流砂量観測データの精度向上について

小林　幸博

関東地方整備局　富士川砂防事務所　調査課　（〒400-0027 山梨県甲府市富士見2-12-16）

流域の土砂移動現象について、従来、砂防堰堤の堆砂測量や河川定期横断測量等によって把握されていたが、これらのデータではストックされた量の変化しかわからず、出水時における流下土砂量が把握できていない。本稿は、富士川砂防事務所管内で、ハイドロフォン、水位計、濁度計等の観測機器を用いた間接型の流砂量観測を実施するとともに、出水時に可搬式流砂量観測装置や埋設式流砂捕捉装置等を用いた直接型の流砂量観測を行い、観測結果の解析、検証を行い、流砂量観測の精度向上について検討したものを報告する。

キーワード　ハイドロフォン，濁度計　可搬式流砂量観測装置，埋設式流砂捕捉装置，掃流砂

1. はじめに

国土交通省では、砂防事業の計画的実施、流砂系一貫した総合的な土砂管理に資するため、山地河川をはじめとする流域の土砂生産、流出及び河道内の移動状況の把握等を目的として、全国の直轄砂防事務所において流砂量観測が進められている。

しかし、これまでの観測データの整理では、観測値と理論値の乖離やハイドロフォン、濁度計の観測データによる流砂量の算出精度等についてまだ十分に解明されていないことが多く、観測機器の改良や観測データの解析・評価技術の向上が必要である。

本稿は、富士川砂防事務所管内において、2010年から取組んでいる流砂量観測の実施状況及び得られた主な成果等をとりまとめて報告する。

2. 富士川砂防管内における流砂量観測の概要

富士川砂防事務所では、流域における土砂の移動状況を把握するため、2010年度からハイドロフォン等の観測機器による流砂量観測を開始し、2012年度に大武川第50床固工において可搬式流砂量観測装置を用いた出水時調査を始め、2013年度に電磁式流速計や埋設式流砂捕捉装置を設置し、出水時の水深・流速・流砂量等を同時に測る流砂量観測システムを整備した。2014年には、春木川下流の栃原砂防堰堤において、プレート型ハイドロフォンを増設し、2015年度から、栃原砂防堰堤で自動採水器による出水時の採水、春木川橋ではバケツ採水による浮遊砂調査を実施している。

現在、富士川砂防事務所管内において、計9箇所で流砂量観測を継続的に実施している（表-1、図-1）。

表-1　流砂量観測施設、機器一覧

流域	調査箇所		設置機器
釜無川	① 西比良下流第 6 床固工		・水位計(水圧式)　・濁度計　・浮遊砂サンプラー ・パイプ型ハイドロフォン L=0.5,2.0m
	② 流川第 36 床固工		・水位計(水圧式)　・濁度計　・浮遊砂サンプラー ・パイプ型ハイドロフォン L=0.5,2.0m
	③ 濁川下流第 9 床固工		・水位計(水圧式)　・濁度計　・浮遊砂サンプラー ・パイプ型ハイドロフォン L=0.5,2.0m
	④ 大武川 第 50 床固工	左岸	・水位計(水圧式)　・濁度計 ・パイプ型ハイドロフォン L=0.5m　・流速計[底面] ・可搬式流砂量観測装置※
		右岸	・水位計(水圧式)　・濁度計　・浮遊砂サンプラー ・パイプ型ハイドロフォン L=0.5,2.0m ・流速計[底面、側面]
		ピット	・パイプ型ハイドロフォン L=0.5m ・埋設式流砂捕捉装置※
	⑤ 船山橋		・濁度計
早川	⑥ 慶雲橋下流床固工		・水位計(水圧式)　・濁度計　・浮遊砂サンプラー ・ハイドロフォン L=0.5,2.0m
	⑦ 樽坪堰上流		・水位計(水圧式)　・濁度計
	⑧ 栃原砂防堰堤		・濁度計 ・パイプ型ハイドロフォン L=0.5m ・プレート型ハイドロフォン
			・水位計(超音波式)
			・自動採水器
	⑨ 春木川橋		・バケツ採水

※出水時観測のみ

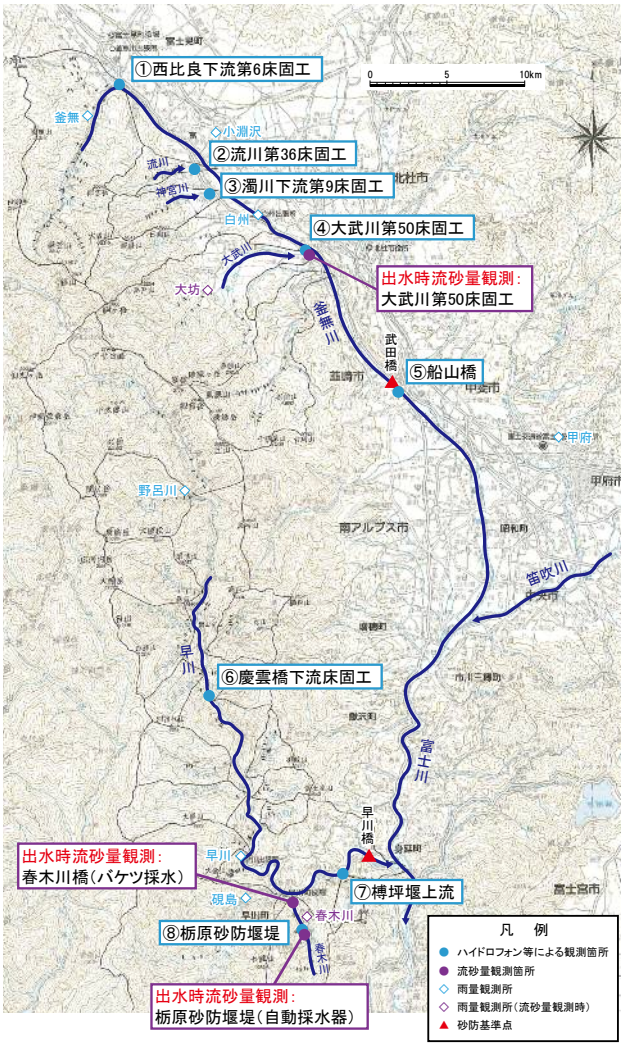


図-1　流砂量観測箇所位置図

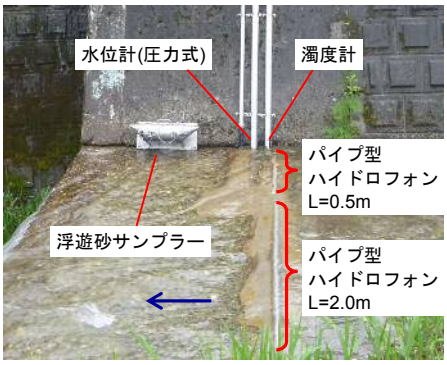


写真-1　標準的流砂量観測機器のセット

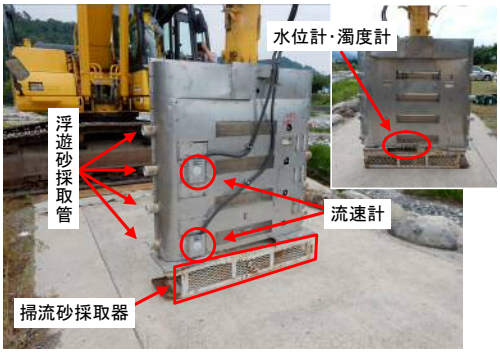


写真-2　可搬式流砂量観測装置

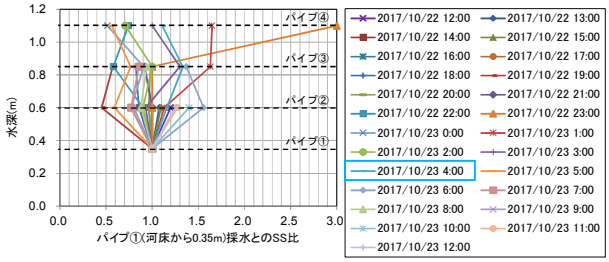


図-2　出水中の水深方向の浮遊砂濃度分布（最大水深1.24m）

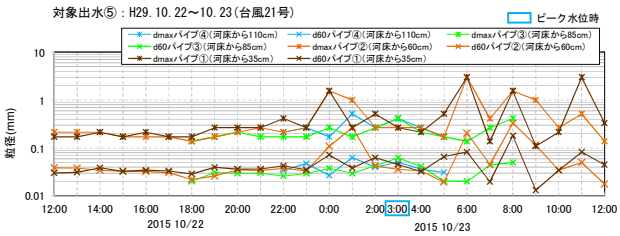


図-3　出水中の水深方向の浮遊砂の粒径分布（d_{max}, d_{60}）

3.　観測データの精度向上についての取組み

富士川砂防事務所管内において、2010年から流砂量観測機器の設置、改良から観測所の維持管理まで、観測データの精度向上に関して様々な工夫が施され、健全なデータ取得及び解析・評価技術の向上に取組んできた。その主な内容を以下に取りまとめる。

(1) 可搬式流砂量観測装置による出水時の浮遊砂採取

標準的な流砂量観測システムでは、ハイドロフォン、濁度計、水位計及び浮遊砂サンプラーのセット（写真-1）で、出水時において河床に転がりながら流下する掃流砂量はハイドロフォンの観測データより、流水中の浮遊砂の濃度、粒径は濁度計及び浮遊砂サンプラーのデータを推定することになっている。出水条件（水深・流速等）により水深方向で浮遊砂の濃度や粒径が異なることが考えられ、現在の観測手法による観測データの妥当性について、検証することが必要である。このため、富士川砂防事務所では、事務所所持の可搬式流砂量観測装置（写真-2）を用いて、2010～2011年度には早川本川、2012年度以降は大武川第50床工左岸において、主な出水を対象に出水時の水深方向で4箇所から採水調査を実施し、出水条件と浮遊砂の濃度分布等を分析、考察した。

代表的な出水について整理した出水時の浮遊砂濃度の深度分布状況を図-2、図-3に示す。

大武川第50床固工における観測結果では、水深方向に浮遊砂濃度（SS）、粒径分布とも明確な変化傾向が認められなかった。これは観測箇所は河床勾配1/75程度の急流河川で、河床には大礫も散在しているため、出水時には全断面で流水が乱され、粒径の比較的細かい浮遊砂がほぼ均一状態に攪拌されたと推測される。

(2) 埋設式流砂捕捉装置による出水時調査

洪水中に河床面付近で転がりながら流下する粒径の比較的大きい土砂（掃流砂）は河床に設置された金属パイプのハイドロフォン（L=2.0m,、0.5m）に衝突した時に発生した音響圧より流下土砂量を換算されるが、上流から流れた土粒子がサルテーション（跳躍）でハイドロフォンを飛び越えたり（衝突率の問題）、集団で衝突した場合の波形干渉等の影響（検出率の問題）でハイドロフォンの観測データでは流砂量を過少評価される傾向があると指摘されている。現時点では、どのような流水条件で流下土砂の何割が計測されたかについて、検証データが少なく、明確な結論に至っていない状況である。この課題を検討するため、富士川砂防事務所では、2013年に大武川第50床固工の右岸側において、ハイドロフォンと堆砂ピットを組み合わせて、出水時にハイドロフォンの上を通過した土砂を捕捉できる「埋設式流砂捕捉装置」を設置した（写真-3）。当装置には、底面にピットの堆砂量を時系列記録できるロードセルを装着しており、観測データを、付近で設置した水位計、流速計による取得した水理データと合わせて、土砂の流下状況を時系列解析できるようになっている。また、出水中に堆砂ピットの開口部の横から土砂流入の影響を除くため、土砂捕捉装置上部の開口部に高さ50cmの箱型導流装置を設置し観測精度の向上を図った（写真-3の右側）。

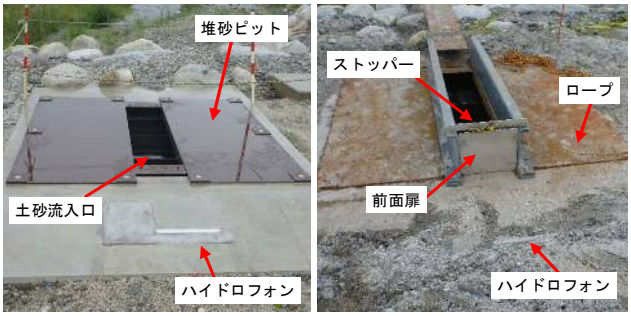


写真-3　埋設式流砂捕捉装置（堆砂ピット）

2013～2014年度の観測データの整理、考察に基づき、以下の知見をが得られた。

① 通常の観測条件において、パイプ型ハイドロフォンの検知可能な下限粒径は概ね2mm程度である（図-4）。このため、流下土砂に2mm以下の粒径を多く含まれる場合に観測データによる算出土砂量は過少評価になる可能性が大きい。

② 2013年以降の主な出水時の観測結果では、出水によってハイドロフォン観測結果（Whd）と捕捉土砂量（Wpt）の比は出水によって大きな違いを示すが、水深が大きいほど、比率が大きくなる傾向がある。これは出水条件（水深、流速等）のほか、対象の出水における流下する土砂の粒径組成にも大きく影響されると考えられる（図-5）。

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

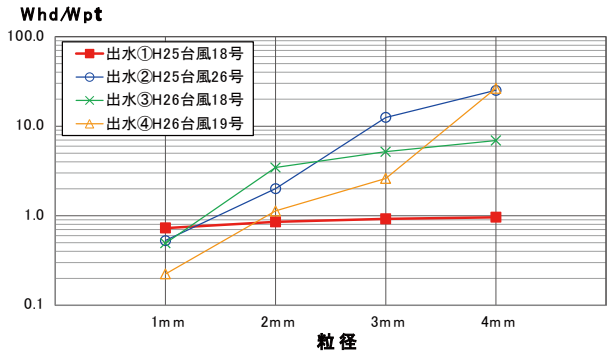


図-4　ハイドロフォンの検知下限粒径

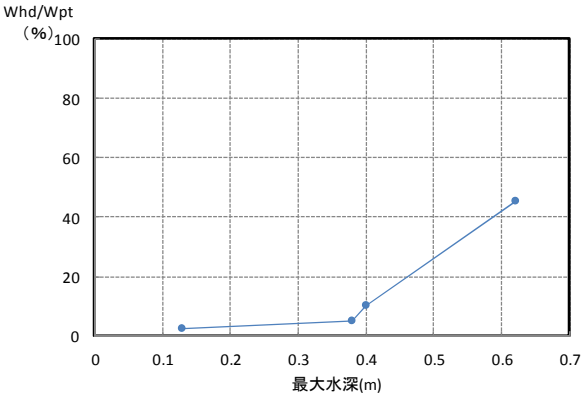


図-5　洪水水深とハイドロフォン観測値Whd/捕捉土砂量Wpt

(3) 春木川・栃原砂防堰堤におけるプレート型ハイドロフォンの導入

早川流域の春木川は上流に七面山等の崩壊地を抱えており、出水時に大量の土砂が流出し、流域の土砂収支に大きな影響を与えている。春木川からの土砂流出状況の把握は流域の総合的土砂管理にとって重要である。このため、2010年に春木川上流の春木第1砂防堰堤、春木第2砂防堰堤でパイプ型ハイドロフォンが設置されたが、2011年度の洪水で、すべての観測施設が破損または流出され、やむ得ず観測中止となった。これを受け、富士川砂防事務所では、春木川の流砂量観測を継続的に実施するため、2014年に、日本で初めての現場設置事例として、

春木川下流・栃原砂防堰堤において土砂の衝撃に対して頑丈なプレート型ハイドロフォンを導入した。また、プレート型ハイドロフォンの観測データから流砂量の換算方法を確立するために、同箇所にプレート型ハイドロフォンと並列して従来のパイプ型ハイドロフォンも併設し（写真-4）、それらの観測結果の相関性について考察した。既往出水の観測結果よる相関関係の事例を図-6に示す。両者の間にほぼ線形的な関係であることが確認された。つまり、観測地点に適応した相関係数を定めれば、パイプ型ハイドロフォンと同様な解析手法でプレート型ハイドロフォンの観測データ（音圧）から流砂量の算出が可能であると考えられ、今後、土砂流出の激しい河川にはプレート型ハイドロフォンの適用が可能と考えられる。

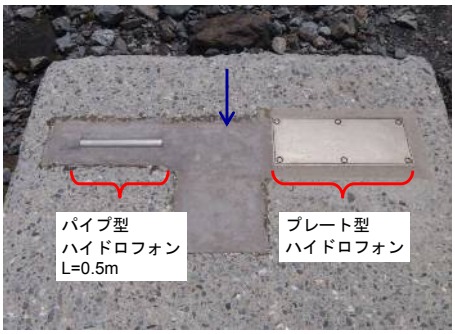


写真-4　プレート型ハイドロフォンの設置状況

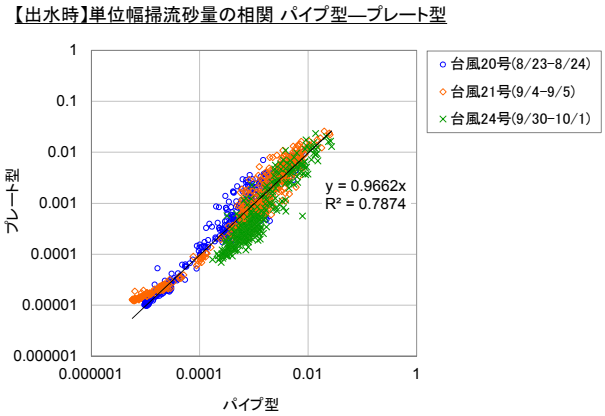


図-6　プレート型･パイプ型ハイドロフォンの観測データの相関

(4) 春木川におけるバケツ採水・自動採水器による浮遊砂調査

春木川における浮遊砂の観測機器として、栃原砂防堰堤に設置された濁度計のみである。洪水時に流下する浮遊砂量を求めるためには、出水時の洪水中に含まれる浮遊砂の濃度（SS）及びその粒径組成を把握することが必要である。そのため、栃原砂防堰堤と春木川下流端の春木橋で出水時における採水調査を実施した。現場の採水方法としてバケツ採水が一般的であるが、春木川の両岸には急峻な山地であり、降雨時に斜面崩壊、落石の危険性が大きいため、上流側の栃原堰堤では、タイマーを設定すれば、一定の時間間隔で自動的に採水できる「自動採水器」を設置して1時間おきの採水を行った（写真-5）。また、自動採水とバケツ採水（表面採水）の結果の相関性を確認することで、下流側の春木橋で同時に人力によるバケツ採水を行った。

代表出水時の自動採水とバケツ採水の結果比較を図-7に示す。この結果図によれば、自動採水とバケツ採水の土砂濃度はほぼ同様な結果を示しており、自動採水器の有効性が確認できた。

また、栃原砂防堰堤における自動採水による土砂濃度（●）と現地に設置した濁度計による計測結果（◇）の比較を図-8に示す。両者の間に大きな違いを示している。この原因を確認するため、同じ出水で自動採水した水サンプルを現地設置の濁度計で計測した結果（■）も同図に併記しており、出水時の濁度計による観測値とほ

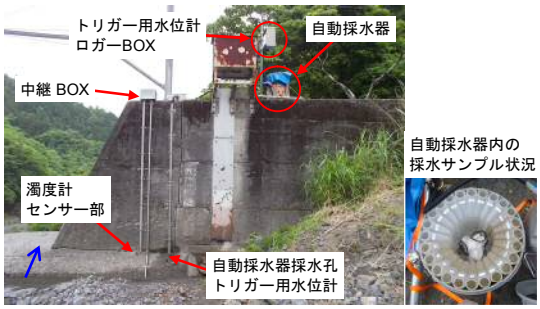


写真-5　自動採水器の設置状況

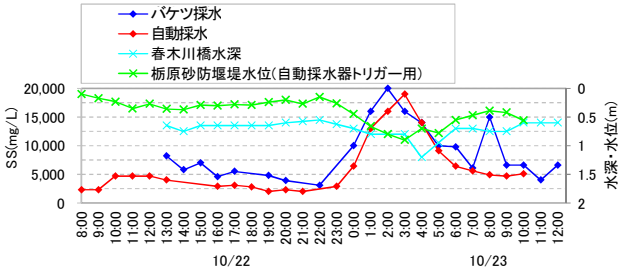


図-7　バケツ採水と自動採水の結果比較

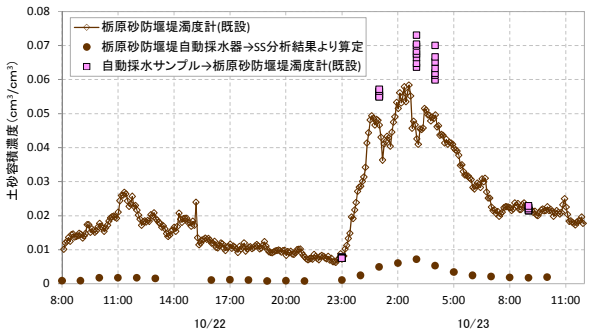


図-8　自動採水と濁度計観測値との結果比較

ぼ同等の結果を示していることから採水の分析結果と濁度計の観測結果による土砂濃度の違いは、濁度計観測データから土砂濃度を換算するためのキャリブレーションの不適によるものと考えられる。これにより、濁度計の観測データを用いて浮遊砂量を換算する場合には、正確なキャリブレーション式の設定が非常に重要であることが示された。

4. 主な成果及び課題と展望

2010年から流砂観測装置の設置、改善及び検証を継続的に実施され、これまでの調査・検討で得られた主な成果と今後の課題等を以下にまとめる。

(1) 主な成果

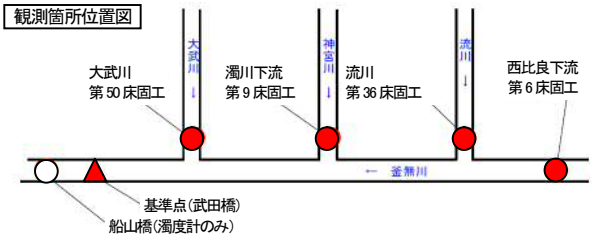
① パイプ型ハイドロフォンの検知可能な粒径は概ね2mm程度である。それより細かい粒径成分による観測精度への影響についてまだ不明である。

② ハイドロフォンと埋設式流砂捕捉装置の組合せで流砂観測を実施すれば、装置内堆積土砂の粒径分布を用いて補正することによって全流砂量の把握が可能と考えられる。

③ 上流域の急流河川区間では、出水時に水深方向の浮遊砂の濃度分布はほぼ同様である。

④ 濁度計の観測データによる浮遊砂を算出する場合にキャリブレーション式の精度確認が重要である。

⑤ 以上の検討結果等を踏まえて、ハイドロフォン等の観測データに基づき、出水ごとに観測箇所の通過土砂量が把握できる。その1例を図-9に示す。



観測箇所	流域面積 (km^2)	掃流砂 Vb (m^3)	浮遊砂 Vsp (m^3)	比率 (Vsp/Vb)	総流出土砂量 Vt (Vb+Vsp)
西比良下流第6床固工	82.3	61.1	20712.3	338.8	20773.4
流川第36床固工	9.5	2081.4	16712.4	8	18793.8
濁川下流第9床固工	18.5	1785.9	211489.7	12	213275.6
大武川第50床固工	70.8	689.6	4862.2	7.1	5551.8

図-9 各支川の土砂流出量（2017.10.22出水）

また、大武川第50床固観測所について、年間通過土砂量と上位5出水、10出水の観測値の関係を整理してものを表-2に示す。通年の、下流への供給土砂量はほぼ上位5出水で支配される（9割以上）と考えられる。つまり、主要出水時の流砂量を観測すれば、流域の土砂動態をほぼ把握できると考える。

表-2 通年土砂量と主要出水通過土砂量の関係

	単位幅掃流砂量(m^3/年/m)			割　合	
	通　年	上位５位	上位 10 位	上位５位/通年	上位 10 位/通年
2013	14.50	14.25		0.98	
2014	1.07	0.97	1.04	0.90	0.97
2015	1.75	1.64		0.94	
2016	0.50	0.50		1.00	

※大武川第 50 床固右岸データ

(2) 今後の課題と展望

① 現在は、各観測地点のデータは月2回で人力により行うため、多大な時間と労力がかかる。このため、今後は観測データを無線また光ファイバーを利用して自動的に事務所へ送信可能なハード整備を行い、できるだけ負担がかからないようにシステム構築の検討を行う。

② 富士川砂防事務所管内では、2010年から流砂量観測を開始し、これまで多くのデータ蓄積と知見が得ているが、いまだにハイドロフォンや濁度計等の観測結果だけでは上流からの流下土砂量を精度よく把握することは困難である。また、近年の研究では流砂量観測データによる土砂災害監視の可能性も確認されている。これらを踏まえて、富士川砂防事務所では、今後、良質な観測データを蓄積するとともに、流域の土砂移動状況の観測精度の向上及び観測結果を地域土砂災害の予測及び防災警報発令の指標としての活用方法等について検討していきたいと考える。