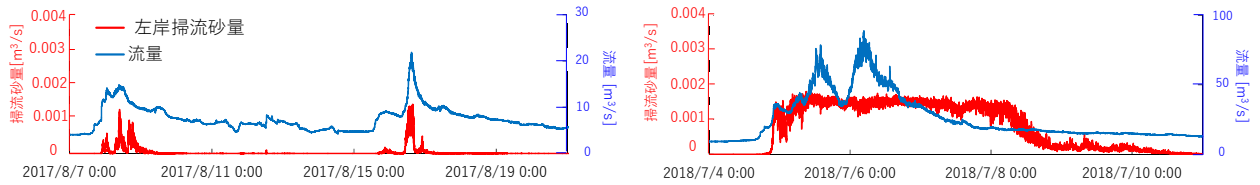


図 4-22 パイプ型による掃流砂計測（左：ピーク流量 25 m<sup>3</sup>/s，右：ピーク流量 100 m<sup>3</sup>/s）<sup>4)</sup>

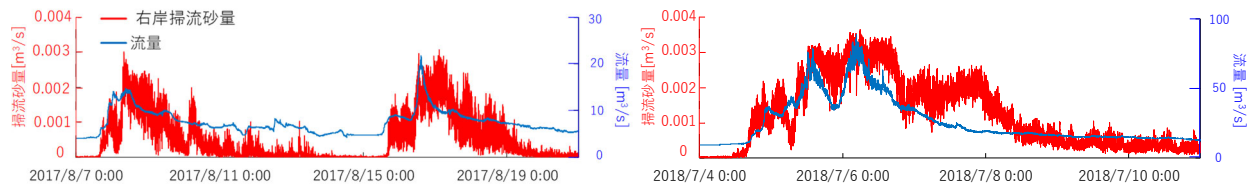


図 4-23 プレート型による掃流砂計測（左：ピーク流量 25 m<sup>3</sup>/s，右：ピーク流量 100 m<sup>3</sup>/s）<sup>4)</sup>

### (3) 流砂の履歴と Q-Qs 式の提示

図 4-24 に大河原における 2018 年の 3 出水（融雪期，梅雨期，台風期）を抜き出した流量と掃流砂量の関係（Q-Qs 関係式）を時系列（青側（増水期）→赤側（減水期））で示す。

▼印はそれぞれの出水におけるピーク流量を記録したデータを示し，図 4-19，図 4-20，図 4-21 中のピーク流量時点と対応している。Q-Qs 関係式から，洪水履歴が把握でき，ヒステリシスループは反時計回りとなり，減水期のほうが多くの土砂が流れていることが確認できる。一般に，ウォッシュロードは，増水期に土砂濃度が高く，減水期に低くなる時計回りのヒステリシスループが見られることが多い<sup>12)</sup>。これに対し掃流砂は，すでに河道内に土砂があるか，あるいは，河岸などから削れてくるかといったように，どこに土砂供給源があるかによってループは変わってくる<sup>13), 14)</sup>。小渋ダム上流では，掃流砂はどの出水期でも反時計回りのループを示した。このことから，大河原では遅れて土砂が流れてくることがわかる。特に年間を通して前半の出水ほど反時計回りのループが顕著であることが確認できた。

2018 年の融雪期，梅雨期，台風期における Q-Qs 関係式から，それぞれを合体させ，2018 年全体としての Q-Qs 関係式を大河原地点，鹿塩地点をそれぞれ図 4-25，図 4-26 に示す。左は出水全体で，中央・右は増水期と減水期で分けた。流量の増減とともに掃流砂量も増減する関係が得られた。しかし，増水期と減水期で示す挙動は異なっており，図 4-24 で示したとおり，同じ流量でも増水期より減水期のほうが掃流砂量が大きくなっている。

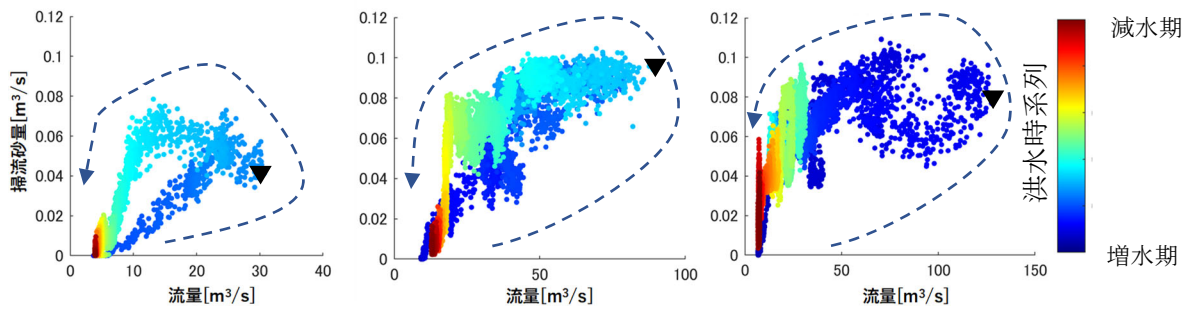


図 4-24 2018 年大河原における洪水履歴と掃流砂量（左：融雪期，中央：梅雨期，右：台風期）<sup>4)</sup> 一部改変

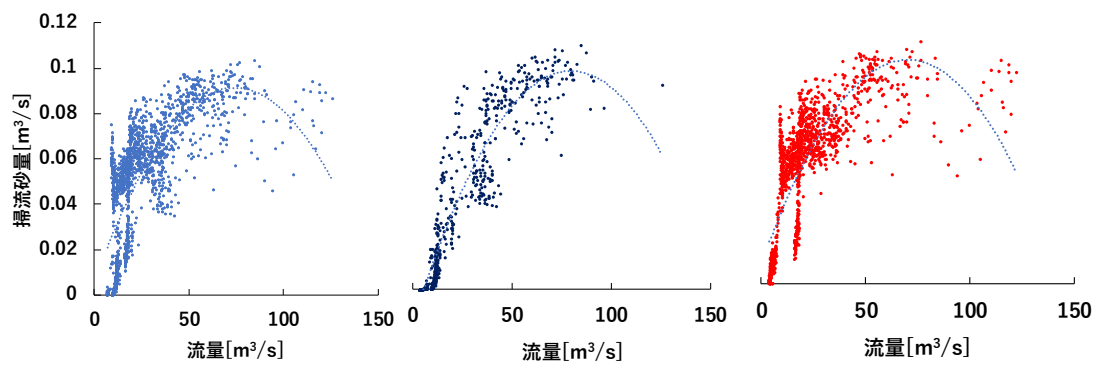


図 4-25 大河原地点における掃流砂の流入特性（左：全体，中央：増水期，右：減水期）<sup>4)</sup>

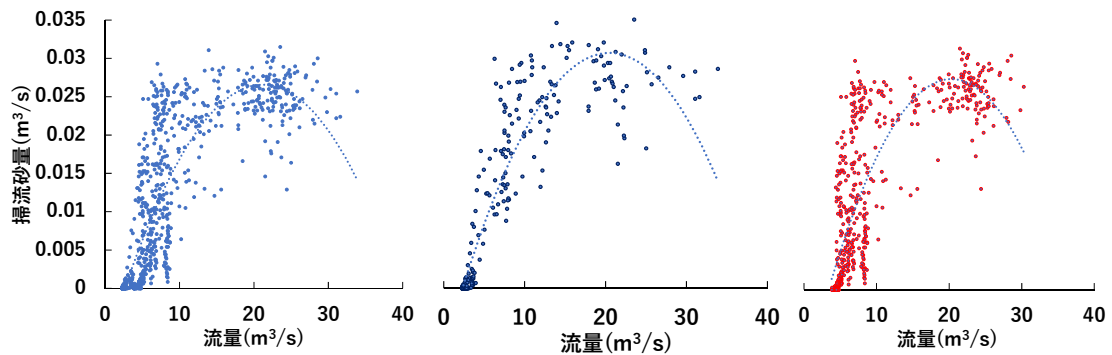


図 4-26 鹿塩地点における掃流砂の流入特性（左：全体，中央：増水期，右：減水期）<sup>4)</sup>

#### (4) 年間の季節変化による流入土砂特性

2018 年大河原と鹿塩川の掃流砂量と流量の時系列の関係を図 4-27、図 4-28 に示す。SBT は梅雨期と台風期のみ運用されている。鹿塩川は、7 月の出水時以降は観測機器の故障により欠測している。大河原のデータについて、一年間を融雪期、梅雨期、台風期に分けることができ、流入土砂量の比率は、梅雨期や台風期の大規模出水時が過半数を占めている。一方、融雪期の出水は非洪水期であり、小さいピークの連続であるものの、総流入土砂量は年間の約 1/4 を占めており、洪水期と同程度の無視できない土砂量であることが分かる。

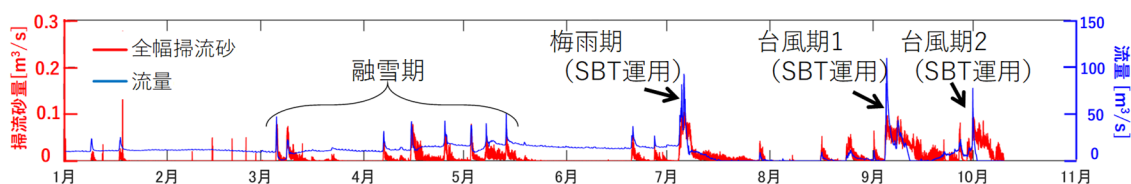


図 4-27 流量と掃流砂量の関係 (2018 年 大河原) 4)

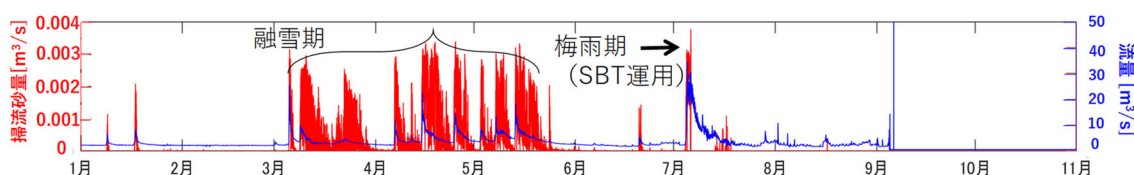


図 4-28 流量と掃流砂量の関係 (2018 年 鹿塩) 4)

#### (5) 無次元掃流砂量の理論式との比較

##### 1) 無次元掃流力と無次元掃流砂量の計算

大河原地点における流砂量の発生レベルを検討するために、観測した掃流砂量を用いて無次元掃流砂量を算出し、芦田道上式から算出した流砂量式 (理論式) と比較した。無次元掃流力 ( $\tau_*$ ) を以下の式 (1) により求めた。

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} = \frac{Ri_e}{(\sigma/\rho - 1)d} \quad (1)$$

ここで、 $u_*$  は摩擦速度 (m/s)、 $\sigma$  は砂礫の比重 (2.65)、 $\rho$  は水の比重 (1)、 $g$  は重力加速度 (9.8m/s<sup>2</sup>)、 $d$  は代表粒径 (m)、 $R$  は径深 (m)、 $i_e$  はエネルギー勾配 (m/m) である。代表粒径はハイドロフォンで検知することができる粒径が 2mm 以上であるため、2mm とし<sup>13)</sup>、径深には各時観測水位 (m)、エネルギー勾配は河床勾配を用いた。また、無次元掃流砂量 ( $q_{b*}$ ) は以下の式 (2) により求めた。

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

ここで、 $q_b$  はハイドロフォンにより求めた単位幅掃流砂量 (m<sup>3</sup>/s/m) である。

## 2) 無次元掃流砂量の理論式との比較と考察

図 4-29 に 2016 年から 2018 年にハイドロフォンで計測された掃流砂量に基づく無次元掃流砂と無次元掃流力の関係を示す（単一粒径 2mm と仮定）。また、破線は芦田道上式による。融雪期，梅雨期，台風期いずれも最初の 1 出水を抜き出したものである。いずれの年も大河原地点における無次元掃流砂量はピーク流量時近傍で，芦田道上式による平衡流砂量と近い値を示している一方，支川鹿塩川鹿塩地点ではピーク時でも比較的低い値を示していた。観測地点によって無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係は大きく異なり，大河原地点は掃流力に対して掃流砂量が多いことを示している。これは，地形的にも小渋川は中央構造線上に位置し，土砂生産が多いため，流出土砂も他の地域よりも多いと考えられる。

季節別でみると，2016 年，2017 年は梅雨期や台風期に土砂が流れやすいという同じ挙動を示している。一方で 2018 年は融雪期の出水が最も流砂量が多くなっていることが確認できる。流砂量は，前後の出水はもちろん，数年かそれ以上に一度の大規模出水にも関係する可能性がある<sup>13)</sup>。よって 2018 年の融雪期による出水は，2017 年の最後の台風時に流出した土砂や，2017 年秋から春までの期間による小さな出水によって土砂生産が行われ，河道内に土砂がたまっており，土砂が流れやすい状況を生み出していたのではないかと考えられる。

2017 年融雪期前は，あまり小さい出水が見受けられず，2016 年の台風による出水も小さかった。これらのことから，大河原地点は土砂が発生しやすく，また，土砂の発生は季節によって変化し，その前後の小さな出水や前年におきた出水の規模の影響を受けることが分かった。このような洪水履歴に対する掃流砂の動態把握はダムの土砂管理上重要である<sup>14)</sup>。

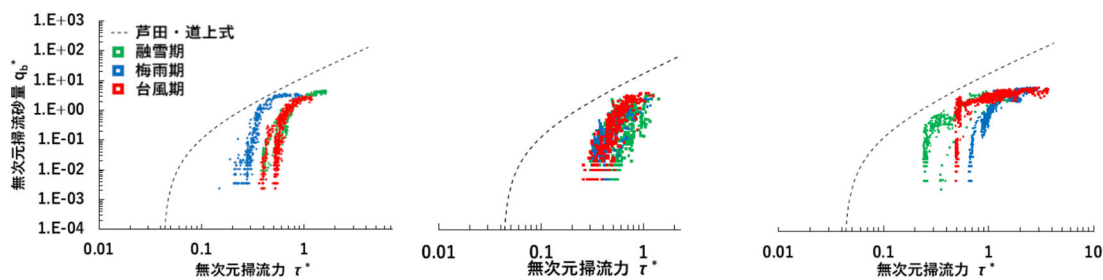


図 4-29 大河原地点における無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係（左：2018 年，中央：2017 年，右：2016 年）<sup>4)</sup>



#### 4.3.4 まとめと今後の課題

小渋ダム上流では高度な水文・流砂観測が行われており、本研究では、掃流砂に関するパイプ型とプレート型両方のハイドロフォンの計測特性、また、これを用いた流量規模ごと、季節ごとの掃流砂量の変化、さらに洪水ピークに対する掃流砂の流下特性について検討し、以下のことが確認できた。

- ・パイプ型とプレート型ハイドロフォンでは、プレート型センサーの方が大きな流量時にも安定的に計測が可能である。
- ・ウォッシュロードは流量との相関が良いが、掃流砂は流量のピークから遅れる傾向がある。また、減水期にも掃流砂の流下が継続しており、その原因の一つとして、河道内に豊富な土砂が存在し、かつ、洪水後に遅れて土砂が流れ着いていることも考えられる。
- ・年間の掃流砂量の比較から、現在排砂バイパストンネルの運用をしていない融雪期の出水にも年間流入土砂量の約 1/4 がダムへ流入している。
- ・小渋川における掃流砂量の発生レベルは、季節によって変化する。これは毎年同じ傾向を示すのではなく、事前に土砂が供給されているか、直前の出水や前年の全体的な出水規模に影響していると考えられる。

今後は、これらのダム上流の土砂動態を踏まえ、さらに、バイパスゲート付近の土砂動態の状況を見つつ、排砂バイパスの効率的な運用について検討する必要がある。

#### 4.4 まとめ

本章では、砂防域 3 事例、ダム域 1 事例のハイドロフォンの土砂管理に利用した研究事例を記載した。

砂防域のハイドロフォンの土砂管理に利用した研究事例として、富士川流域等、利根川流域、渡良瀬川を挙げた。富士川流域等では、ハイドロフォンの観測結果より、定性的に土砂流出状況を表現できること及び  $Q \sim Q_s$  曲線の履歴線から土砂流出状況とその変化を確認できることを示した。次に、利根川流域では、無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係から土砂流出量の増加傾向・減少傾向を把握すること及び前述の関係に観測地点を含む流域の河床変動量や砂防堰堤等の堆砂状況を組み合わせて評価することで今後の土砂流出状況を定性的に推定できることを示した。さらには、渡良瀬では、水位と掃流砂量の関係に基づき、上流域での砂防事業の効果を確認でき、経年的にデータを蓄積することで砂防事業の事業評価にも活用できることを示した。また、リアルタイム流砂量情報を光ファイバー網により事務所PCで見る情報システムを整備することにより、迅速な避難情報に資することを示した。

ダム域のハイドロフォンの土砂管理に利用した研究事例として、小渋ダムを挙げた。小渋ダムでは、掃流砂に関するパイプ型とプレート型両方のハイドロフォンの計測特性、また、これを用いた流量規模ごと、季節ごとの掃流砂量の変化、さらに洪水ピークに対する掃流砂の流下特性について示した。

上記の内容は、砂防域、ダム域の土砂流出状況の実態把握、砂防事業評価及びダムの SBT 運用に対する留意点等の今後の土砂管理、避難警戒情報の整備を進める上で有意義なものと考える。

## 参考文献

- 1) 富田邦裕, 叶正興, 重村一馬, 藤田正治, 堤大三: ハイドロフォンデータを用いた上流域の土砂流出状況の評価手法に関する提案: 第 64 回平成 27 年度砂防学会研究発表会概要集 p. A-128-129, 2015
- 2) 神野忠広, 竹本隆之, 杵淵新一, 内田太郎, 富田邦裕, 重村一馬: 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: 第 64 回平成 27 年度砂防学会研究発表会概要集 p. B-246-247, 2015
- 3) 牛腸宏, 田中秀夫, 富山昌延, 黒岩忠夫, 富田邦裕, 叶正興, 山本和彦, 重村一馬: ハイドロフォンデータによる砂防事業効果評価の可能性に関する一考察: 第 67 回平成 30 年度砂防学会研究発表会概要集 p. 395-396, 2018
- 4) 三浦爽・富田邦裕・叶正興・小柴孝太, 角哲也: ダムの排砂バイパストンネル運用のためのパイプ型およびプレート型インパクトセンサーを用いた流入土砂動態把握手法の高度化, 河川技術論文集, 第 26 巻, p.125-30, 2020 年 6 月
- 5) 小柴孝太, 角哲也: 小渋ダム排砂バイパストンネルにおけるインパクトプレートを用いた掃流砂量計測, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, p.I\_841-I\_846, 2018
- 6) 国土交通省天竜川ダム統合管理事務所: 第6 回小渋ダム土砂バイパストンネルモニタリング委員会資料(平成31 年3 月14 日), 国土交通省天竜川ダム統合管理事務所, 2019
- 7) Ishida,K.Sakurai,T.and Sumi,T.: Operation results of the Koshiibu Dam sediment bypass tunnel completed in 2016, Conference proceedings of the Third International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, Taipei, Taiwan. , April 2019
- 8) 小林草平, 小柴孝太, 角哲也, 竹門康弘, Kantoush Sameh: 2018 年排砂バイパス運用による小渋ダム下流における河岸侵食と流路変化, 京都大学防災研究所年報. 62 B, p.775-785, 2019
- 9) 久保田踊児, 米山望, 角哲也: 小渋ダムにおける河道内堆 砂位が土砂バイパスの分派特性に与える影響, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.72, No.4, p.I\_679-I\_684, 2016
- 10) Sameh A. Kantoush, Tetsuya Sumi and Mitsuhiro Murasaki: Evaluation of Sediment Bypass Efficiency by Flow Field and Sediment Concentration Monitoring Techniques, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.55, p.S169-S174, 2011
- 11) 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, Vol. 55, No.3, p.56-59, 2002
- 12) 角哲也, 岡野眞久(監修), Reservoir Sedimentation 研究会(監訳): 貯水池土砂管理ハンドブック- 流域対策・流砂技術・下流河川環境, 技報堂出版, 2010
- 13) 小林草平, 竹門康弘, 角哲也, 富阪和秀, 山崎友也, 米田 格, 堤大三: ハイドロフォンによるダム流入土砂量把握の高度化に関する研究, 河川技術論文集, Vol.19, p.147-152, 2013

14) 富阪和秀, 山崎友也, 米田格, 小林草平, 竹門康弘, 角哲也, 堤大三: 布目ダム上流におけるハイドロフォン観測による流砂の洪水履歴の検討, 河川技術論文集, Vol.20, p.43-48, 2014

## 第5章. ハイドロフォン以外の流砂量観測技術の土砂管理への利活用

### 5.1 序説

本章においては、前章に示したハイドロフォン以外の流砂量観測技術を活用した土砂管理への利活用の研究成果を示す。

研究成果としては、黒部川の UAV, 松本砂防事務所の水位データ及び CCTV 画像の活用、富士川流域の SAR を挙げる。

### 5.2 黒部川の事例<sup>1)</sup>

黒川河川事務所では不帰谷から黒部川への土砂流出を監視するため、様々な観測が行われており、そのうちの一部をここで紹介する。

#### 5.2.1 はじめに

不帰谷では多くの土砂が流出し、土砂災害が今もなお発生しており、それらの流出した土砂が本川に合流すると本川河床に堆積し、河床上昇を引き起こし、出水時には本川の流下能力阻害となって、災害が発生する恐れがある。このため、防災・減災の観点から、不帰谷からの流出土砂及び黒部川合流部への影響を的確に把握する必要があり、不帰谷からの土砂流出状況、合流部の状況を適宜把握する監視手法が検討されている。



図 5-1 不帰谷の位置図<sup>1)</sup>

### 5.2.2 監視手法

不帰谷では、不帰谷合流部付近に設置された CCTV カメラの映像と測量及びLPによる河床変動量により不帰谷からの土砂流出状況が監視されているが、より効率化させるため、不帰谷及び不帰谷合流部付近の土砂流出状況を監視する手法の候補として、複数の手法を調査した結果、適用可能である①UAV、②CCTV カメラ及び赤外線カメラ、③3D レーザースキャナーが選定された。それぞれの特徴は表 5-1 の通りである。

表 5-1 監視手法の特徴<sup>1)</sup>

監視手法	特 徴
UAV	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上空からの河床、流路等の位置を上空から把握することができる。</li> <li>・地盤高、河床材料の調査も可能である。</li> </ul>
CCTV カメラ及び赤外線カメラ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・河川や土砂の移動を把握することができる。</li> <li>・旋回式でカメラの向きをセットできるため、複数の撮影スポットの定点観測が可能である。</li> <li>・赤外線カメラを利用すれば、夜間時の監視と撮影も可能である。</li> </ul>
3D レーザースキャナー	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地盤の空間情報（位置情報、標高）の把握が可能である。</li> <li>・設置式であり、遠隔で、出水時の計測が可能である。</li> </ul>

### 5.2.3 監視方法

#### (1) UAV

不帰谷合流部付近で UAV を用いた調査事例を示す。

UAV を用いて撮影した写真を図 5-2 に示す。図 5-2 より、地盤と流路の関係は把握することが可能である。また、ヘリと比較して、準備期間が少なくコストも安価であるため、対象範囲が小さく、徒歩でアクセス可能な箇所については、UAV での撮影は有効である。

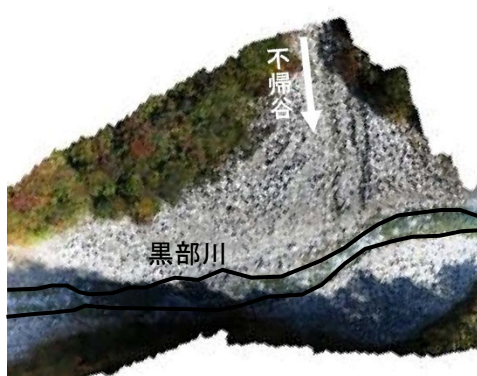


図 5-2 UAV 写真撮影<sup>1)</sup>

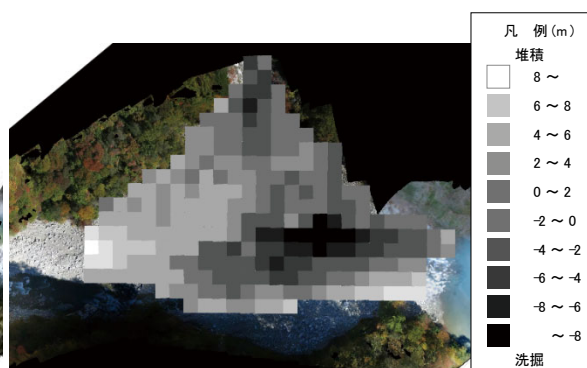


図 5-3 地盤高変動図<sup>1)</sup>

また、UAV を用いて撮影した写真から地盤高を算定した。算定した地盤高と平成 26 年の測量成果の差分を用いて、地盤高変動図を図 5-3 示す。図 5-3 より、堆積箇所、洗掘箇所を把握できる。これより、トータルステーション等を活用した測量を実施しなくても、UAV を飛行させ、写真を撮影することにより、地盤高及び地盤高の履歴と変動が把握することができる。

## (2) CCTV カメラ及び赤外線カメラ

不帰谷合流部付近に CCTV カメラが設置されており、不帰谷からの土砂流出状況が監視されている。しかし、夜間時は、照明等がないため、監視できない状況であり、また、不帰谷合流部は環境省の国立公園内でもあるため、景観に留意する必要がある、照明等の設置等も可能か検討を要し、制約がある。

そのため、赤外線カメラで、夜間時の土砂流出の監視可能かどうか検討した。ここでは、夜間に不帰谷合流部で撮影できなかったのを、黒部川沿いで夜間に赤外線カメラ、ビデオカメラで撮影した河川の映像を図 5-4 に示す。

図 5-4 より、赤外線カメラは夜間時でも河川の状況を把握でき監視可能であるが、ビデオカメラでは画像が暗く、河川の状況を把握することができないことが確認された。そのため、夜間も含めて土砂流出を監視するためには、赤外線機能を有するカメラが有効となる。そこで、CCTV カメラの機種について調査すると、赤外線機能を有するものがあることが確認され、赤外線機能を有する CCTV カメラを設置し、土砂流出を監視することが有効であることを示した。

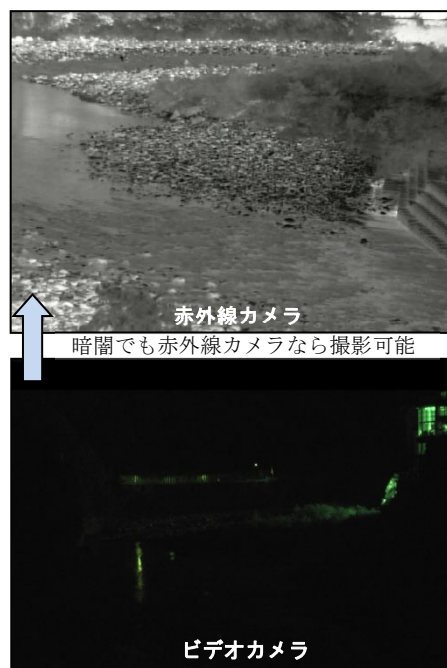


図 5-4 カメラの比較<sup>1)</sup>

### (3) 3D レーザースキャナー

設置型の CCTV を組み合わせた 3D レーザースキャナーが開発されており，遠隔から任意の時間で地盤高を計測することが可能である．平成 25 年 7 月～9 月の期間に 3D レーザースキャナーが，試行的に不帰谷合流部に設置されており，12 時間間隔で地形データの取得が実施された．その際の写真と地形データの描画を図 5-5 に示す．

図 5-5 より，写真と描画は一致しており，3D レーザースキャナーによる計測は有効であることが確認された．

また，このとき，12 時間に 1 回の割合で地盤高を計測されており，各時間の地盤高データの変化から 1 出水あたりの不帰谷から供給土砂量が算出される．よって，3D レーザースキャナーで計測すれば，定量的に不帰谷から供給土砂量と不帰谷合流部から流出した土砂量の差分の変化を把握することが可能となる．

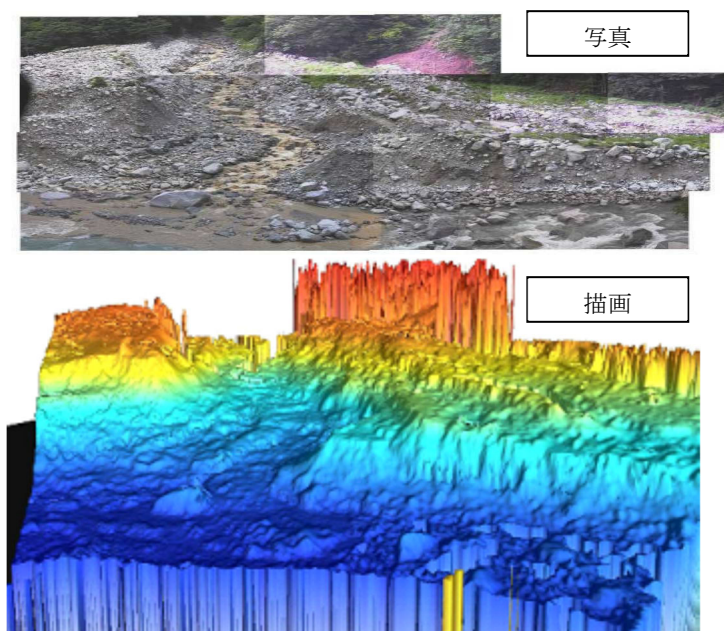


図 5-5 3D レーザースキャナーの観測結果<sup>1)</sup>

#### 5.2.4 まとめ

本研究で得られた成果と課題を以下に示す．

- ・ UAV を利用すれば，ある程度定量的に河川の土砂流出状況や地盤高，地盤高変動量を把握することが可能である．
- ・ 赤外線カメラを利用すれば，夜間でも土砂流出状況を監視することができる．
- ・ 3D レーザースキャナーを設置すれば，定期的かつ定量的な土砂変動量を把握することが可能である．



### 5.3 松本砂防事務所管内（姫川，高瀬川，梓川）の事例<sup>2)</sup>

松本砂防事務所管内では，水位変化から天然ダムの形成の検知について研究し，その研究事例を示す。

#### 5.3.1 はじめに

近年，豪雨の発生頻度が増加し，多くの土砂災害が発生している．その中で，平成23年台風12号により，紀伊半島において大規模な河道閉塞が形成された災害は記憶に新しい．このため，全国の大規模な地すべり崩壊が発生する可能性のある箇所の調査や，大規模な深層崩壊が発生した場合に検知できるシステムの検討と試行が行われてきた．しかし，未だ有効な検知システムの開発には至っていない．国土交通省では，早期に河道閉塞の発生を発見するため，水位・流量の変化から河道閉塞を検出する方法について検討を行っている．

松本砂防事務所でも既存の水位・流量データを用いて，「流量観測データを用いた河道閉塞(天然ダム形成)覚知に関するデータ整理・分析の手引き(案)」<sup>3)</sup>に示された流量減少率・流量増加率を指標として，河道閉塞が検知可能かについて検討した．また，土石流等が発生しやすい区間では，水位計等が損傷しやすく，観測機器の維持管理の問題を抱えているため，CCTVカメラの画像解析を用いて水位・流量の観測が可能かを試験的に検討した．

#### 5.3.2 対象地区

本研究では，松本砂防事務所管内の浦川，松川（姫川流域），鹿島川，籠川（高瀬川流域），島々谷，上高地（梓川流域）の6地区の水位，流量データを対象に検討した．また，CCTVの画像解析は浦川，上々堀沢の過去の映像記録を対象とした．本研究では代表例として浦川地区等について紹介する．

#### 5.3.3 検討結果

##### (1) 流量減少率を閾値とした河道閉塞検出可能区間の検討

浦川の過去10カ年の流量データを用いて流量減少率を閾値として，流量別に1年間あたりの出現回数を整理した．(図5-6参照)出現回数規模に応じて，限界距離(水位観測地点で流量減少率を検出できる最大延長距離)，限界面積(流量減少率を検出するために必要な最小流域面積)を算定し，河道閉塞発生検出可能区間について算定した．(図5-7参照)

流量増加率について同様の整理を実施した．

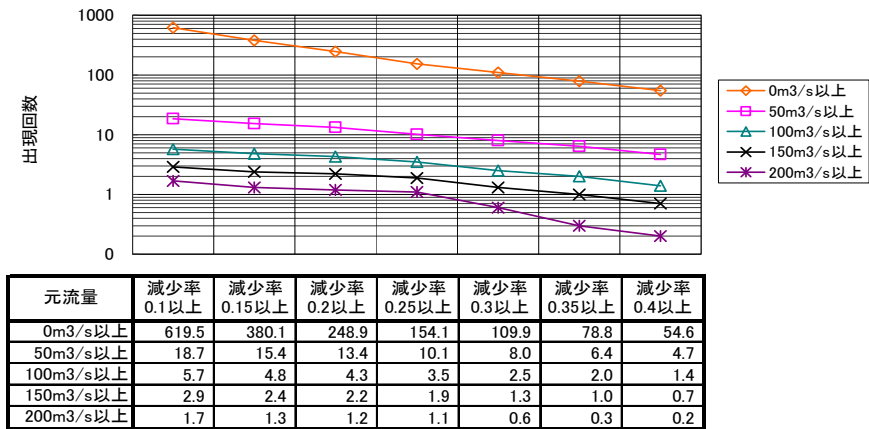


図 5-6 流量減少時の 1 年間あたりの出現回数(浦川地区)<sup>2)</sup>

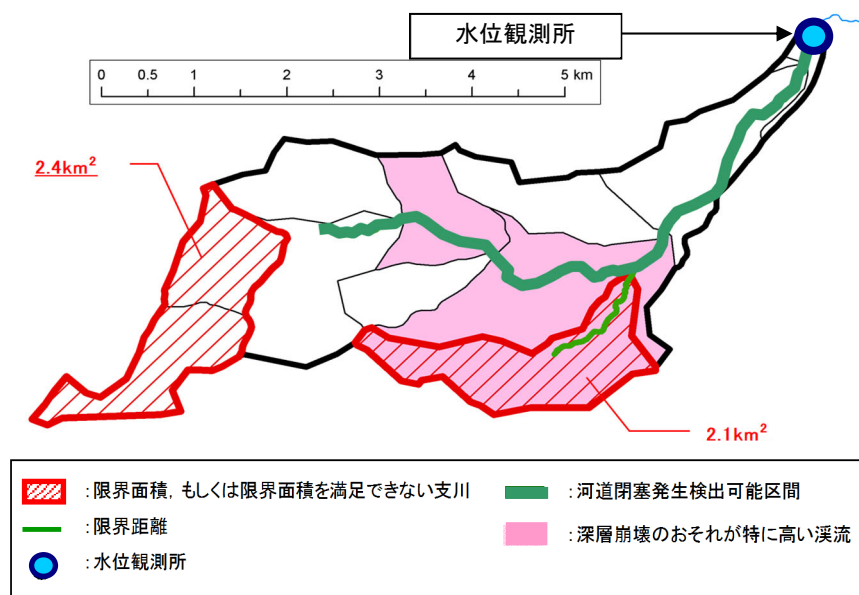


図 5-7 河道閉塞発生検出可能区間の事例(浦川地区)<sup>2)</sup>

## (2) 水位観測施設の配置箇所の評価

(1)の整理結果を用いて、河道閉塞発生検出可能区間に深層崩壊のおそれが特に高い溪流が河道閉塞発生検出可能区間に含まれているか確認し、既存の水位観測地点の位置で深層崩壊を検知できるか評価した。

その結果、浦川地区、島々谷地区は深層崩壊のおそれが特に高い溪流を検知可能であるため、これらの4地区は、既存の水位計で観測を継続するとの評価になった。しかし、松川地区、鹿島川地区で深層崩壊のおそれが特に高い溪流を検知できないため、深層崩壊を検知可能な新規水位観測地点について検討が必要であることを示した。

## (3) CCTVカメラによる水位・流量計測の適応可能性

CCTVカメラを画像解析して、水位、流量を計測する適切な解析ソフトを選定するため、一般民間市場調査とメーカーヒアリングを実施した。画像解析としてPIV等を用いた流速算定は、多くの研究が報告されているが、水位と流下断面を同時に画像から解析し、流量までの算定を一体化させたものの報告は稀有である。(平成26年時点の情報。なお、令和4年時点では数多くの研究事例あり)そのうち、A社の解析ソフトDは水位・流速・流量の解析が一体化となったものであり、今回の研究目的に最も条件が適合するので、この技術を選定した。なお、解析ソフトDは、ある集合のパターンを認識し、当該集合の動きから物体の移動方向、移動量を算定するLucas-Kanade法を適用している。

解析ソフトDの解析画面は図5-8のように、水位、流速、流量が表示され、画面を見ながら確認できるため、観測結果の異常値が容易に除去できる。解析結果を図5-9に示す。水位、流速、流量については、画面との変化に追随しており、CCTV画像による視覚的な状況とソフトの解析結果は概ね一致しており、解析結果は概ね妥当と考えられる。ただし、一部で適切な解析結果が得られていないが、その要因の多くは画像が不鮮明、撮影当時のスケールが不明なことによる。この点については、事前に現地踏査や機器の設定を実施しておけば、概ね解決されると考える。

## (4) 画像解析を用いた土砂管理への適用可能性

(1)~(3)の結果より、各々の検討結果は妥当な結果が得られている。よって、CCTVカメラの画像解析結果を用いて、流量減少率等を算定し、河道閉塞検出可能区間を算定することは可能であり、特に土石流等の流れが発生し、観測機器が損傷しやすい砂防領域では、有効な手法であると考えられる。

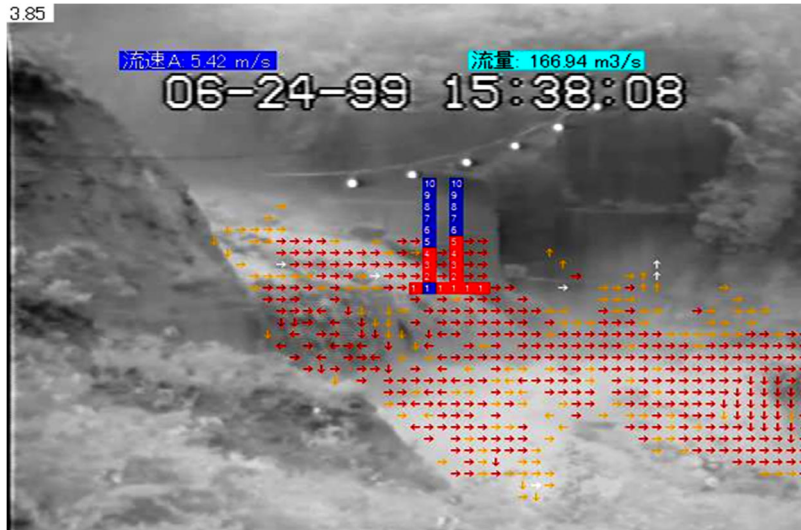


図 5-8 CCTV 画像の解析画面<sup>2)</sup>

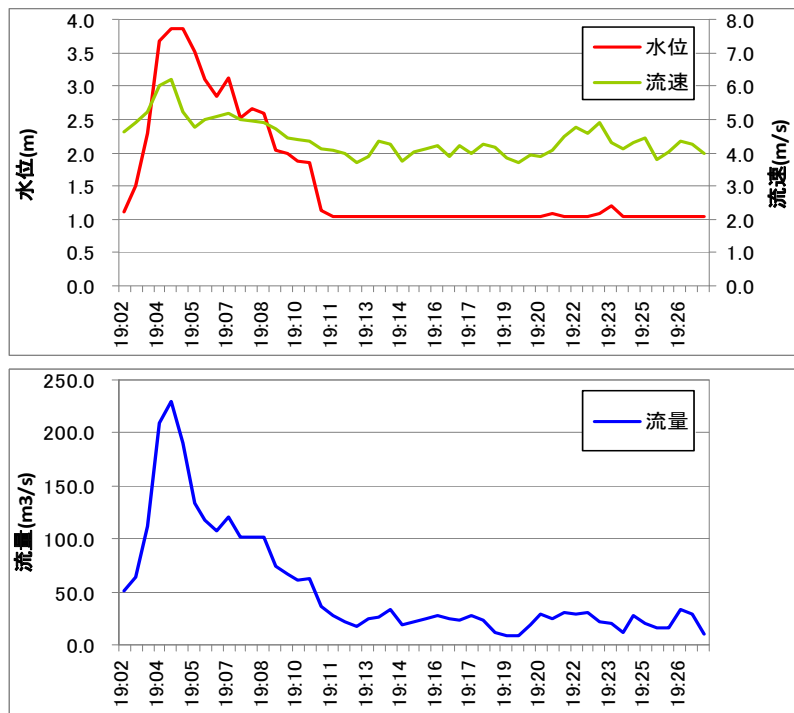


図 5-9 CCTV 画像の解析結果事例<sup>2)</sup>

#### 5.3.4 まとめと今後の課題

本研究で得られた成果と課題を以下に示す。

- 松本砂防事務所管内の流域では、水位、流量から流量減少率、流量増加率が算定可能であり、河道閉塞発生検出可能区間の閾値の検討が可能であることが確認された。今後、全国の検討結果も参考に、閾値の妥当性や精度向上、設定方法について検討することが求められる。
- CCTVの画像解析において、一般民間市場における技術調査から、現地データを使って画像解析を実施したところ、水位、流量は十分に計測可能であることが確認された。今後、画像解析による水位、流量の計測結果の精度を確認するため、水位、流量の観測がなされている箇所を検証することが望まれる。
- 画像から水位、流速を計測するソフトは逐次開発されているため、それらのソフトを常に調査し、特徴を把握した上で、監視地点の特性に応じたソフトを選定できるように整理することが求められる。

## 5.4 富士川流域の事例<sup>4)</sup>

富士川砂防事務所では偏光 SAR データを用いた動的土砂管理に関する研究を実施した。その研究事例を示す。

### 5.4.1 はじめに

従来、河川上流からの土砂生産や土砂流下状況は、航空写真による地形判読や、縦横断測量により推定され、ダムへの堆砂容量は、近傍ダムの堆砂実績を参考に推定されることが多かった。また、出水中における河川内の土砂流下状況はほとんど把握できていない状況である。

近年、土砂の観測技術が向上し、掃流砂はハイドロフォン、浮遊砂は濁度計で直接観測が実施されており、また衛星 SAR による分析から、溪流での河床高の経年変化をもとに移動土砂量を推定することが可能となった。

本研究では、富士川水系釜無川の支川である大武川を対象に、これらの観測技術で得られた土砂動態に関するデータを組み合わせて、流域からの流出土砂量の推定方法の精度検証を目的とし検証した。

### 5.4.2 検討手法

#### (1) 対象地点の概要

対象となる大武川は、甲府盆地の扇頂部に位置し、富士川水系・釜無川の左支川で、本川延長 16.4km、平均勾配 1/60 程度の急流河川である（図 5-10）。解析区間はその下流部の約 8.3km にあたる。上流域には砂岩・花崗岩類の低～中山地であり、河道内は約 50 箇所の砂防堰堤、床固工が設置されている（図 5-11）。



図 5-10 対象箇所位置図<sup>4)</sup>





図 5-11 流域空中写真<sup>4)</sup>

(2) 流砂量観測の実施状況

山地河川からの土砂流出量を把握するため、2011年から大武川第50床固工においてハイドロフォン、濁度計、水位計、浮遊砂計、埋設型土砂捕捉ピット等の観測機器による流砂量観測が実施され、大武川第50床固工における年間の流下土砂量が計算により推定される(図 5-12)。



図 5-12 観測機器の状況写真<sup>4)</sup>

### (3) SAR 画像解析による土砂流出状況の推定

#### 1) SAR 画像データと解析期間

SAR 画像解析では、人工衛星に搭載した合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar)より、マイクロ波を地表面に斜めに照射し、地表面からの後方散波を受信することで取得した画像データを用いて、隣りあった 2 回の観測画像の干渉解析によりその間に生じた地表変動量が求められる。これは、天候や昼夜に影響されることがなく、全天候の観測が可能である。衛星画像の諸元を表 5-2 に示す。解析に用いた資料は表 5-3 に示す。

表 5-2 衛星の諸元<sup>4)</sup> 一部改変

衛星	ALOS-2 PALSAR-2 SM-1 モード
進行方向	北行方向
観測方向	右側観測
オフナディア角偏波	35.4° HH

表 5-3 解析に用いた資料一覧

使用衛星	ALOS-2 PALSAR-2
地図判読	地理院地図(電子国土 Web) ( <a href="https://maps.gsi.go.jp/">https://maps.gsi.go.jp/</a> )
流砂観測	大武川第 50 床固工右岸ハイドロフォン(L=2.0m)の観測値より算定

#### 2) 対象範囲, 解析手法

日本上空を通過する衛星 ALOS-2 より取得した以下の衛星画像 9 枚を用いて、隣同士のペアで計 8 期間(①~⑧)(表 5-4 参照)の画像干渉解析を行い、大武川第 50 床固上流の約 8km 区間の河床変動量を求めた。

SAR 画像で河道の確認が可能で、河幅は最小解像能(3m)の 5 倍以上を有し、下流端の流砂量観測が実施されている大武川中下流区間を対象とし、偏光 SAR 解析を行った。河道部の土砂移動量の算出にあたっては、常時変位がない河川横断物(橋梁、堰堤等)の範囲を取り除き、ブロック設定(Block1~Block58 区分)を行い、さらに各ブロックを 5m×5m のメッシュに細分化した。図 5-13 に示す手順で SAR 画像データの干渉解析を行い、各メッシュの 2 画像の間に発生した河床高の変化から移動土砂の体積変化を求めた(図 5-15, 表 5-5 参照)。



表 5-4 SAR 画像を用いた解析期間<sup>4)</sup>

番号	解析期間		○出水期 △一部出水期
	from	to	
①	2014/09/19	2014/11/28	○
②	2014/11/28	2015/04/03	—
③	2015/04/03	2015/06/26	△
④	2015/06/26	2016/03/18	○
⑤	2016/03/18	2016/06/24	△
⑥	2016/06/24	2016/11/25	○
⑦	2016/11/25	2017/03/03	△
⑧	2017/03/03	2017/06/09	△

表 5-5 SAR 画像解析による土砂移動量<sup>4)</sup>

番号	解析期間		期間 (日数)	SAR 解析による 土砂変化量 $V_s$ (m <sup>3</sup> )
	from	to		
①	2014/09/19	2014/11/28	70	9743.98
②	2014/11/28	2015/04/03	126	-5361.75
③	2015/04/03	2015/06/26	84	1840.07
④	2015/06/26	2016/03/18	266	-21229.55
⑤	2016/03/18	2016/06/24	98	9752.34
⑥	2016/06/24	2016/11/25	154	1599.06
⑦	2016/11/25	2017/03/03	98	-648.32
⑧	2017/03/03	2017/06/09	98	9596.02

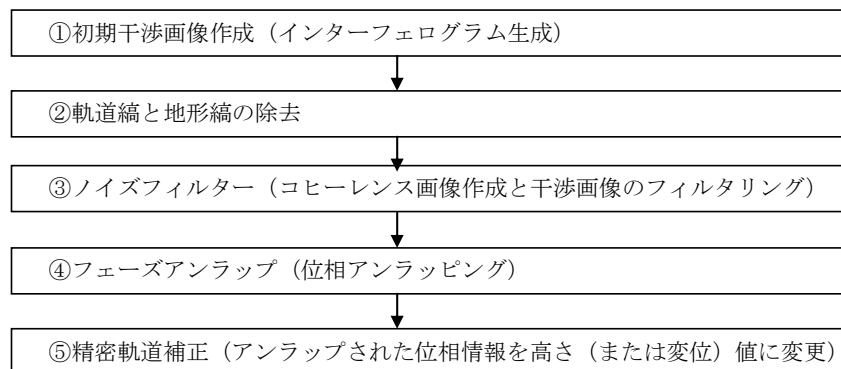


図 5-13 SAR 画像解析による変位算出フロー<sup>4)</sup>

地図判読では、地理院地図の 1/2.5 万スケール相当を活用した。

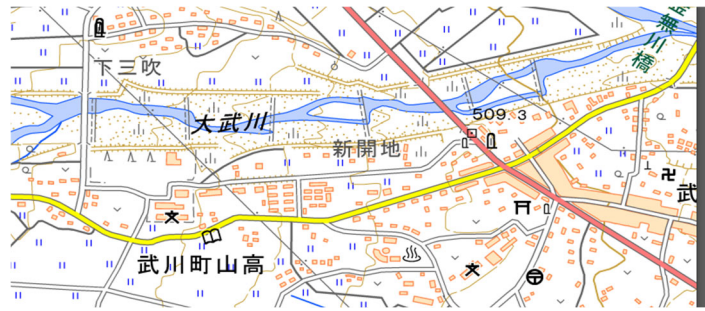


図 5-14 調査地域の平面図

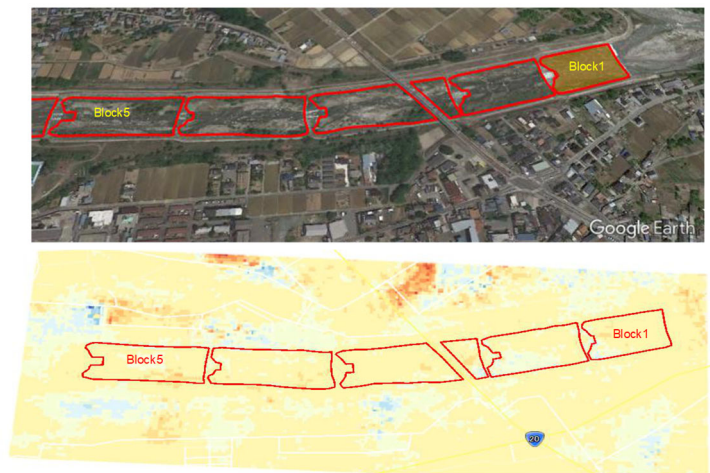


図 5-15 ブロック分割と干渉解析結果イメージ図<sup>4)</sup>

### 3) SAR 画像解析結果

隣り合った SAR 画像を用いて図 5-13, 図 5-15 示す方法で干渉解析を行い, 画像の間に発生したメッシュごとの地盤高さの変化を求め, 「メッシュ面積( $si$ ) $\times$ 平均高の変化量( $\Delta hi$ )」より各メッシュの体積変化量( $\Delta vi=si \times \Delta hi$ )を算出し, これらを集計してブロックごと, そして全区間の累計土砂移動量を求めた。

以上の方法で算出した河床高変動量(ブロック平均)の縦断図を図 5-16 に各解析期間(①～⑧)における土砂移動量及び区間内における土砂変動量の経年変化を図 5-17, 図 5-18 に示す。

以上の結果によると, 対象期間によって, 河床上昇(堆積)と低下(洗掘)が見られるが, 基本的には, 大きな出水(台風)が発生した期間には, 河道内に堆砂し, その後に出水がなければ, 土砂が徐々に流出し, 河床低下していく傾向が認められる。

また, 2014年9月から2017年9月にかけて, 対象区間では, 出水によって土砂量が増減することはあるが, トータル的には大きな変動がなく, 平衡状態を保っていることがうかがえる。

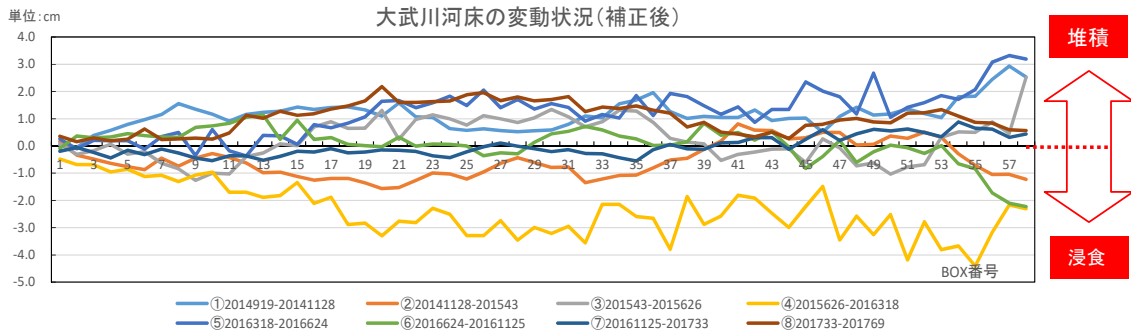


図 5-16 各解析期間の河床高変動量縦断面図<sup>4)</sup>

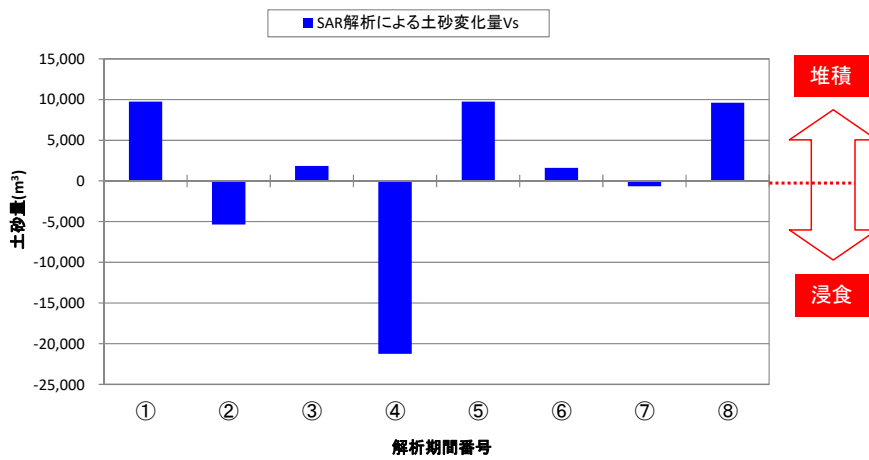


図 5-17 各解析期間における土砂移動量<sup>4)</sup>

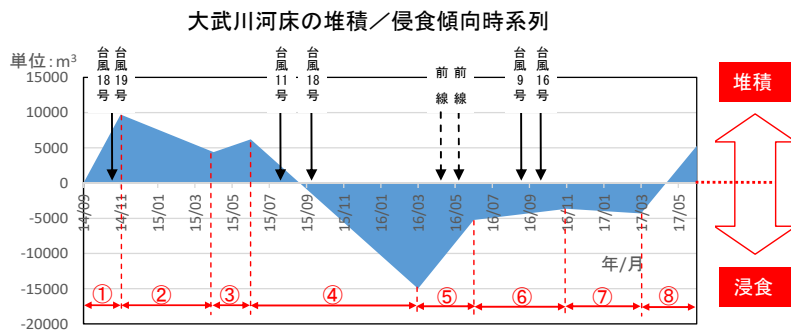


図 5-18 河道内土砂収支経年変化<sup>4)</sup>

### 5.4.3 流砂量観測結果と SAR 画像解析結果による土砂収支の比較

#### (1) 結果比較とその考察

SAR 画像解析と同じ期間内で検討区間の下流端に設置した流砂量観測装置（ハイドロフォン、濁度計、水位計）より観測・換算した移動土砂量（掃流砂＋浮遊砂）と SAR 画像解析により求めた土砂移動量の比較を表 5-6 と図 5-19 に示す。

出水期にかかる期間①，③，⑤，⑧は，区間内の土砂収支はプラス（堆積）であり，上流からの土砂供給があったと推測される。また，非出水期にあたる②，⑦期間は，流入量に比べて流出量が多く，区間内の土砂収支は少しマイナス（洗堀）になっている。また，出水期，非出水期を跨っている④期間は，出水期の流入と非出水期の流出の両方の影響を受けるため，結果的には土砂収支はマイナスになっていると考えられる。

次に，SAR 解析による上流区間内の土砂変動量とハイドロフォンによる観測した下流端流出土砂量の相関を図 5-20 に示す。区間内で洗堀傾向を示す期間（上流の土砂供給が少ない期間）のみ着目すれば，SAR 解析結果とハイドロフォン等による観測値一定の線形関係を示すと推測される。

ただし，今回の検討での問題は SAR の河床高をとらえたデータの期間が少ないことから，出水期と非出水期にまたがったものや，2 出水を含めた河床高の変化をとらえたものであったため，完全に正確に堆積と洗堀の状況を表現出来なかったが，傾向をとらえることが出来た。

表 5-6 SAR 画像解析とハイドロフォン等による観測結果の比較<sup>4)</sup>

番号	解析期間		期間 (日数)	SAR 解析による土砂量 $V_{ss}(m^3)$	ハイドロフォン観測による下流土砂量 $V_{sh}(m^3)$	期間内の主なイベント
	from	to				
①	2014/09/19	2014/11/28	70	5846.39	1469.05	台風 18 号、19 号
②	2014/11/28	2015/04/03	126	-3217.05	2234.88	
③	2015/04/03	2015/06/26	84	1104.04	514.11	
④	2015/06/26	2016/03/18	266	-12737.73	10970.63	台風 11 号、18 号
⑤	2016/03/18	2016/06/24	98	5851.40	1312.48	
⑥	2016/06/24	2016/11/25	154	959.43	12317.24	台風 9 号、16 号
⑦	2016/11/25	2017/03/03	98	-388.99	1458.5	
⑧	2017/03/03	2017/06/09	98	5757.61	1483.2	

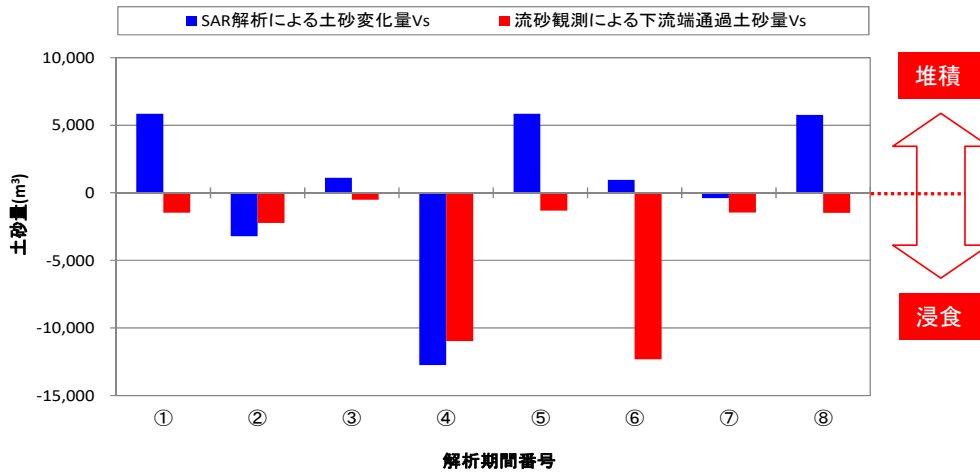


図 5-19 SAR 画像解析とハイドロフォン等による観測結果の比較<sup>4)</sup>

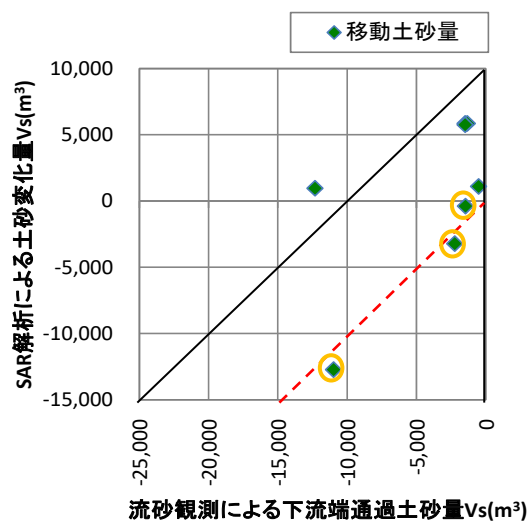


図 5-20 SAR 画像解析とハイドロフォン等による観測結果の相関<sup>4)</sup>

#### 5.4.4 まとめ

本研究では、検証できる期間が短く、出水イベント（出水直前、直後）に合わせて撮影された SAR 画像がないため、厳密な解析・検証が困難であったが、以下のことが示唆される。

- 1)隣り合った偏光 SAR 画像の干渉解析により、河床部の微地形の変化を捉えることが可能であり、現地での測量作業が困難な山地河川における河道内堆砂や河床浸食などのマクロな土砂移動状態を把握することが出来る。
- 2)データ解析では、SAR 解析による算出した土砂移動量とハイドロフォン等による流砂量観測結果の間で明確な相関性が確認出来なかったが、これは活用出来るデータの期間が不足することに加え、ハイドロフォンによる観測流砂量は、川幅約 170m の河川の側岸の傍に設置されたハイドロフォン (L=2.0m) データから算出された値であり、川幅全断面の流砂量を求めるには精度的に課題があることなどが挙げられる。
- 3)これら 2 つの流砂量観測方法は、SAR ではマクロな動的な土砂移動量が把握出来ており、上流域での土砂発生イベントを遠隔で把握するには十分な情報量を与えてくれる。一方、ハイドロフォンはリアルタイムでの掃流砂移動土砂量がわかり、濁度情報などと組み合わせれば、大まかな移動土砂量がリアルタイムで把握できる。これらの 2 つの土砂動態を把握する観測方法を併せて解析することで、その河道の土砂の動きが概ね把握できる。
- 4)動的土砂管理とは「上流の河道を動的に監視することにより、河道内土砂移動現象の次の予測が出来る」ということであり、ハイドロフォン、SAR を使えば時間軸はそれぞれ違ってはいるが、過去、現在の土砂の動きを捉えて将来を予想して土砂管理が出来る。土砂動態を予測出来ることで下流での避難等の備えが出来る。例えば土砂 BP の操作やダム等の土砂管理、洪水操作等への活用も出来る。洪水時の避難情報やリスク管理、ダム排砂操作への活用など、洪水時の土砂動態を知ることで土砂の動的管理の途が拓けることが明らかになった。

## 5.5 まとめ

本章では、黒部川における UAV 等，国土交通省北陸地方整備局松本砂防事務所の水位データ及び CCTV 画像の活用，富士川流域における SAR の流砂量観測技術を活用した土砂管理への活用等の研究成果を述べた。

黒部川では，UAV を利用することで定量的に河川の土砂流出の状況や地盤高，地盤高の変化を把握することが可能で，赤外線カメラを利用することで夜間の土砂流出を監視することができて，3D レーザースキャナーを設置し観測することで定期的かつ定量的に地盤高，土砂変動量を把握することが可能であることを示した。

松本砂防事務所の水位，流量データを用いて流量減少率，流量増加率が算定可能であり，河道閉塞発生検出可能区間の閾値が検討可能であることも示した。また，CCTVカメラの画像解析から砂防領域においても，水位，流量の計測が可能であることを示した。

富士川流域では，偏光 SAR 画像の干渉解析により，河床部の微地形の変化を捉えることが可能であり，現地での測量作業が困難な山地河川における河道内堆砂や河床侵食等のマクロな土砂移動状態を把握することが可能であることを示した。

上記の内容は，ハイドロフォン以外の流砂量観測技術も十分に土砂管理に活用できることを示している成果である。そのため，本研究ではハイドロフォンの利活用をメインにしているが，他の流砂量観測技術の利活用についても積極的に研究に取り組むことが期待される。

## 参考文献

- 1) 藤田士郎，伏木裕二，新谷紘平，角哲也，富田邦裕，叶正興，重村一馬：不帰谷における UAS 等を活用した土砂流出監視方法について：第 65 回平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集 p. B-466-467, 2016
- 2) 重村一馬，富田邦裕，内田太郎，城ヶ崎正人，地中浩，石川一栄：CCTV を用いた水位観測手法による土砂管理への適用可能性について：第 63 回平成 26 年度砂防学会研究発表会概要集 p. A-188-189, 2014
- 3) 流量観測データを用いた河道閉塞(天然ダム形成)覚知に関するデータ整理・分析の手引き(案)：国土政策総合研究資料 第 767 号，2013.11
- 4) ハイドロフォンおよび偏光 SAR データを用いた動的土砂管理に関する検討：第 78 回年次学術講演会投稿予定

## 第6章. 土砂管理の観点からの事業評価手法の提案

### 6.1 序説

本章においては、土砂管理の観点からの事業評価手法の提案に向けた研究成果を示す。

現在、総合土砂管理が各河川で実施されており、課題に対する対策が検討されている。ただし、これらの対策による効果を便益として評価した事例は治水以外では少ない。

ここでは矢作ダム<sup>1)</sup>の土砂バイパス（以降、土砂BPと示す。）を対象に治水以外の項目も堆対象として、総合土砂管理の観点からのB/Cを検討した研究事例を示す。

### 6.2 土砂管理の観点からの事業評価手法の提案<sup>1), 2)</sup>

#### 6.2.1 はじめに

矢作ダムでは、流砂系の総合土砂管理の一環として、土砂BPを使った排砂計画が進められている。ダムからの排砂では、貯水池容量の維持管理による長寿命化ばかりでなく、ダム下流河川区間も含めて、事業実施によるメリットとデメリットの両面に留意する必要がある。メリットには土砂還元による河川や海岸の環境改善効果や、土砂資源リサイクル利用の促進等があり、デメリットには、土砂の流下・堆砂による下流河道の治水・利水機能への影響や下流のダムや堰への土砂堆積による維持管理コストの増大などの課題が想定される。今後、これらの予測と影響評価等をいかに進めるかが課題である。

本研究では、①矢作川下流域、②三河湾海浜域までの2ケースで、矢作川流砂系全体の総合土砂管理の費用便益評価を試みた。また、矢作川では、河川への土砂還元に加えて土砂資源リサイクルの促進も重要と考えられる。研究当時は、土砂資源としての有効利用について、ダム下流の越戸ダムエリアに設置された排出土砂の仮置き場（ストックヤード）を設置し、民間事業者が参画した形で矢作ダムの排出土砂の有効活用に関する社会実験が実施されており、利用者に対してアンケート調査等により、土砂資源リサイクルの実施可能性、有効性の分析と、実施上の課題についても考察を行った。さらに、ストックヤードを使った土砂マネジメントにより、土砂資源の有効利用について、経済的に最適化するシステムの構築についても考察を試みた。



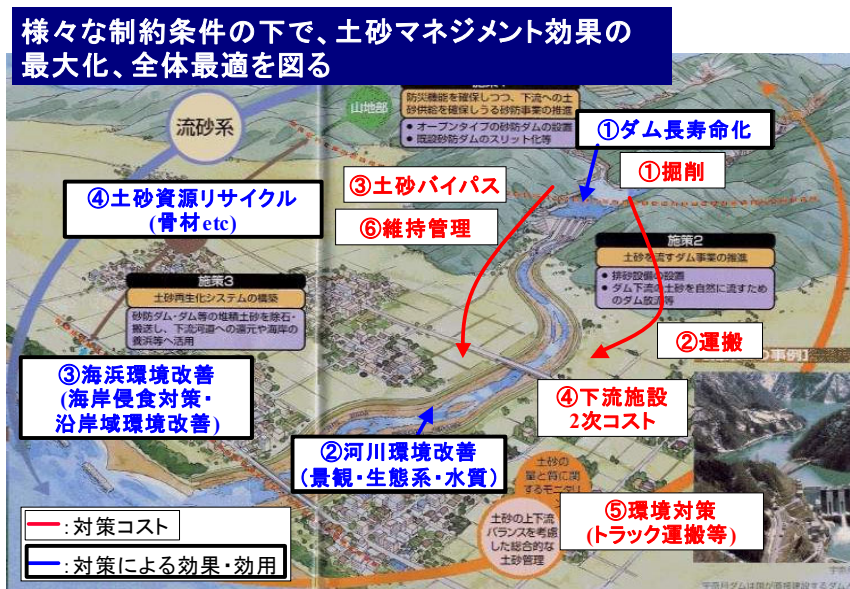


図 6-1 流砂系総合土砂管理の体系<sup>1)</sup>

### 6.2.2 矢作ダム土砂 BP 事業の概要と効果 (2010 年時点での計画 (案))

矢作ダムには年間平均約 30 万  $m^3$  の土砂が流入しており、特に平成 12 年の恵南豪雨（東海豪雨）では、貯水池内に約 280 万  $m^3$  もの堆砂が発生した。そのため、ダム機能の健全性を保ち、貯水池の長寿命化を図るために、早期に堆砂対策の実施が望まれ、洪水時に排砂するための土砂 BP が計画されている。

矢作川は従来、砂河川であるが、現在は矢作ダムへの流入土砂量の年間平均約 30 万  $m^3$  のうち掃流砂・浮遊砂の約 25 万  $m^3$  がダム湖に捕捉されて堆砂し、細粒分のウォッシュロード約 6 万  $m^3$  が洪水吐きなどを通じてダム下流へ流下している状況である（図 6-3）。土砂 BP 完成後は、BP を通じて砂分を中心に年間約 20 万  $m^3$  が新たに下流に供給され、矢作川本来の流砂環境の回復が期待される。

土砂 BP 完成後は、土砂 BP を通じて砂分を中心に年間平均約 25 万  $m^3$  の土砂が新たに下流に流下することになるが、ダム下流には発電ダム等の利水施設があり、また、漁業や水辺を利用したレクリエーションなどの河川利用が進んでおり、下流河川環境への影響や利害関係者との調整等の課題がある。そこで、流域全体を俯瞰した最適な土砂マネジメント手法の確立と総合土砂管理の観点からの経済評価分析が必要である（図 6-2、図 6-3 参照）。

例えば、ダム貯水池に捕捉される土砂を、ダム下流に還元することにより、ダム貯水池の堆砂を減少させ、貯水池機能の長寿命化をもたらす効果があるが、効果はそればかりでない。下流河川においてもダムにより抑止されていた土砂が再び供給され、ダム建設前の大小の玉石や砂礫、細粒分まで含めた混合砂礫の供給が復活し、河川環境がダム建設前の状態に次第に近づく可能性がある。

これらの効果を確認するために、全国の幾つかのダム、河川では、流砂系河川における土

砂循環を回復させるための対策が行われており、ダム管理者自らがダム湖に堆積した土砂を掘削・運搬し、下流河川に置土して、洪水時に土砂が流れるようにしておき、洪水で土砂還元後の効果のモニタリング調査を行い、土砂還元による効果の計測を行っている。その調査によれば、土砂の細粒分を補給することによりクレンジング効果が見られること、砂河床を好む底生生物が増加すること等が確認されている。

矢作ダムでも、このような動きを受けて置土実験、覆砂実験によるモニタリング調査が行われており、年に2,300から6,000m<sup>3</sup>の置土からの土砂還元や覆砂実験で土砂還元による河川環境改善効果が計測されている。

このように、土砂バイパスは、貯水池機能の長寿命化だけでなく、土砂供給による河川環境の改善効果や土砂資源リサイクルの視点においても有意義なものである。



図 6-2 矢作川流域の土砂還元に関わる主な施設<sup>1)2)</sup>

※堆砂率は平成24年時点の値である。

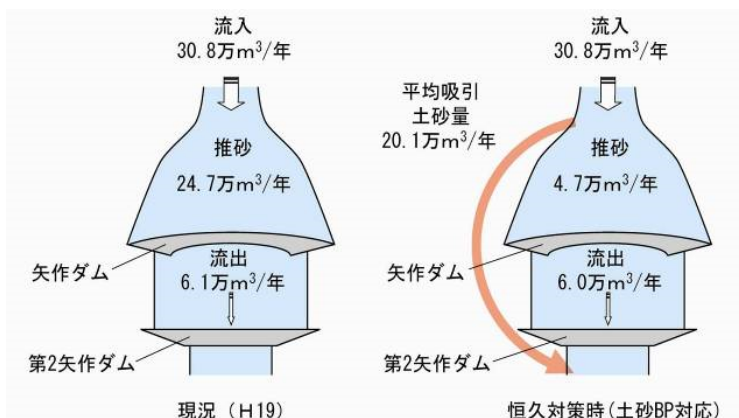


図 6-3 矢作ダムにおける土砂収支と土砂BPの効果<sup>1)2)</sup>

## 6.2.3 土砂マネジメントの必要性

### (1) 土砂マネジメントの概要

矢作ダム土砂BPの効果を計測する。その場合の効果には、図6-4に示すように、ダムを通過するようになった土砂の新たな行き先として、河道への供給（土砂還元）と資源リサイクルの両者の組み合わせを考慮する必要がある。土砂BP無しで、これをダム湖からの掘削とトラック運搬で実現しようとするれば、点線で示されるように多くの走行距離を運搬し、CO<sub>2</sub>を多量に排出する。土砂BPが供用されれば、河道を通じて年間平均約20万m<sup>3</sup>の土砂が流下し、河道内の好適な流砂環境が回復されるとともに、資源リサイクルの観点からは、需要地までの運搬距離が減少し、コスト面、運搬環境面からも有利となる。なお、土砂の流下に伴って、局所的に河道へ堆積して河床高が上昇することも想定されるが、ここでは、河道の流下能力から判断した維持河床高を設定し、これを超過する分のみの維持掘削を経年的に行うものとした。

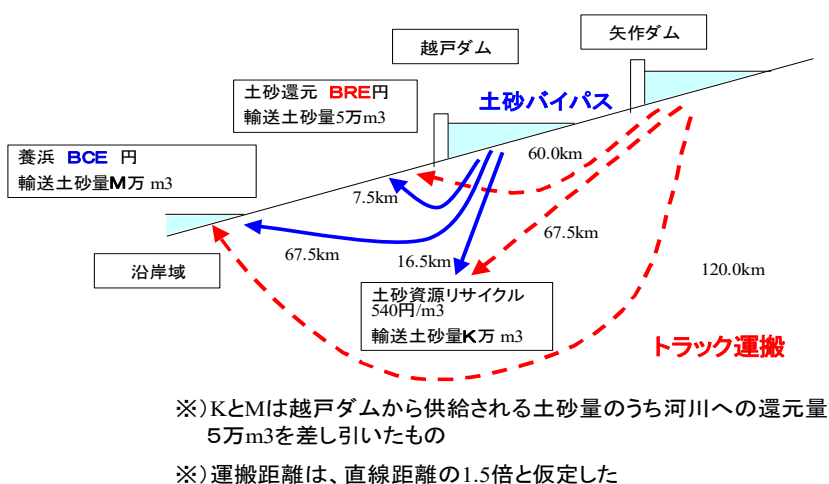


図 6-4 矢作川における総合的な土砂マネジメントのイメージ<sup>1)</sup>

矢作ダムでは土砂BPが計画されているが、事業評価には土砂BPの建設費、維持管理費に加え、下流の発電施設や治水機能への影響に対して維持掘削等の対策費や、堆砂した土砂の掘削費、運搬費、CO<sub>2</sub>などの環境対策費などが発生する。一方、効果、便益としてはダム長寿命化便益、河川、海岸域における環境改善便益、土砂資源リサイクル利用便益などがあり、それらは、それぞれトレードオフの関係にあることから、ここでは、例えば、環境改善のためには何処にどれだけの土砂が必要で、その費用と効果はどれくらいか、また、土砂のストックヤードはどの位置に、どれくらいの規模で設置するのが経済的に効果的で最適かなど、土砂マネジメントによるダムからの排砂土砂の調整により、トータルコストとトータル便益、その結果としてのコストパフォーマンスが変化する。このため、矢作ダムの土砂BP

の設置、運用にあたっては、排砂土砂の扱いや、土砂の配分を如何にするかという土砂マネジメントを最適化することが重要となる。また、そのために必要となる土砂の仮置きストックヤードの配置位置、規模なども、コストや便益に大きく影響してくるので重要である。

富田らは、矢作川流域をモデルに、矢作ダムの中砂 BP 設置による河川及び海岸域の環境改善効果を、CVM とコンジョイント分析を行って費用便益計算に組み入れるとともに、ダムからの排砂により発生する各種の対策費用についても推定計算を行い、中砂 BP の設置による費用便益計算による事業評価を行った。さらに、流域全体の総合的な土砂マネジメントを考えた時に、治水、利水機能と環境保全とはトレードオフの関係にもあるが、これら機能を保全しつつ、河川環境改善利用と土砂資源のリサイクル利用とのアロケーション・バランスはいかに行うべきか、また、土砂資源リサイクル面からは、どの位置から土砂を掘削し、どこに運搬しどのように利活用するのが経済的に最適か等について考察するため、越戸ダム付近にストックヤードを設けて自由に土砂の運び出しを認め、その利用者に対しアンケートによる追跡調査を行って、土砂資源リサイクル利用と河川、海岸域の環境改善のための利用に関して、最適化の可能性について考察を行っている。

以上、これらを総合的に考えあわせ、経済的に最適となる土砂マネジメントについて検討する必要があるが、検討にあたっては、LCC の期間を何年間にするか、各費用と便益項目に何を選定するか、制約条件としての治水、利水機能上の制約はどうするか等を考慮し、地勢的、社会的条件等からの制約等も考慮しなければならない。

## 6.2.4 土砂マネジメントの経済評価

ここでは、①ダム直下流域（豊田市区間）、②三河湾海浜域までの2ケースで経済評価を実施した。

### (1) 経済評価の基本的考え方

#### 1) ダム直下流域

土砂移動の位置関係と輸送手段を図 6-4、表 6-1 のとおり、「土砂 BP を建設した場合」と、土砂 BP を建設せずに「トラック運搬による場合(土砂 BP なし)」の2ケースについて、費用便益評価を行って比較した。その際に実施する下流河川への土砂還元量は、土砂 BP 建設後の将来における下流河川各区間の治水・利水施設への経時的な影響や、河床高、平均粒径の変化の予測値から河川環境の改善効果、影響等を考慮し<sup>5)</sup>、著者らが適切と考える土砂量として5万 m<sup>3</sup>/年を設定した。そして、残りの土砂を土砂資源リサイクル利用と海岸養浜利用にわけるとし、矢作ダム下流における土砂管理のトータルシステムとして、費用対効果が最大(最適)となる状況の検討を行った。具体的には、便益の総和の最大化とトータルコストの最小化、あるいはB/C、B-Cなどから全体最適となる状況を勘案して評価した。

表 6-1 総合土砂管理における経済評価項目<sup>1)</sup>

		土砂バイパスあり	トラック運搬のみ
費用	ダム堆砂の掘削費(CD)	△	◎
	運搬費(CT)	△	◎
	土砂バイパス建設費(CB)	◎	—
	下流施設2次コスト (発電ダム対策)(CP)	◎	—
	環境対策費(ダンプ運搬等) (CE)	○	◎
	維持管理費(CM)	◎	○
便益	ダム長寿命化(BR)	◎	◎
	河川環境改善(BRE)	◎	○
	海浜環境改善(BCE)	○	○
	土砂資源リサイクル (BA)	○	○

※◎:影響大、○:影響あり、△:影響小

## 2) 三河湾海浜域

土砂マネジメントのモデルは、土砂 BP が完成後の矢作川をイメージした。(図 6-5)

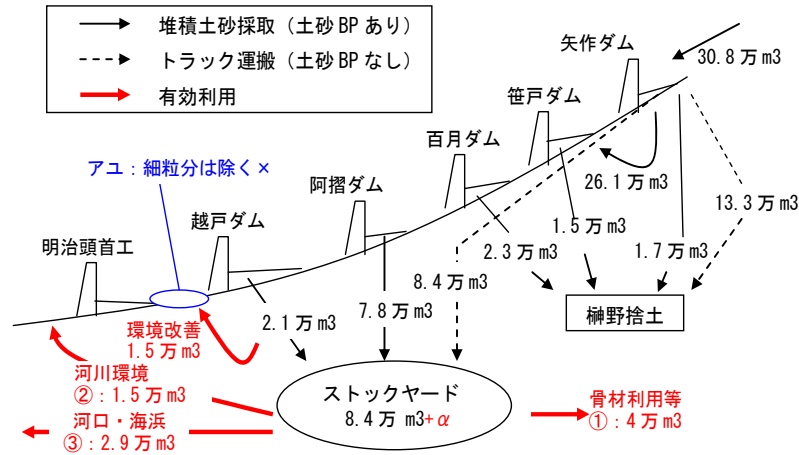


図 6-5 矢作川の土砂 BP 完成後の土砂の移動・掘削運搬モデル<sup>2)</sup>

土砂 BP 完成後は、図 6-5 に示すように、ダムを通過するようになった土砂の新たな行き先として、河道、海浜への供給（土砂還元）と土砂資源リサイクルの両者の組み合わせを考慮する必要がある。一方、土砂 BP 無しの場合、これをダム湖からの掘削とトラック運搬で実現しようとするれば、点線で示される長い走行距離を運搬し CO<sub>2</sub> を多量に排出する。土砂 BP が供用されれば、河道を通じて年平均約 20 万 m<sup>3</sup> の土砂が新たに流下し、好適な流砂環境が回復されるとともに、資源リサイクルの観点からも、需要地までの運搬距離が減少し、コスト面、運搬環境面からも有利な状況となる。一方、土砂の流下に伴って、局所的に河道堆積が発生して河床高が上昇することも想定されるが、ここでは、河道の流下能力から維持河床高を設定し、これを超過する分のみの維持掘削を経年的行うものとした。また、河道環境の改善に必要な土砂量として、河床変動高、粒径の変化予測などから、越戸ダム下流へ 1.5 万 m<sup>3</sup>、明治頭首工下流へ 1.5 万 m<sup>3</sup>、河口・海浜へ 2.9 万 m<sup>3</sup> を還元し、骨材利用等の土砂資源として 4 万 m<sup>3</sup> を活用するものとした。その際に、再利用のための一時保管、調整のためのストックヤードとして、越戸ダム付近に 8.4 万 m<sup>3</sup> 以上の規模のものが必要となる。

なお、矢作ダムでは既に民間事業として 3 万 m<sup>3</sup> の掘削と骨材利用がなされているが、これについては今回のモデルには含めていない。これらの条件を加味して「土砂の移動・運搬モデル」を構築した。(図 6-5)



## (2)費用(コスト)および便益(ベネフィット)の算定

総合土砂マネジメントの経済評価を行う際の評価項目は、①土砂BPがあるケースと、②トラック運搬で土砂運搬するケースの2ケースで整理し比較した。インフラ整備における経済評価は、費用(C)と、それにより得られる便益(B)を算出し、費用便益比(B/C)、または差額(B-C)により行うと多い。矢作ダムのような既に供用開始してから多くの年月が経過している事業では、これまでの事業費や効果を除き、現時点において当該事業を実施した場合の経済評価を行い、事業実施の費用対効果を求めて経済評価することが実用的であることから、現時点からの評価(リアルオプション)で、評価期間はダムの施設寿命を考慮して100年間、割引率を4%とした。

評価項目等は以下の通りである。

### 1)評価項目

#### ・費用の算定

土砂BPの建設費、維持費に加え、土砂が下流河道に現在より多く供給されることによる発電ダム減電対策費、矢作ダム、発電ダム等からの土砂掘削費、ダンプ運搬費、それらによるCO<sub>2</sub>に対する環境対策費を計上した。ストックヤード整備費等については、事業主体、経営方法など具体が決まってから考慮する。

#### ・便益の算定

土砂BPによりダムの貯水容量が計画レベルに保たれ、洪水カット量の減少が回避されることによる治水便益をダム長寿命化便益として計算した。(図6-6, 図6-7)

また、河川環境改善効果については、CVM・コンジョイント分析で行い、矢作川下流域から三河湾海浜域までの矢作川流砂系全体を対象とした。土砂資源リサイクルによる便益については、現在、越戸ダム付近で排出土砂を仮置き場において民間事業者を対象に、矢作ダム排出土砂の利用実態調査を行っており、その結果から取引価格、用途、運搬場所等进行分析し、より現実的な土砂資源リサイクル便益を算出した。

### 2)土砂マネジメントの目標

ダム貯水池からの排砂により「ダム長寿命化」を実現しつつ、下流の河川環境、海浜環境の改善や土砂資源リサイクルの促進等により流域全体として便益の最大化、費用の最小化、費用対効果が最大(最適)となる状況を目指した。これらにより、土砂マネジメントは流域としての全体最適な状態を目標とする。

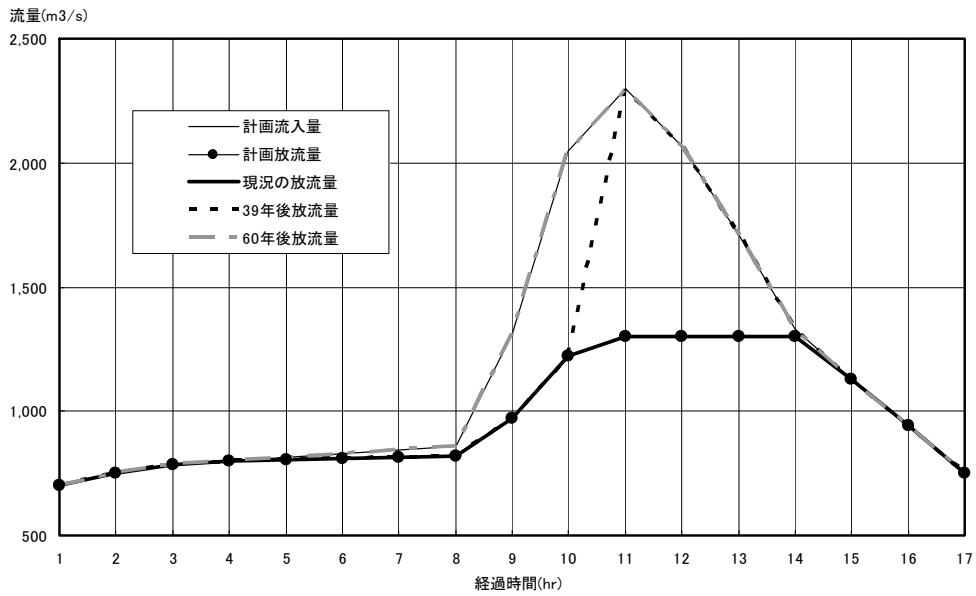


図 6-6 ダム長寿命化便益のイメージ<sup>2)</sup>

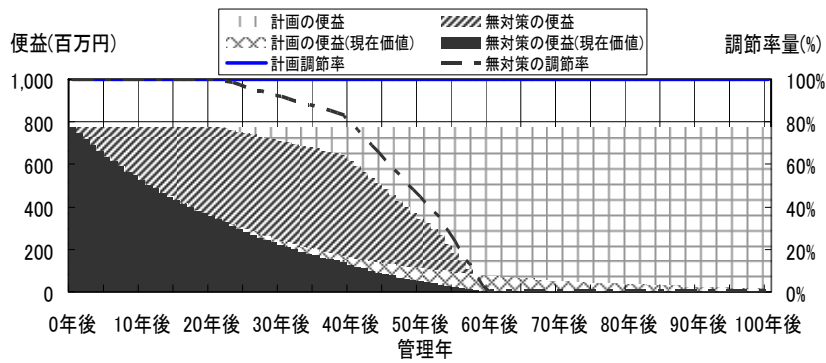


図 6-7 長寿命化（堆砂の排除）による便益<sup>2)</sup>



### (3) 河川環境改善効果の算定

#### 1) CVM・コンジョイント分析調査の実施

河川等の環境改善効果はCVMで算出し、国土交通省の事業評価で標準指定されている方法を用いて住民の支払意志額(WTP)を求めた。また、同時にコンジョイント分析は、住民がどのような環境改善要因を評価しているかを把握しCVMを補完し、土砂マネジメントに活用するために行った。

土砂還元の効果に関するCVM調査はこれまで事例がないので、調査をより適切なものとするために、ダム周辺地域で性別・年齢が様々な任意の19名を対象にCVM、コンジョイント分析の予備調査を行った。予備調査ではデータのばらつきがないか、土砂還元の効果について説明書で正しく適切な理解が得られているかどうか、偏った回答や異常な回答がないか等を確認し、本調査の質問票を見直した。

CVM調査を実施するにあたり、調査対象範囲は以下のように設定した。排砂による影響範囲は矢作ダム下流地域と考えられるが、過去に類似地域で実施したCVM調査で、アンケートにより把握した河川利用と距離との関係が、家との距離が約10kmを超えると利用割合が低下しているため、土砂還元による流砂量の増加が顕著な区間を矢作第二ダムから越戸ダム区間と想定し、そこから概ね10kmの範囲に入る豊田市域(10kmを超える旧下山村を除く)をアンケート配布地域とした。

必要標本数は旧下山村を除く豊田市域の世帯数153,539世帯に対し(母数)、CVM指針<sup>4)</sup>に記述されている方法によると信頼度95%、絶対精度5%の場合の必要標本数は383票となる。CVMは多段階(5段階)二項選択式、コンジョイント分析はカード選択4問であり、過去の事例より回収率30%、有効回答率60%と想定して、アンケート配布数を1,000通とした。

アンケート票は、事業効果シナリオ、効果期待設問、CVM支払意志額設問、賛同理由、反対理由、コンジョイント分析の説明因子及び回答方法の説明、説明因子のイメージ、コンジョイント分析の設問、回答者属性より構成した。CVMの事業効果シナリオは、土砂還元による下流河川の環境改善効果(ヨシ原の回復、砂河原の回復、水遊び場の創出、生態系の保全)とし、コンジョイント分析では、さらに、水質・水の濁りを加えた5つの説明因子について、現状維持を含む3水準を提示した。WTP設問は、国土交通省の事業評価で標準指定されている方法<sup>4)</sup>とし、支払い形態は負担金、回答方式は多段階二項選択方式、段階数は標準の7~8段階から予備調査結果を踏まえて100円、200円、500円、1,000円、2,000円/(月・世帯)の5段階に縮約した。CVM支払意志額は、ランダム効用モデルを用い、誤差項がGumbel分布に従うと仮定してロジットモデルを適用し、指針<sup>3)</sup>で推奨されている平均値を用いた。

次に、コンジョイント分析調査についても、予備調査の状況から調査方法の見直しを行った。予備調査の結果をみると、CVMで支払意志額(WTP)が2,000円を超える回答がなかったが、コンジョイント分析ではCVMでの支払意志額と乖離して大きな金額を選択している

回答をしているものがあつたので、これらを本調査では補正して、設問票の最高額を 3,000 円から 2,000 円に見直して実施した。その結果は、表 6-4 の通りであり、これについても、各項目の限界支払意志額（WTP）は、予備調査とほぼ同じ傾向が得られている。

ア) ダム直下流域

本研究では、豊田市域（旧下山村を除く）の 153,539 世帯から電話帳で乱数表から 1,000 世帯をランダムに抽出して郵送にて調査を行った。その結果、発送から 2 週間の締め切り期間の間に 472 通と言う高い確率の回答を得た。その中から「バイアス排除」の設問として設けた、「土砂 BP により水が綺麗になるから」、「川の水の量が増えるから」等の、土砂 BP による効果がないにもかかわらず誤認して支払意志額回答をされた無効回答を排除し、有効回答 336 名（有効回答率 71%）について支払意志額の推定を行った。

イ) 三河湾海浜域

本研究では矢作川下流域と海浜域を対象に調査を行った。必要標本数は CVM 指針<sup>3)</sup>に記載されている方法で、信頼度 95%、絶対精度 5%の場合の必要標本数を確保し、CVM は多段階（5 段階）二項選択式、コンジョイント分析はカード選択 4 問であり、過去の事例より回収率 30%、有効回答率 60%と想定して、アンケート配布数は、それぞれ 1,000 通を郵送配布・回収を行った(表 6-2)。

アンケートの回収率は、河川環境 46.9%、海浜環境 46.3%と H21 年度と同様に 5 割近くの高い回収率であり、住民の方々が、土砂供給に対して高い関心を持っておられることが読み取れた。ここから無効回答やバイアス回答を排除し、有効回答票（河川環境：228 票、海浜環境 314 票）をもとに分析を行った（表 6-3）。

表 6-2 アンケート対象地域<sup>2)</sup>

市町村名	世帯数
岡崎市	128,457
碧南市	24,060
刈谷市	55,093
安城市	60,854
西尾市	34,438
知立市	25,263
高浜市	14,537
一色町	6,734
三好町	18,985
合計	368,421

市町村名	世帯数
岡崎市	128,457
碧南市	24,060
刈谷市	55,093
安城市	60,854
西尾市	34,438
知立市	25,263
高浜市	14,537
一色町	6,734
吉良町	6,425
幡豆町	3,718
幸田町	11,634
三好町	18,985
合計	390,198

※2011. 5. 29 論文投稿時の世帯数

表 6-3 アンケート回収率と有効回答率<sup>2)</sup>

項目	配布数	回収数 (率)	有効回答数 (率)
河川環境	1,000	469 (46.9%)	228 (49%)
海浜環境	1,000	463 (46.3%)	314 (68%)
参考：H21 上流河川環境	1,000	472 (47.2%)	336 (71%)

## 2) WTP 算定

1) の結果に基づき、ダム直下流域、三河湾海浜域の WTP を算定した。

ア) ダム直下流域

a)CVM

CVM の設問では 5 段階の金額提示を行ったので、サンプル数は 1,680 票となり、信頼度 95% が 383 票であることから十分なデータが得られた。CVM の支払意志額は、指針<sup>3)</sup>において一般に推奨されている「平均値」を採用し、図 6-8 に示す通り 317 円/(月・世帯)となり、予備調査の結果である 329 円/(月・世帯)とほぼ同様な値が得られた。これより、年便益は、年便益=CVM 支払意志額×豊田市域の世帯数×12 ヶ月=317 円×153,539 世帯×12 ヶ月≒584,000,000 円/年となった。

なお、WTP 賛成率の推定曲線で、0 円での賛成率は今回計測していないので、このデータから全員が土砂還元賛成しているとは言えないが、WTP 推定曲線より、住民が受け入れる代表値として WTP 平均値を算出した。

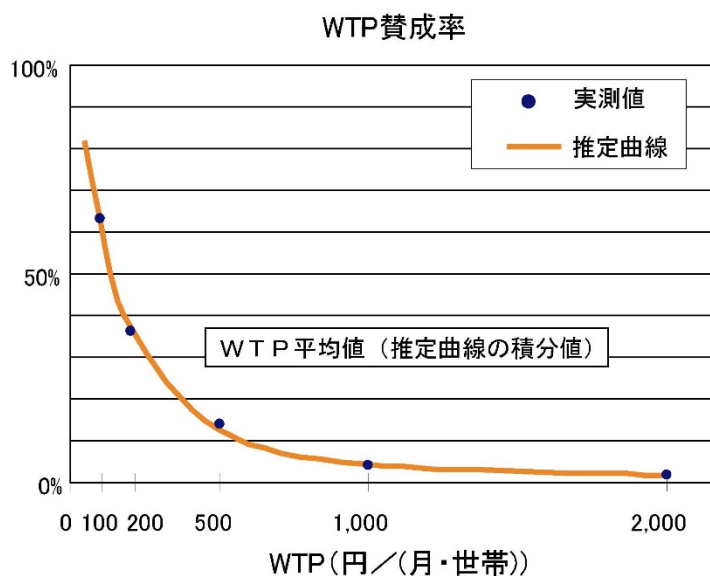


図 6-8 CVM の結果 (317 円/(月・世帯))<sup>1)</sup>

## b) コンジョイント

コンジョイント分析では、排砂による影響による変化項目や過去の矢作川の状況とその現在に至るまでの変遷、置土、覆砂実験におけるモニタリング調査結果等も考慮して説明因子を設定した。ここでは、土砂還元による効果(便益)について、どのような要因を重視して限界支払意志額を決定したのかを判別することが可能であり、その結果では「生態系の保全」と「水遊び場」、「水質（濁りの改善）」への期待が大きいことがわかった。すなわち、土砂BPによる土砂の河川還元による砂河原の還元そのものより、生態系の保全や、水遊び場等のレクリエーション利用に効果があると住民が判断していることがわかる。また、「水質（濁りの改善）」に対して住民の意識は高く、土砂管理と河川水質管理の関係を明確にしていくことが重要であることが示唆される。

表 6-4 コンジョイント分析の結果<sup>1)</sup>

項目	限界支払意志額[円/(月・世帯)]	年便益(円/年)
水質	163	300,129,610
ヨシ原	106	196,161,047
砂河原	22	40,527,801
水遊び場	162	298,160,840
生態系	194	356,640,252

\*) 年便益は豊田市域(旧下山村除く)15.3万世帯を想定した

イ) 三河湾海浜域

a)CVM

アンケート有効回答者 228 名の回答から、推定モデルを用いたパラメトリック法により CVM提示金額に対する賛成曲線を推定した結果、矢作川下流域におけるダムからの排砂に対する支払意志額WTP(平均値)は、1世帯当たり 378.2 円/月であった(図 6-9)。これは、H21 年度に実施したダム直下流域の(豊田市域対象)のWTP317.4 円より約 60 円高い結果であり、下流域の方が土砂還元に対する期待がやや強いものと推定される。

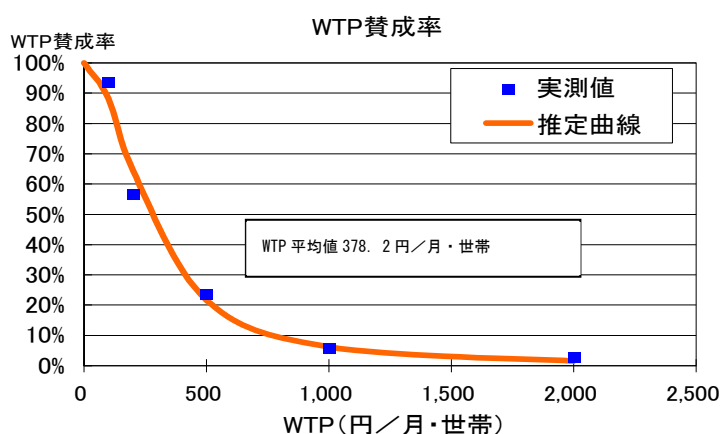


図 6-9 矢作川下流域の河川環境改善へのWTP 推定結果<sup>2)</sup>

b)コンジョイント

コンジョイント分析による下流域における各項目の限界支払意思額(原単位毎の支払意思額)は表 6-5 のとおりであり、上流域(ダム直下流域)での調査結果では「砂河原」のWTPが低かったのに対し、下流域では「砂河原」のWTPが大きかった。これは、下流地域では、矢作川の『原風景』として「砂河原」への意識が強いのではないかと推察される。また、下流域では「水遊び場」が 234 円と高く、子供の頃に砂河原で遊んだ『原体験』への思いが強いためではないかと推察される。

表 6-5 矢作川下流域におけるコンジョイント分析結果<sup>2)</sup>

項目	限界支払意思額(円/月・世帯)	
	矢作川下流域	矢作川上流域
水質	111	163
ヨシ原	3	106
砂河原	110	22
水遊び場	234	162
生態系	187	194

ウ) 海浜域の環境改善効果 (WTP) の推定

三河湾海浜域のアンケート有効回答者 314 名の回答から賛成率曲線を推定した結果、海浜域のWTP(平均値)は河川環境の 378.2 円より低く、1 世帯当たり 350.4 円/月 (図 6-10 海浜環境改善へのWTP推定結果) と推定された。一方、コンジョイント分析による各項目の限界支払意思額は、「浅場・干潟 (景観)」及び「水産生物」のWTPが高く (表 6-6)、住民のこれらへの思いが強いものと推察された。また、「潮干狩り」、「海水浴」などのレクリエーションについては、WTPが低い結果となった。

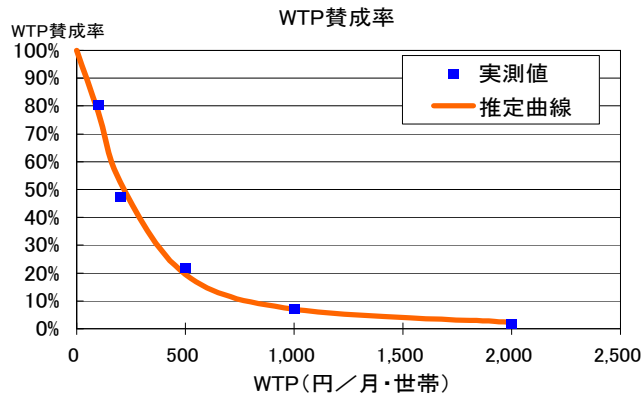


図 6-10 海浜環境改善へのWTP推定結果<sup>2)</sup>

表 6-6 海浜域におけるコンジョイント分析結果<sup>2)</sup>

項目	限界支払意思額(円/月・世帯)
浅場・干潟	139
水質	105
潮干狩り	33
海水浴	37
水産生物	140

## エ) 土砂資源の有効利用調査

矢作ダム堆積土砂の有効利用の可能性を調査するため、ダム下流域の仮置き土砂ストックヤードを用いた社会実験を行い、ストックヤードから土砂を搬出利用する業者に対しアンケート調査を行い分析した。

アンケート結果では、土砂の利用のための負担費用として「混入ゴミ除去費用」と「運搬費」が平均約 770 円かかる結果となったが、H21 年度に矢作ダム管理所が実施した市場調査では、土砂購入費用が無い場合でも想定販売価格 300 円/t であった。今回調査の結果の処理費用+運搬費用である 770 円を加えると、販売価格は概ね 1,070 円/t となり、同じく H21 年度の調査結果では、流通価格 1,860 円/t<sup>6)</sup> であることから、約 800 円/t 程度安価に流通できる可能性があることがわかった。この調査結果から、土砂マネジメント経済計算では、海浜への土砂資源の取引価格は 800 円/t とした。また、これは、今後のストックヤードの維持管理運営費用としても検討の余地があると考ええる。一方、アンケートによる要望では、骨材流通量には季節性があり、10 月～翌 3 月の期間に年間の 60～70% の利用が集中しているので、この時期に十分な土砂が供給出来るかが、流通のポイントと考えられる。また、用途は、コンクリート製品や骨材、左官砂の利用が主であったが、CVM のアンケートで評価が高い海浜域の浅場・干潟の造成（三河湾沿岸）に活用出来れば利用価値はさらに高まるものと考えられる。

今後は処理コストの軽減と安定供給(需要と供給のバランス)、並びに海浜域での利用を促進する施策を、土砂マネジメントとあわせて検討していくことが重要と考える。

#### (4) 費用便益評価

以上より求まる費用と便益について、それぞれを、今後 100 年間、割引率 4% で現在価値化し、表 6-7 に示すように集計し、リアルオプションでの費用便益比 (B/C) を計算した。河川環境の改善効果は、一般的に間接便益とされており、国土交通省の指針<sup>3) 4)</sup>に基づき実施した CVM の値を採用し、コンジョイント分析については WTP の判断要因を見るものとした。

表 6-7 費用便益評価の計算表 (下流域)<sup>1)</sup>

	土砂バイパス (億円/100年)	トラック運搬 (億円/100年)	
費用 (C)	ダムの掘削費 (CD)	42.9	78.6
	運搬費 (CT)	99.3	487.0
	バイパストンネル+吸引 施設建設費 (CB)	128.8	—
	発電ダム対策費 (CP)	7.4	—
	環境対策費 (CE)	1.1	4.8 (CO <sub>2</sub> ) + α
	維持管理対策費 (CM)	41.4	道路維持等
	合計	356.5	534.7
便益 (B)	ダム長寿命化 (BR)	2,346.2	2,346.2
	河川環境 (BRE) (上流域のみ)	149.2	149.2
	海浜環境 (BCE)	今後検討	今後検討
	土砂資源リサイクル (BA)	16.3	16.3
	合計	2,511.6	2,511.6
費用便益比 (B/C)	7.1	4.7	

\*) 筆者らの試算値であり公式値ではない。

##### 1) ダム直下流域

費用 C を同一とし、ケース 1 は治水便益のみの B/C、ケース 2 は (上流域の環境改善効果 + 土砂資源リサイクル) の便益のみの B/C、ケース 3 は両者を合計して治水に環境改善等の間接効果を含めた B/C を図 6-11 に示した。環境改善や土砂資源リサイクル等の排砂事業による河川環境等への間接効果を定量化し確認することが出来た。

なお、ここでの治水便益 (BR) は十分に大きい値となっているが、これはもともとの矢作ダム建設事業の治水便益であり、今回の土砂 BP はその治水機能の一部を復元するものであることから、この値を採用している。しかし、一方では、費用についても矢作ダム建設事業の一部を含めるべきではないかという考え方もある。今回は現時点におけるリアルオプションとしての土砂 BP 建設事業の費用対効果を見ようとするものであるので、土砂 BP に係る費用のみを採用した。

また、便益については、下流域や海浜域の環境改善効果を見ていないだけでなく、土砂資源リサイクルの便益評価も課題がある。現在は土砂資源の買い取り価格が低いために、河川環境改善に土砂資源が優先的に配分される結果となっているが、矢作川の土砂を高付加価



値の商品へ使用することや、鉄道輸送等を使った効率的な掘削、運搬方法を組み合わせること等により、土砂資源リサイクルの便益が増大する可能性があり、今後の調査検討が必要である。

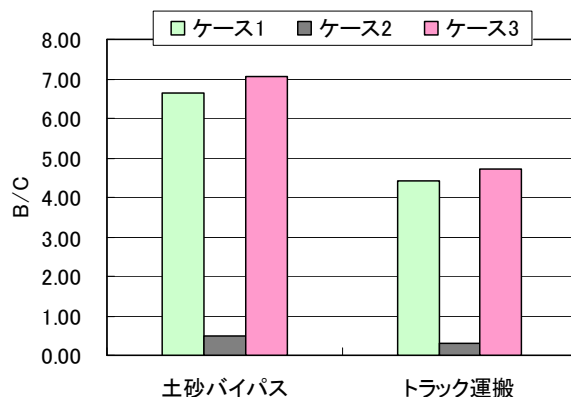


図 6-11 土砂 BP とトラック運搬の B/C<sup>1)</sup>

ケース 1：ダム長寿命化（治水便益）のみ

ケース 2：河川等の環境改善効果と土砂資源リサイクル

ケース 3：ケース 1+ケース 2

なお、ダムからの排砂手段を土砂 BP (C') とトラック運搬(C)で行った場合で費用比較した。図 6-12 に示すように、土砂 BP による場合がトラック運搬の 2/3 となり、土砂 BP は、ダム長寿命化等のための手段としての治水だけでなく、間接効果も含めた総合的な土砂マネジメントにおいても、経済性に優れた有効な手段であることが確認された。

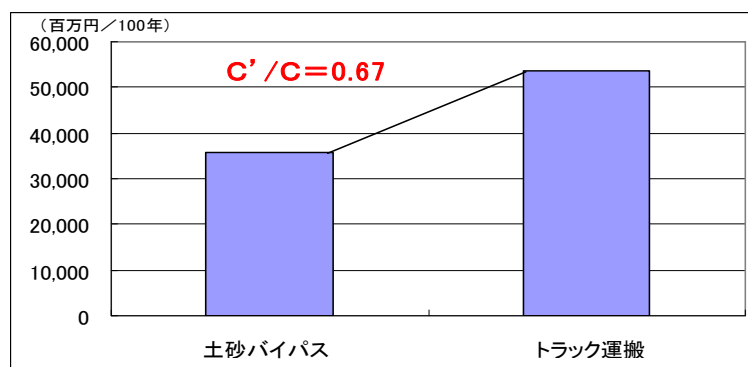


図 6-12 土砂 BP とトラック運搬の C'/C の比較<sup>1)</sup>

## 2) 三河湾海浜域

ケース1はダム長寿命化(治水便益)のみを便益とした場合のB/C, ケース2は河川, 海浜の環境改善効果と土砂資源リサイクルだけを便益とした場合のB/C, ケース3は両者を合計してダム長寿命化(治水)と環境改善等の間接効果を含めた場合のB/Cを図6-13に示す。これより, 土砂BPの整備は費用便益評価上も1.0を大きく上回り, 十分に事業効果, コストパフォーマンスの高いものと考えられる。特に, 環境改善効果だけでも2.0を上回る効果が見込まれることがわかった。

前節では, 矢作川上流区間(豊田市域)のみの環境改善効果であったが, 今回は, 矢作川下流域と海浜域も含め, 矢作川流域の環境改善効果を考慮することが出来た。また, 土砂資源の需要と供給のマッチングを図るため, 中流部の越戸ダム付近にストックヤードをも設けて試算してみた。これは将来土砂BPが運用した際には, 河川, 海浜の環境改善も含め, 土砂の需給バランスを取ることが必要とされるが, そのための調整機能が必要となり, 現時点で具体的な調整箇所は決まらないが, 効率的に土砂を収集しストックし, 供給, 分配出来る箇所として, 越戸ダム付近が効率的と考えられたからである。あくまで仮想のケースではあるが, 土砂ストックヤードの設営は必要であり, 越戸ダム付近で, 複数個所での設置運用も含め将来的には公的に運営していくことも検討する必要があると考える。

次に, ダムからの排砂手段を土砂BPありの場合(C')と, トラック運搬(土砂BPなし)の場合(C)で費用の比較を行った(図6-14)。トラック運搬では土砂BPありの場合よりも約10%費用が多くなり, トラック運搬のための道路維持整備費や, 交通安全対策費等も考慮すると, 土砂BPは経済的にトラック運搬よりも有利な事業手法であることが確認される。なお, トラック運搬の場合は上流部の土捨場が無限に収容可能なことが前提となり, 現実的には持続可能な選択肢とはならないことから, 土砂BPの有利性は揺るがないものと考えられる。

このように, 土砂BPは, ダム長寿命化(治水)効果だけでなく, 環境改善や土砂資源リサイクル利用等の間接効果も含めた総合的な土砂マネジメントを行った場合の事業評価においても, 経済性に優れた有効な手段であることが確認された。

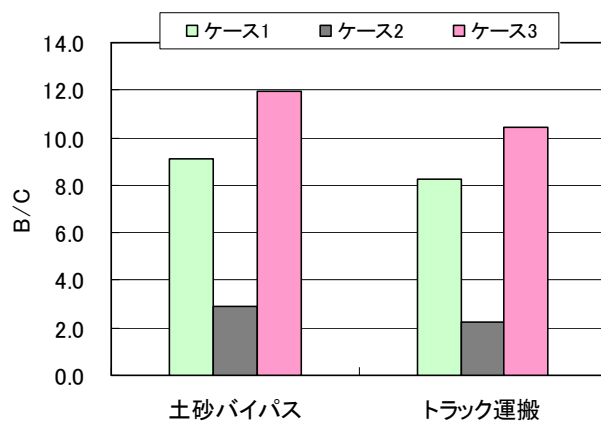


図 6-13 土砂 BP とトラック運搬の B/C の比較 <sup>2)</sup>

ケース 1：ダム長寿命化（治水便益）のみ、

ケース 2：河川等の環境改善効果と土砂資源リサイクル

ケース 3：ケース 1+ケース 2

表 6-8 費用便益評価の計算表 <sup>2)</sup>

		土砂バイパス (億円/100年)	トラック運搬 (億円/100年)
費用	ダムの掘削費	34.9	55.3
	運搬費	111.1	296.8
	バイパストンネル+吸引 施設建設費	129.0	-
	発電ダム対策費	2.4	-
	環境対策費	1.1	2.8
	維持管理対策費	41.4	道路維持等
	海浜対策費用	15.0	15.0
	合計	334.8	369.9
便益	ダムの長寿命化	3027.0	3027.0
	河川環境	552.8	409.7
	海浜環境	402.1	402.1
	土砂資源リサイクル	25.3	25.3
	合計	4007.2	3864.1
費用便益比(B/C)		12.0	10.4

\* ) 筆者らの試算値であり公式値ではない。

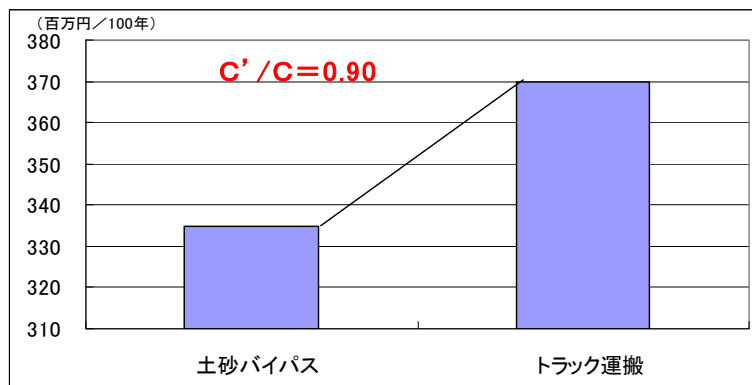


図 6-14 土砂 BP とトラック運搬の C'/C の比較 <sup>2)</sup>

## 6.2.5 まとめ

本研究は、土砂 BP を含めた総合土砂管理のモデル化と経済評価のモデル化を行い、矢作川上流域をケース・スタディに経済評価の試算を行ったものであり、得られた結論は以下のとおりである。

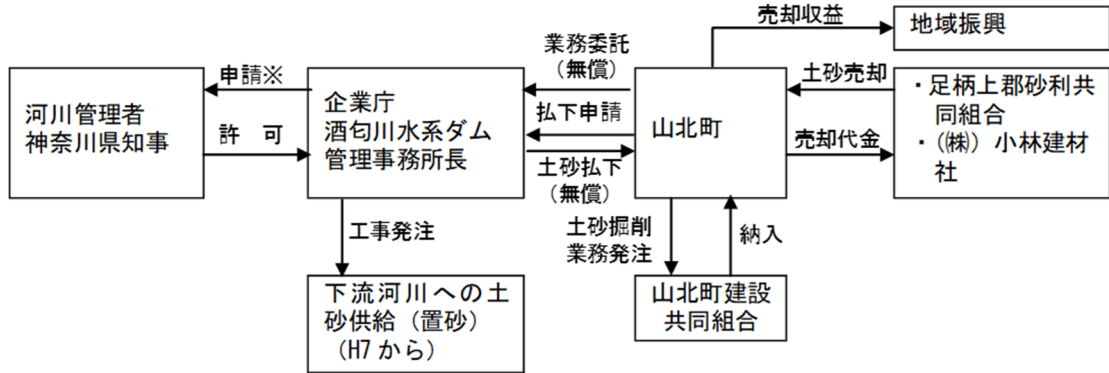
- ①矢作ダム下流から河口，三河湾海浜域まで含めた，矢作川流域を対象として，ダムからの排砂による効果（便益）と対策費用について，CVM，コンジョイント分析等で調査した結果，土砂供給による費用便益構造とその要因が明らかになった。
- ②土砂 BP により土砂が下流に移動することにより，土砂資源リサイクルにおいては，運搬コストを低減し，それにより土砂資源リサイクルを促進する効果のあること，また，CO<sub>2</sub>の削減や道路維持費，交通処理の課題対策においても効果があることが確認された。
- ③ダム堆砂対策の貯水池長寿命化という治水効果に加え，流砂系全域にわたる環境改善等の間接効果を評価することにより，土砂バイパス事業の経済的優位性，社会的便益が大きいことが明らかになった。
- ④河川中流部にストックヤードを設定し，民間事業者等の参加による土砂マネジメントを行うことにより，費用対効果が最適となる需要と供給の適正なマッチングについて提案した。
- ⑤今後の課題として，治水，利水，環境機能の増進に繋がる具体的なストックヤードの位置，規模，PFI 等も含めた運営方法について検討し，経済的に自立運営出来る事業手法の確立が望まれる。

土砂の有効な資源活用に成功している事例として、神奈川県酒匂川水系三保ダムにおける事例で、ダムからの掘削土砂を活用した仕組みを図 6-15 に示す。（この図は山本晃一著の「総合土砂管理計画、2014、p311」にも掲載されているが、著者が 2010 年に現地の三保ダム管理事務所を訪問調査のうえ、京都大学経営管理大学院における研究成果の一部として作成したものが原図である。）

酒匂川は 2 級河川で県が河川管理者であり，ダム管理者も県の企業庁であり許可が得られた。山北町と関係組合が協力して掘削土砂を砂利共同組合に売却し，その収益の一部を地域の振興費にあてている好事例である。さらに，余剰の土砂は三保ダムの下流に置き土して，ダム放流時に下流河川に還元し，河床材料の改善を行い生態環境の改善に役立っている。

また，矢作川をケース・スタディとして土砂マネジメントの組織（案）として図 6-16 に事例案をあげる。ここでは中流域に土砂ストックヤードを持つ土砂管理組織が土砂量の調整など行って，土砂の資源活用を行うものである。環境改善などの公益目的を持つものであることを考慮した事業主体の構成と，河川，ダム等の関係する管理者や河川利用者の理解と協力，許可を得ることが必須である。

このような好事例が、今後地域の実情を反映しながらいくつも実現することが望まれる。



※河川法、砂利採取法、自然公園法、砂防指定地に関する条例に基づく申請

図 6-15 土砂マネジメント組織の事例

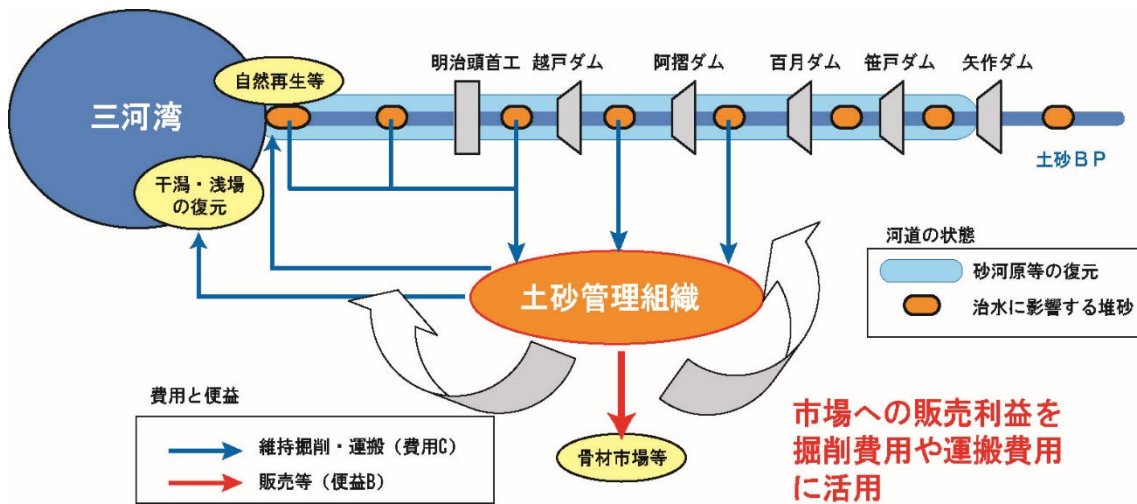


図 6-16 期待される土砂マネジメント組織の事例（矢作川を事例としての案）

### 6. 3 まとめ

本章においては、土砂管理の観点からの事業評価手法の提案に向けた研究成果を示した。

土砂管理の観点からの事業評価手法の提案では、土砂BPを含めた総合土砂管理のモデル化と経済評価のモデル化を行い、経済評価の試算を行い、治水効果に加え、流砂系全域にわたる環境改善も評価できる手法を示した。

上記の内容は、総合土砂管理の対策を経済的に示すための事例となり、今後の総合土砂管理の社会貢献への効果を定量的に示すことが可能となるものである。

## 参考文献

- 1) 富田邦裕, 角哲也, 渡邊守: 河川における総合土砂管理の経済評価-矢作川におけるダム長寿命化と環境改善を組み合わせた費用便益評価-: 第16回河川技術論文集 p529-534, 2010.6
- 2) 富田邦裕, 角哲也, 渡邊守: ダムからの排砂と土砂マネジメントによる河川管理の事業評価-矢作川におけるダムから海岸に至る総合土砂管理の最適化と費用便益評価-: 第17回河川技術論文集 p53-58, 2011.7
- 3) 国土交通省:公共事業評価の費用便益分析(共通編)に関する技術指針, 2009
- 4) 国土交通省:仮想的市場評価法(CVM)適用の指針, 2009
- 5) 国土交通省中部地方整備局矢作ダム管理所: 矢作ダム土砂バイパス関連資料, 2010
- 6) 国土交通省中部地方整備局矢作ダム管理所: 堆積土砂の有効利用関連資料, 2009

## 第7章. 流砂観測技術の高度化を踏まえた総合土砂管理の新しい展開

### 7.1 序説

#### 7.1.1 総合土砂管理の現状と実情

平成19年の気候変動に適応した治水対策検討小委員会「水災害分野における気候変動適応策のあり方について」の答申から、その後の検討や土砂災害による被災を受けて、近年、ますます、流砂系総合土砂管理の必要性が強く感じられる。これは、土砂生産源である山地から海岸までを一貫として取り扱い土砂移動動態を把握することで、海岸侵食や粗粒化といった土砂に係る問題を総合的に解決してくべきであるという考え方である図7-1に、流砂系河川で必要とされる管理の概念図を示す。

従来、土砂量のコントロールは砂防に任せられてきたが、総合土砂管理では、流砂系流域全体での土砂動態を把握する必要がある、必然的にダム等の土砂流下にかかわる施設では、下流への土砂動態を考慮し、下流に与えるインパクトを考慮した操作が求められる。

現状、ダム周辺での土砂観測は、定期的に測量で観測された、ある期間における入ると出た土砂を差し引いた結果の合計された流入土砂量にとどまっており、砂防分野でハイドロフォン等で行われているような時系列的な連続観測はほとんどなされていない。しかしながら、良好な河道環境や下流での土砂収支状況に適したダム等の土砂コントロール施設による運用を行うためには、その操作がどのような土砂移動を引き起こすかの把握や予測が必須であり、土砂動態のダム運用による応答を把握できるような連続観測が望まれる。

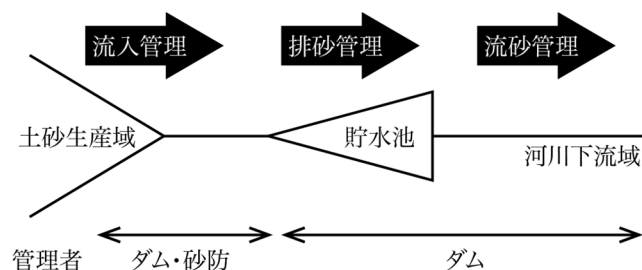


図 7-1 流砂系と主要な管理項目

#### 7.1.2 砂防事業者との相互理解と協調

我が国における砂防事業では流砂量の連続観測は一般的であるものの、ダム管理者による連続観測の実施や利用はほとんどないのが現状である。例えば、第3章で紹介したような、小渋ダム上流でのハイドロフォンを用いた流砂量観測は、下流の小渋ダム SBT の運用高度化にとって極めて有用な情報である。しかし、観測主体である砂防事業者とダム運用者の間では、情報の共有がなされていない。

同じく第3章で紹介した美和ダムや、小渋ダム SBT の例のように、ダム事業者による主体的な流砂観測も重要であるが、まずは砂防事業者とダム事業者が観測データに関するコミュニケーションを取ることで、流砂系全体での効率化を図ることが重要である。

### 7.1.3 流下土砂量のリアルタイム情報と予測

ダムや SBT の操作をする際は、流入量や流砂量のリアルタイムデータがあれば有効であり、重要性が高い。もちろん、流砂観測技術によりリアルタイム観測ができるに越したことはないが、コスト面や流速が大きい環境での掃流砂観測の困難性などから実現には多くの課題があり、観測出来るとは限らない。観測が難しい場合には、流量等のリアルタイムに観測出来て利用可能なデータを用いて流砂量の予測をすることになる。一般的によく使われる予測式は、流量等を説明変数とした線形、二次関数、もしくは指数型の回帰式である。しかしながら、流下土砂量は第 4 章で示したように、流砂 - 流量関係は履歴性を持つことが多く、これは水理量だけを説明変数としたモデルでは予測出来ないことを示している。精度を高めた流砂量の予測を行うためには、例えば、既往洪水の履歴性（ヒステリシスカーブ）を考慮した予測を行うことも必要であろう。

ここで、考慮されるべき履歴性は、単一洪水内の上昇期・下降期間でみられる履歴性と、洪水間での履歴性がある。前者は、第 4 章に示すような継続的な流砂観測を行い、当該流域がもつ洪水内履歴特性を把握することが重要である。一方、後者に関しては、ダムの上流河道における土砂存在量の変化（崩壊土砂による崖錐や洪水後の河道土砂堆積量の増減）を次の洪水発生前に計測し、土砂流出を予測することが推定の手がかりになる。また、土砂管理により下流へ流下する土砂は、堆積と移動を繰り返しながらさらに下流へと伝播する。河床への土砂堆積があるため、下流に進むほど移動土砂量は減っていくのが通常であるが、2018 年小渋ダムのように、堆積土砂が河岸侵食を促し、土砂が途中の河道で新たに補給される場合がある。総合土砂管理の観点からは、こうした縦断的な移動土砂量の変化、土砂到達の時間差、また土砂が堆積する区間の空間的分布の把握と予測も重要である。

### 7.1.4 ダム等の下流河道における河床地形の変化と環境

上流からの土砂供給が絶たれたダム下流では、河床低下や粗粒化が進行し、生物多様性の低下、特定の植物の繁茂、水質の悪化などの生態系劣化が生じている。したがって、ダム貯水池の土砂管理による下流への土砂輸送は、ダム下流生態系にも好ましいことが多い。ダム下流における土砂、地形、生態系の観測により、土砂管理の生態系回復への効果を確認することは、適切な土砂管理を進める上で、また土砂管理に対する地域住民の理解を得るためにも重要である。

砂州は、河川生態系において生物多様性や水自浄作用など生態系機能を高める。砂州が発達するには、土砂の量とともに粒径が重要であり、また土砂の侵食や堆積を促す適度な流量も必要である。ダム下流に輸送される土砂は一般に砂など細粒成分に偏りがちで、細粒成分だけでは河床が平坦化し砂州は発達しない。生態系の観点からは、細粒成分とともに砂利や小石以上もバランスよく含む土砂輸送が望まれる。また、ある程度の流量を伴わないと土砂は輸送先に堆積するだけで砂州は発達しない。一方で流量が大きすぎても、土砂のほとんどが流出し、河床は粗粒化した状態に戻ってしまう。砂州発達を促すのに適した流量、1 流量イベントにおける適切な土砂輸送のタイミングなど、ダム流量操作によって土砂輸送効果をどう高められるか、生態系保全を踏まえた土砂管理の高度化のために明ら



かにしていく必要がある。

## 7.2 高度な土砂観測の必要性、重要性

これまで述べた流砂系河川での土砂移動と収支を把握することは、水系一貫で河川を維持管理するために必要不可欠である。土砂生産領域ではどのような粒径の土砂が、いつ崩壊し、どのように溪流に落ちたのか。そして、河床の崖錐に溜まった土砂は洪水時に下流に流れて行く。その土砂は砂防堰堤などの砂防区間での抑止作用を経て流下した土砂は河川領域を流下し、ダム、堰堤等でも一部は堆積し残りはさらに下流に流下する。粗い粒径のものは河川の河床に堆積するものもあれば、大きな洪水時にさらに流下し、海岸や沿岸域に土砂を供給する。

これらは、連続した土砂生産領域～砂防領域～ダム領域～河川領域～海岸、沿岸領域への土砂流下と抑止、そして下流へ供給される。これらにより流砂系河川の土砂収支マップが河川ごとに作られ、その実態に基づき、総合土砂管理計画が策定され、ダムや堰のゲートやSBTなどにより、水系一貫の適切な土砂管理が「量」、「質」とともに実施されるというのが、総合土砂管理の目指すところである。ここでは、土砂は迷惑物ではなく、河川の治水、利水や環境、水質を維持増進するために必要不可欠な資源である。

留意しないといけないのは、土砂が流下することで堆積などが起こるのであるが、土砂は上流域で供給されており、上流から下流への連続性が保たれていないといけないということである。つまり、流砂とは各領域、区間で上流から下流へと流れている連続体であり、上流での土砂の崩壊や下流への土砂移動は、洪水、地震などのイベントの発生時に起こるものもあれば、平常時においても、いくらかの土砂は常に上流から下流に流れているということである。量的にはその大半が洪水時などに大きな移動が起こるが、平常時にも細かな粒径などは移動し堆積している。ここではハイドロフォンなどで土砂の移動量は洪水時に大きな移動が観測されることが多いが、平常時の移動についても今後観測し、水系一貫で土砂の移動を量的、質的にとらえることが必要である。平常時の観測機器、方法に関しても、TDR等の新たな機器、観測方法の研究が進められており、総合土砂管理の実現のためのツールとして取り入れることが重要である。

### 7.3 ハイドロフォン等の土砂観測機器の今後の展望

第2章にハイドロフォン等の土砂観測施設の種類や現状の活用状況などについて述べた。そこで紹介したように、土砂観測手法は数多く提案されており、ターゲットや制約に合わせて最適な手法を選択する必要がある。特に、ハイドロフォンのようにリアルタイムでの流砂データを観測出来る機器は、インターネットなどで接続され、関係者のネットが形成され、分析整理され、目的に合った使いやすい形でデータ供給がされることが望ましい。これらの得られたデータは流域内で関係者同士の繋がりを増やし、土砂管理を行う上での新たな有益な情報として使われることが予測される。これは間違いなく、水系一貫の総合土砂管理が目指すところであり、これにより安全で豊かで良好な環境の河川が水系一貫で実現する。

### 7.4 まとめ

水系一貫した総合的な土砂管理の必要性については上述した通りである。

- ①治水上の管理（砂防，ダム，堰，河床高等）
- ②利水上の管理
- ③環境管理上の管理（生態系，水質濁度）
- ④地域振興，かわまちづくりなど

そして、総合土砂管理を推進するには、その道義付けとして、土砂管理に要する費用と、それによる便益の算出により経済評価して、その施策や事業が社会的に効果があり妥当な投資であること、そして、他の方法よりのその方法が経済的にも効果、便益の面でも有利で適切であることの確認が必要であり、その社会的認知も重要である。筆者は、本稿で取り上げたように矢作川水系で土砂マネジメントによる経済効果（B/C等）の算定方法を数値計算等により示した。土砂管理の効果、評価はこれまで、土砂は洪水を起こす、取水障害を起こす、濁水となり河川環境を損なうといった負の面が強かった。一部、河川砂利がコンクリートなどの建築資材として活用されてきたが、公共物で国、自治体の財産である砂利を採取することによる負のイメージ、「土木工事」という負のイメージのために社会的には損な役割を演じて来さされた。

今、新たに土砂は「社会の有益な資源」として見直されつつある。そして、その効率的か有効な施策を進めるには、上流から海岸に至るまで水系一貫の総合土砂管理を行うことが必要であり、河川領域だけでの対策や土砂のやり取りではうまくいかないことが多い。そこで土砂マネジメントが必要となる。筆者は矢作川で土砂のストックヤードの設置を含めた土砂マネジメント方策を検討し、その経済評価を行った。ここでも土砂マネジメントを行うには、土砂の移動や粒径などの質をリアルタイムで観測する高度な観測技術が必要となる。それにより、土砂観測技術、施設の高度化、ネットワークの構築、データ処理技術が、新たに有益かつ適切な土砂管理、マネジメントの可能性を生み出す。

そして、今までにない土砂管理システムにより、「資源としての土砂」がさらに活用され、防災、利水、環境の面で社会的に有益な効果を発揮する。

それには、ハイドロフォンをはじめ土砂の観測技術はさらに精度、データの質の面で高度化して、目的にあった観測データが得られるように技術開発する必要がある。矢作川においても、河川内にちょうど良い広場、河川敷の空き地があった。ここに土砂を一時ストックしておくストックヤードや、必要となるときに、その土砂をいつどこに運搬するとか、そのルール化を行うにも土砂の観測施設、システムが必要となる。そのためには、土砂観測の高度化は河川管理、土砂管理、防災、利水、環境等にとっても重要かつ必要なものである。

土砂観測技術の高度化により何が生まれるのか。

- ①総合土砂管理がどう変わるか。
- ②土砂と水の管理方法はどう変わるのか
- ③河川の土砂に対する社会的な認知が進む
- ④これまでの砂防から流砂の管理へと変わる
- ⑤土砂生産領域の管理と土砂の出口管理の考え方、方策が変わる
- ⑥土砂は有益な資源であり適切な管理と活用がこれからの社会に有効かつ有益である

ここで、それに対する著者の考えを以下に述べる。

#### ①総合土砂管理がどう変わるか。

リアルタイム情報がネットシステムで関係者に伝わることにより、例えば、ア) 避難指示がリアルタイム情報をもとに判断され、速やかに避難指示ができるようになる、イ) ダム、堰の管理者は上流での土砂情報により効率的に土砂を通過させるゲート操作などが出来る、ウ) 河川管理者は土砂の量、粒径をもとに河床変動解析の精度、予測を上げることが出来る。樹木管理、河道の2極化についてもウォッシュロードの予測から管理できるようになる。

#### ②土砂と水の管理方法はどう変わるのか

土砂と水は $Q\sim Q_s$  曲線で関係が見えて来た。ヒステリシスカーブから土砂が遅れて反応するなどの傾向や、側方浸食や支川からの土砂流入があるなど、土砂の動きは複雑である。上流で既に土砂が溜まっていたら、次の洪水で土砂が流れることなどの予測もできる。土砂動態の情報がリアルタイムで入手出来るようになると、各段に土砂管理における対策や土砂のコントロールの方法が変わる可能性がある。

#### ③河川の土砂に対する社会的な認知が進む

今までは土砂の動きは良くわからなかった。不確実なものでいつ土石流や崩壊が起こるかもわからない。しかし、リアルタイム情報が伝わると土砂動態の実態と予測がある程度できるようになり社会の土砂災害に対する認知も進むと思われる。

#### ④これまでの砂防から流砂の管理へと変わる

土砂災害を防ぐのに砂防堰堤などの建設による「砂防」であったが、これからは土砂の動きを監視して管理し、必要な時には避難することが出来るようになる。

#### ⑤土砂生産領域の管理と土砂の出口管理の考え方、方策が変わる

砂防事業は土砂災害を防ぐという目的であるが、土砂の生産イベントをリアルタイムで覚知し、土砂が一度に下流へ出て行かないように出口管理するなど、砂防堰堤の役割も静的なものから動的に操作して管理するものへ転換することが必要である。

#### ⑥土砂は有益な資源であり適切な管理と活用が重要

Sand War にあるように砂、礫は貴重な資源であり、既に世界的に奪い合いの争いが始まっている。有益で価値があるから欲しがるのである。シェールオイル、ガスは今後 OPEC をしのぐともいわれる石油で砂がなくては採掘できない。PC などに使う半導体も砂成分から基幹部は出来ている。眼鏡のガラスも砂の成分からである。埋立土の土砂、コンクリートの砂、礫も大規模に都市づくりに使用される資源である。良質な砂、土砂は適正に管理されるべきで、土砂の運搬、活用には河川の流下によりダンプを使わずクリーンに低コストで掘削、運搬するなど管理、運用することが重要である。

土砂と河川流水の観測技術の発展は、洪水時と平常時の対策や管理運用、そして、それらを含めた土砂マネジメントの重要性が認識され、土砂のコントロールの実施必要性につながる。土砂の有効活用は社会的に大きな課題であり、将来のまちづくりの施策のネタにもなる。カラーストーンなど建材への活用など付加価値の高いものへの変換も重要であるし、高い付加価値を生む土砂の中に含まれるスカンジウム Sc 等のレアアースの抽出も期待がもたれる。土砂を資源として扱うこと、これにはいくつかの課題と将来への期待が膨らむが、そこでも、土砂の観測技術、機器とシステムにおいて、これまで以上にさらに便利で高度な流砂観測技術の開発と活用が期待される。

## 第8章. 結論

近年、地球温暖化の影響もあり、甚大な洪水や土砂災害が毎年のように発生している。ここでは、洪水による浸水被害だけでなく、土砂、流木も巻き込んで大量に流下し、大きなエネルギーとなって下流地域に被害を及ぼしている。洪水被害を防ぎ軽減するには増大する洪水流だけではなく、土砂の管理がより重要になって来ている。

平成9年の河川審議会で「総合土砂管理小委員会（高橋保委員長）」が設立され、総合土砂管理の必要性が提言され、それに向けて国、自治体等の取り組みが始まった。しかし、20年以上経った今でも現状は大きく進展していない。その理由の一つとして、わが国では土砂生産領域と砂防領域においては砂防事業者が所掌し主に権限を持っているが、その下流のダム領域に関してはダム事業者やダム管理者が、さらに、その下流の河川領域においては、国（国土交通省）や自治体（都道府県、市町村）が河川管理者として管理しており、権限と所掌が分断されている。さらに、その下流の海岸領域では、国（国土交通省の水管理・国土保全局と港湾局、経済産業省、農林省）及び自治体が管理者となり、それぞれの所管部局の利害や都合が優先される縦割り行政となっており、土砂をめぐって水系一環としての課題事項の解消や便益の創出が一致協力して実施されていない状況である。そのため、流砂系河川での水系一貫の総合土砂管理は、災害防御と利水、環境保全において総合的に実施されるべきであるが、うまく行っていないのではないかと考える。総合土砂管理計画は現在8河川で策定済であるが、もっと多くの河川で総合土砂管理計画が策定され、全流域で統一的な価値観のもと適切かつ効率的に土砂管理がなされるべきと考える（図1-1 総合土砂管理計画策定河川の位置図参照）。また、総合土砂管理が進まない原因の一つに縦割り行政以外にも現実の問題として、流砂観測が正確かつ適切な箇所等で統一的な方法で実施されていないという現実がある。もし、洪水時、平時含めて土砂の移動状況や移動土砂の粒径分布等がリアルタイムで連続的に観測されたら、これらのデータをもとに、上下流での連携が進み、防災、利水、環境問題の解決もさらに進むもの考える。

本稿では、現状の土砂管理に関する課題として上下流での管理者間の調整だけでなく、観測技術の高度化が実現すれば、より適切に総合土砂管理が進み、安全、安心、快適な国土形成に資するものと考え。そこで、第1章では、これらの研究背景として、土砂観測技術の現状と課題、今後の技術開発への期待などを述べ、以下、流砂観測技術の高度化により実施が可能となることや、その意義と経済効果などについて研究し、それが流域監視や流域治水にも資するものになると考える。

第1章では、本稿の目的と現状の課題などについて、以下のとおりとりまとめ述べた。

- ①河川法が平成9年に改正され、環境が第3の目的となり、総合土砂管理に関する河川審議会の答申も出されたが、砂防、ダム、下流河川における土砂連携と最適化が進んでいない。その基礎データとなる土砂動態に関する観測技術も不十分で向上が望まれている。
- ②土砂管理の目標設定が明確でない。何を目指すのか。定量的な流量と土砂の目標が領域で設定されていない。

- ③技術的な問題があり，総合土砂管理はこうあるべきで，観測技術はこうあるべき，そしてその解析，分析技術もこうあるべきという，これらで不足しているところについては，このように改善すべきという改善目標もはっきりしていないし，関係者でその共通認識を持たれていない。
- ④ハイドロフォン等のリアルタイムでの土砂観測技術，機器が出来たが，未だ精度面，技術面で不十分な部分がある，現在の精度でも現地で活用する方法，出来る部分があるので，精度の向上を目指すだけでなく，現在の精度で何が出来るか活用策を検討すべきである．また，精度だけでなくリアルタイムの土砂動態情報が入手できることによって何が出来るのか，総合土砂管理はどう変わるのかを考えなければならない。
- ⑤何のために測っているのか，観測の目的を明確にすること．それを目指して観測技術は変わっていくべきである．知りたい情報に土砂動態の土砂量と粒径などの質的情報を知ることによって何が出来るか，土砂管理への展開と，リアルタイムのデータ入手が，土砂災害，洪水被害の危機管理にも役立つこと．さらに，かわまちづくり，河道の維持管理にも有益な情報となることがある．土砂は土砂生産領域や砂防，河川領域で重要な構成要素であり，河川環境，生態系に重要な影響を与えるものでもあり，高度な土砂観測は土砂移動や粒径などを考慮した河道整備とモニタリング（観測）にも役立つ。
- ⑥土砂動態の観測は，砂防事業，河川事業の効率的，効果的な推進と防災，危機管理のために重要であるが，現状の砂防事業では土砂の定量的な検討や，土砂を上下流での連続体としての取り扱いが弱く静的な土砂管理しか出来ていなかったもので，今後検討すべきである。
- ⑦水系全体で総合土砂管理計画を作成する必要がある．そこでは，量，質ともに重要なファクターであり，下流の堰，ダム等の構造物がどういう影響を受けるか，その影響はどこまで許容され，どうしたら良いのか，各地点等における土砂の量と質の範囲，閾値の設定など，具体的な実現策を検討する必要がある。
- ⑧流砂系では水と土砂について，上流側がどのような土砂管理をして下流に伝え，下流側ではそれを受けとめてどうするのか．それを水系全体としてまとめるためにも，定量的で高度な流砂観測技術が必要である。

第2章では，流砂量観測技術に関して現在ある観測技術について全体像を述べた．具体には，既往の流砂量観測技術を土砂の時間的フラックス変化，空間的フラックス変化に分類し，整理した上で，複数の流砂量観測技術の特徴，メリット，デメリットについて取りまとめた。

土砂の時間的フラックス変化の計測と空間的存在量変化の計測においては，流砂系内における土砂の時間的・空間的移動実態を把握する手法として，現時点では，濁度計，ハイドロフォン等の間接的観測機器によるフラックス計測と，河床縦横断測量，航空レーザ(LP)，ALB(航空レーザ測深)，UAV，InSAR，Google Earth等の地形測量による手法がある．各手法の主な特徴を示し，それぞれの概要を示した。

既往の流砂量観測技術を土砂の時間的フラックス変化、空間的フラックス変化に分類し、整理した上で、複数の流砂量観測技術の特徴、メリット、デメリットについてレビューした。

土砂の時間的（フロー）フラックス変化に関する流砂量観測技術では、出水時に流下する土砂を把握することが可能であり、土砂の上下流でのフローの把握に適用できる。土砂の空間的（静的）フラックス変化に関する流砂量観測技術では、出水前後に観測データの差分から河道等の土砂量の変化（堆積、洗堀）を把握することが可能であり、土砂のストックの把握に適用できる。また、こちらの技術は流域一貫で適用されているが、定期的には実施されているのは、ダム、河川区間であることが多い。

このように、土砂の時間的フラックス変化、空間的フラックス変化に関する流砂観測技術、手法により観測されるデータが異なるため、総合土砂管理の対策データ等を評価にするにあたっては、評価対象と目的を明確にした上でモニタリングに適用する流砂量観測技術を選定する必要がある。

**第3章**では、ハイドロフォンの基礎理論、ハイドロフォンの観測形態による特性比較、ハイドロフォンの適用範囲について、研究成果及び既往事例を記載し現状について述べた。

ハイドロフォンの基礎理論では、ハイドロフォンの仕組みの概要と精度について述べた。精度については、ハイドロフォンとは別の観測機器で掃流砂量を観測し、双方の観測結果を比較し、ハイドロフォンでは粒径2mm以下の土砂については観測することが困難であることを示した。続いて、ハイドロフォンの観測形態による特性比較では、パイプ型ハイドロフォンの長さの影響、パルス式と合成音圧式の特性（データ処理方法の相違）、新型ハイドロフォンの特性について示した。パイプ型ハイドロフォンの長さの影響では、長さが0.5mと2.0mと異なるハイドロフォンでもほぼ同等の観測結果となることを示し、また、パルス式と合成音圧式の特性では、観測結果算出ではそれぞれの特徴を示した。

また、新型ハイドロフォンでは、プレート型ハイドロフォンはパイプ型ハイドロフォンと同様に一つの比例係数で適用可能な範囲があることが示唆された。さらに肉厚パイプ型ハイドロフォンは、耐久性が向上するが、従来のパイプ型ハイドロフォンより肉厚であるので、比較的小さな礫の検出感度が低い傾向にあることが判明した。

**第4章**では、ハイドロフォンを土砂管理に活用した事例として、砂防領域で3事例、ダム領域で1事例の研究事例を述べた。

砂防領域でハイドロフォンを土砂管理に活用した研究事例として、富士川流域、利根川流域、渡良瀬川等を挙げた。富士川流域等では、ハイドロフォンの観測結果より、定性的に土砂流出状況の変化を示すことができること、及び $Q \sim Q_s$  曲線の履歴線（ヒステリシスカーブ）から土砂流出状況とその変化が確認できることを示した。次に、利根川流域では、無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係から土砂流出量の増加傾向・減少傾向を把握すること及び前述の關係に観測地点を含む流域の河床変動量や砂防堰堤等の堆砂状況を組み合わせ

て評価することで、今後の土砂流出状況を定性的に推定できることを示した。さらに、渡良瀬川流域では、水位と掃流砂量の関係に基づき、上流域での砂防事業の効果が確認でき、経年的にデータを蓄積することで砂防事業の事業評価に活用できることを示した。

ダム領域においてハイドロフォンを土砂管理に活用した研究事例として、小渋ダムをあげた。小渋ダムでは、掃流砂に関するパイプ型とプレート型の両方のハイドロフォンについて計測特性や、これを用いた流量規模ごと、季節ごとの掃流砂量の変化、さらに洪水ピークに対する掃流砂の流下特性について示した。

上記の内容は、砂防領域、ダム領域の土砂流出状況の実態把握、砂防事業評価及びダムの SBT 運用に対する留意点など、今後の土砂管理を進める上で有意義なものと考えられる。

**第5章**では、黒部川における UAV 等、国土交通省北陸地方整備局松本砂防事務所の水位データ及び CCTV 画像の活用、富士川流域における SAR の流砂量観測技術を活用した土砂管理への活用等の研究成果を述べた。

黒部川では、UAV を利用することで定量的に河川の土砂流出の状況や地盤高、地盤高の変化を把握することが可能であり、赤外線カメラを利用することで夜間の土砂流出を監視することも可能、3D レーザースキャナーを設置し観測することで定期的かつ定量的に地盤高、土砂変動量を把握することが可能であることを示した。

松本砂防事務所の水位、流量データを用いて流量減少率、流量増加率を算定し、河道閉塞発生検出可能区間の閾値が検討可能であることを示した。また、CCTVカメラの画像解析から砂防領域においても、水位、流量の計測が可能であることを示した。

富士川流域では、偏光 SAR 画像の干渉解析により、河床部の微地形の変化を捉え、現地での測量作業が困難な山地河川における河道内堆砂や河床侵食等のマクロな土砂移動状態を把握した。これらは、ハイドロフォン以外の流砂量観測技術も十分に土砂管理に活用できることを示した。本研究ではハイドロフォンの利活用をメインにしているが、他の流砂量観測技術の利活用についても積極的な研究が期待される。

**第6章**では、総合土砂管理の観点からの事業評価手法の提案に向けた研究成果を示した。

総合土砂管理の観点からの事業評価手法の提案では、矢作川をモデルにして土砂 BP を含めた総合土砂管理のモデル化と経済評価のモデル化を行い、経済評価の試算を行い、治水効果に加え、流砂系全域にわたる環境改善も評価できる手法を示した。

上記の研究では、土砂を有効活用可能な資源として捉え、ストックヤードの設置運用も含めた土砂マネジメントによる総合土砂管理方策について、その経済効果を数値指標に示すことを示した。水系一貫の総合土砂管理を行うには、製品の配送などはロジスティクスと同じで、効率的な運用を行うために倉庫にあたる一時的な土砂のストックヤードが必要であり、今後の土砂マネジメント含めた総合土砂管理のあり方についてモデル化を行い、経済効果を定量的に示すことが可能であることを示した。



第7章では、流砂観測技術の高度化を踏まえた総合土砂管理の新しい展開について、これまでの流砂量観測技術の開発状況や、現地での観測の実態を踏まえ、筆者の考えを述べた。総合土砂管理を進めることが必要で重要であることは自明であり、近年の多発する土砂災害、洪水災害の状況を見ても、上下流間で情報と問題を共有して、一致協力して進めていけば解決策が見えてくることは明らかである。そのために、土砂生産領域と砂防領域を管理する砂防管理者とダム管理者、河川管理者、海岸管理者らが協力、協調して相互に積極的に情報提供と協力を行うことが重要であることを述べた。さらに、これまでの静的な移動土砂量の把握による土砂収支だけでなく、リアルタイムでの土砂移動量を把握し、水系一貫して各領域の管理者が情報共有してリアルタイムで対応することも重要で災害防止効果があることも述べた。砂防施設やダムの計画立案や管理運用、維持管理を行うにあたって、これら上流での土砂に関する情報やリアルタイムでの移動土砂量に関する情報は有益な知見を与えてくれる。例えば、ダムの計画堆砂量の算定や、土砂BPの計画、運用、必要性、効果の算定にも重要な情報を与えてくれる。さらには、河川領域では、河道掘削の位置、掘削量、掘削位置、治水効果だけでなく、環境への影響として土砂の補給、特にどのような粒径階の土砂が、どれだけの土砂量が上流から流れ、あるいは施設のゲート等から補給され河川の河床に堆積したのかは、河川生態系にとって重要な情報であり、それを考慮して河川掘削や改修、堰等のゲート施設の最適な運用が決まることを示した。また、上流でのリアルタイムでの土砂動態の情報は、土石流などの発生と流下を下流の自治体、住民に知らせ、効果的な避難を行う上で重要な情報となる。筆者はスイスの現地において土石流の発生をジオフォンで察知し下流の警報サイレンに直結している事例を見学したことがある。我が国においてもワイヤーセンサーなどでのそのような仕組みは作られて来ているが、地域の防災避難システムの定着には至っていない。

これらを実現するには、高度な流砂観測技術が必要であり、それらの情報をリアルタイムで上下流の関係者に伝えるためのネットワークの構築が必要であることを述べた。流砂観測技術には、第2章に述べたように様々な方法があるが、高度な流砂観測技術として期待されているものに、筆者はハイドロフォンなどの機器が上手く使われて精度が今後とも向上し、他の観測技術の情報と併せて情報がリアルタイムで総合化され、水系一貫で情報ネットワークが構築されることが期待されることを述べた。

今後、ますます技術が発展し、水系一貫で総合的な土砂管理がすべての関係者で協力して進められ、安全、安心で豊かな国土の構築と繁栄に寄与されることが期待される。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、基本的な事項から細部に亘るまで終始懇切丁寧かつ貴重な時間を割いて御指導を賜りました京都大学防災研究所水資源環境研究センター社会・生態環境研究領域の角哲也教授に深く謝意を表します。角哲也教授におかれては、筆者が平成20年4月から22年3月まで京都大学経営管理教育部専門職（MBA）においても指導教官として大変に懇切かつ有益なご指導を賜りました。重ねてお礼申し上げます。また、京都大学防災研究所の藤田正治教授、竹林洋史准教授、宮田秀介准教授におかれましては、ハイドロフォンによる流砂量観測技術に関して、現地での指導から理論的な考え方のご教授に至るまで、数多くのご指導と有益なご助言をいただきました。心より謝意を表します。さらに、京都大学防災研究所水資源環境研究センターの竹門康弘准教授におかれましては、置き土やダムからの排砂等による土砂流下が河川生態系へ与える影響などに関して、常日頃より熱心なご指導とアドバイスをいただき、河川生態に関して基本的な知識と全体を俯瞰する見方を丁寧にご指導いただきましたこと、深く感謝申し上げます。京都大学防災研究所のSameh Kantoush 准教授におかれましては、土砂移動に関する考え方の指導を、小柴孝太助教におかれましては、様々な流砂観測手法についての整理、とりまとめ等、ご指導いただきましたこと感謝申し上げます。また、角哲也先生の研究室においては、何かと筆者が至らぬところについてご助言をいただきましたこと、ここに研究室の皆様から感謝の意を表します。

本研究を取りまとめるにあたり、資料整理などご協力いただきました株式会社建設環境研究所の重村一馬氏、叶正興氏には、論文をまとめるにあたり、ひとかたならぬご協力、ご助言をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

本研究は、これまで河川やダム、砂防事業の土砂関連で取り組んで来た研究を取りまとめたものです。株式会社建設環境研究所で、ともに研究をしてきた方々や、ご助言、ご協力いただきました方々に心より謝意を表します。また、調査研究において資料の提供などご協力いただきました国土交通省関東地方整備局富士川砂防事務所、利根水系砂防事務所、渡良瀬川河川事務所をはじめ国土交通省の関係事務所の方々にも、発表論文への資料協力、共同執筆など深く謝意を表します。

今後は、本研究で得た知見を用いて、流砂系河川の総合土砂管理が計画、防災、維持管理、特に土石流はじめ、土砂災害からの危機管理に広く活用されるとともに、貴重な資源である土砂の活用が進み社会に貢献出来ますよう、今後とも研鑽を重ねていきたいと考えております。

最後に、ご支援、ご協力をいただきました皆様から心より御礼申し上げます。ありがとうございました。