

三峰川流域における土砂の生産と 流出に関する観測

FIELD OBSERVATION ON THE SEDIMENT YIELD AND RUNOFF IN THE MIBU RIVER BASIN

中川 一¹・角 哲也²・三好岩生³・高濱淳一郎⁴・里深好文⁵・横森源治⁶
Hajime NAKAGAWA, Tetsuya SUMI, Iwao MIYOSHI, Jun-ichiro TAKAHAMA,
Yoshifumi SATOFUKA and Motoharu YOKOMORI

¹正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

²正会員 工博 京都大学助教授 大学院工学研究科 (〒606-0012 京都市左京区吉田本町)

³農修 京都府立大学助手 農学部森林科学科 (〒606-8522 京都市左京区下鴨半木町)

⁴正会員 工博 岐阜大学助手 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

⁵正会員 工博 京都大学助手 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁶工修 国土交通省中部地方整備局三峰川総合開発工事事務所 所長
(〒396-0402 長野県上伊那郡長谷村大字溝口1527)

In this paper, the results obtained at present in the cooperative research projects between JSCE and the Ministry of Land Infrastructure and Transport on the "Observation and Evaluation of the Sediment Yield and Its Amount" are shown. Firstly, development of a new suspended-sediment concentration measuring system with a differential pressure transmitter is introduced and the results of the field experiments at the Miwa reservoir, situated on the lower reach of the Mibu River, are shown. Secondly, classification of the sediment yield and the characteristics of the sediment diameter in the Todai basin, that is one of the sub-basins where the sediment yield is very severe in the Mibu River basin, are presented originated in the field investigation. Finally, by investigating the vertical distribution of sediment diameter in the sabo dam in the Todai basin, the sediment was found to be armored remarkably in the vertical direction about twice as deep as the maximum sediment diameter on the riverbed surface.

Key Words : sediment yield, sediment runoff, sediment diameter, differential pressure transmitter, Mibu River, Todai, River

1. はじめに

本論文は平成12年度から3年間の予定で行われている土木学会共同研究「土砂生産と生産量の観測と評価」において得られた成果を取り纏めたものである。天竜川水系三峰川の美和ダムにおいては、豪雨に伴う大規模な土砂の流入により、顕著なダム堆砂が生じており、現在、その抜本的な対策としてバイパストンネルの建設が進められているところである。ところで、このようなシステムを有効に機能させるためには、長期にわたる土砂流入量の予測のみならず、一つの降雨イベントにおける流入土砂の質と量が予測できることが望ましい。しかしながら、山地流域においては土砂生産量に強く依存した土砂

流出が生じること、雨に対応した土砂生産の予測が困難であること、土砂生産に関係する情報そのものが少ないこと等の理由で、現時点では十分な精度での土砂流入予測は行えない段階にある。そこで、河川管理者と大学研究者が共同で三峰川流域における土砂の生産とその流出に関する研究を行うこととなった。

研究はいくつかのサブテーマに分かれており、その内容は、①三峰川の支川である戸台川における土砂生産と移動の実態に関する調査、②戸台川にある砂防ダム堆砂域における河床砂の粒度分布に関する現地調査、③差圧センサーを用いた浮遊砂濃度計測システムの開発、④戸台川流域における土砂流出予測モデルの構築、となっている。本論文ではサブテーマごとに現時点までに得られている研究成果を順次示すこととする。

2. 差圧計を用いた浮遊砂濃度計測システムの開発

河川やダム貯水池において、ウォッシュロードと呼ばれる微細土砂濃度を把握する方法としては、濁度計による連続観測と採水分析を併用するのが一般的である。しかしながら、濁度計は光学的手法であることから長期安定性に課題があり、一方、採水分析は、手間がかかる上に、小流域では短時間で到達する洪水ピークを逃さずに採水を行うことが難しいのが現状である。光学的手法による濁度測定は、近年の技術改良により長期安定性は向上しているものの、年間の土砂流入量の大半を占める大洪水時や、近年注目されるダム排砂時などに発生する極めて高濃度の浮遊砂濃度を測定することには限界がある。

そこで、このような問題の解決を目的として、従来の光学的手法によらず、差圧センサーによって流体中の密度を直接測定することにより浮遊砂濃度を計測する手法を開発した。この手法は、連続測定が可能で、差圧測定であるが故に高濃度の方がより測定が容易となることを特徴としている。そこで、この計測システムの基本性能を把握するために、天竜川水系美和ダム貯水池を対象としたフィールド試験を行い、洪水時の高濃度の土砂流入状況の観測により、その実用性が確認された。

(1) 計測手法

a) 測定対象

本研究で対象とするのは、粒径0.1～0.2mm以下のウォッシュロードである。その濃度は、通常、浮遊物質濃度（SS：単位 mg/l）と表記されているので、以下、SSで統一する。SSの測定には、高濃度では100,000mg/l以上、低濃度では100mg/l以下の計測レベルが要求されている。すなわち山地河川の大出水時やダム排砂時に発生するSSの最大値が数1,000～100,000mg/l以上といわれる一方、水力発電所の取水口などで要求される検出SS濃度は50mg/l以下と低濃度であり、このような幅広い濃度レンジに適用可能な測定法の開発を行う必要がある。

b) 測定原理

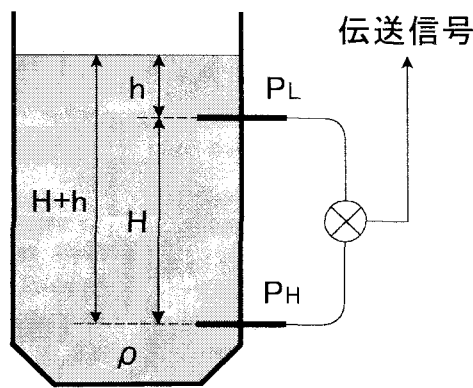


図-1 測定原理

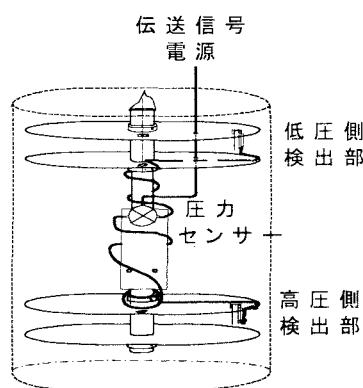


図-2 計測システム模式図

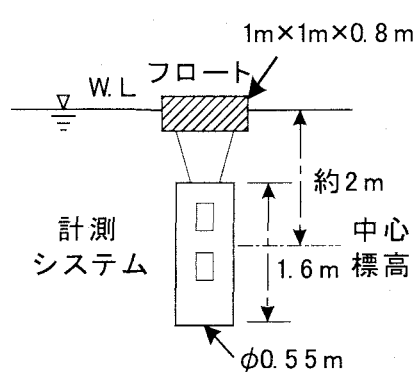


図-3 水中設置式模式図

流水中に浮遊砂が含まれる水と含まれない水では密度が異なる。液体の濃度測定手法には種々のものがあるが、ここでは図-1に示すように流体中に間隔 H を一定に保った2つの固定基準点を設け、これらの圧力（ P_H ：高圧側、 P_L ：低圧側）を検出して密度測定を行う。

いま、平均密度を ρ 、重力加速度を g 、高圧側、低圧側検出口付近の流速をそれぞれ V_H, V_L とすれば、Bernoulliの定理より

$$P_H / \rho g + V_H^2 / 2g = P_L / \rho g + H + V_L^2 / 2g \quad (1)$$

であり、これより圧力差 ΔP は

$$\Delta P = P_H - P_L = \rho g H + \rho (V_L^2 - V_H^2) / 2 \quad (2)$$

となる。

いま、 $V_H = V_L$ とすれば、

$$\Delta P = P_H - P_L = \rho g H \quad (3)$$

となり、 g, H が既知であることより、圧力差 ΔP が求められ、平均密度 ρ およびSS濃度が求まる。

c) 計測システム

図-2に計測システムを示す。装置中心の円形のものが差圧センサーであり、 $H = 1,000\text{mm}$ の間隔で上下に設置された2つの圧力検出口は細管で接続されている。

次に、計測システムに測定対象となる微細土砂を含む水をいかに導くかが重要である。最も単純なのは、計測システムごと測定対象となる水中に入れてしまうことであり、ここでは水中設置式と呼んでいる。

この方式は、図-3に示すように上部に設置したフロートに計測システム全体を吊り下げる構造であり、構造および維持管理が簡単であることが長所である。一方、短所としては、計測中は計測システム本体が常時水中に入っている必要があるため、少なくとも常時2.5～3.0m程度以上の水深が確保される必要があることや、本体が流水中にさらされることから、高圧側、低圧側検出口付近の流速に偏りが生じた場合に誤差を生む可能性があること、また、砂礫や流木の衝突による損傷の危険性があることがあげられる。そこで、今回のフィールド試験に

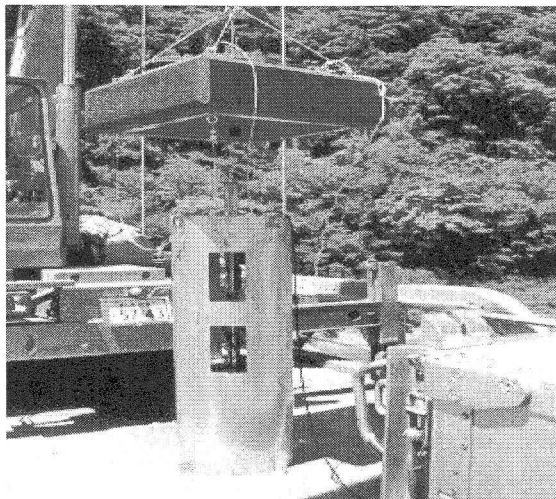


図-4 水中設置式システム全景

においては、計測システム全体を円筒形のシェルで包み込むことでこれらの問題を解決した。

この水中設置式は、ダム貯水池のように一定以上の水深が常時確保されている場合に最適であり、天竜川美和ダム貯水池におけるフィールド試験もこの方式で行っている。図-4は、計測システムの全景を示し、上部がフロート、また、下部に吊り下げられたものが外殻となるシェル構造のシリンダーを示し、内部に計測システム本体が格納されている。

(2) 美和ダムにおけるフィールド試験

a) 試験概要

美和ダム貯水池は、経年堆砂の進行を抜本的に改善するために、排砂バイパストンネルの建設が再開発事業として進められており、特に、洪水時に貯水池に流入する土砂に占める浮遊砂の割合が大きいことで知られている。

計測システムの設置地点は、装置本体を水浸させるのに十分な水深を常時確保可能であることと、フロートを係留する施設があることを条件に、図-5に示す貯水池中流部の神田橋付近を選定した。この地点は、図に示すように貯水池内の堆砂肩より上流であり、洪水時に水深5～6m程度確保される場所である。

b) 計測結果

本システムの計測は、平成12年8月から開始しており、平成13年の洪水期には、台風11号（8月21～22日）および台風15号（9月10～11日）に伴う出水が発生し、データが取得された。

図-6に一例として台風15号における計測結果を示す。計測は1秒間隔で行っており、60個平均で1分データを算出し、さらにその60個平均で1時間データにしたものを図ではプロットしている。今回の洪水は最大流入量が

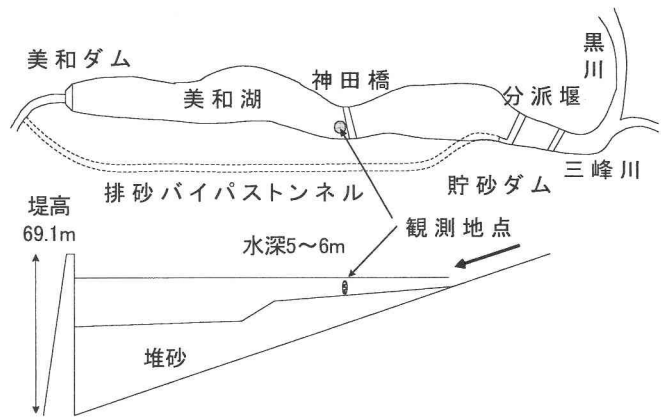


図-5 フィールド試験地（美和ダム）

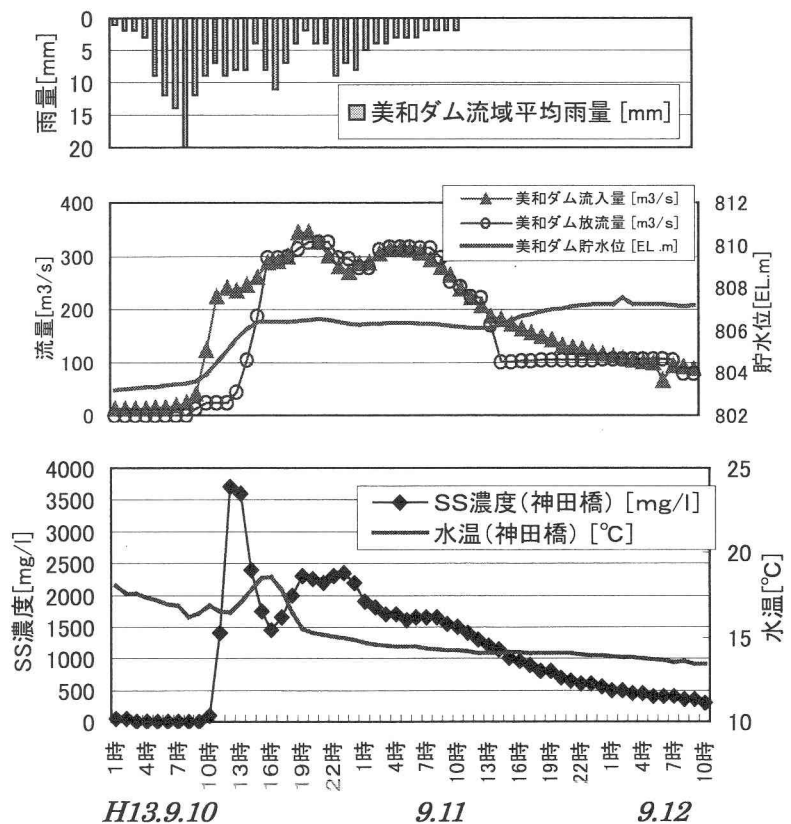


図-6 フィールド試験結果（H13台風15号）

300m³/sを超える規模であり、SS濃度も2時間余りの間に最高3,700mg/lまで上昇の様子が捉えられた。

c) 今後の課題

差圧センサーを用いた浮遊砂土砂濃度計測システムを用いて、洪水時の高濃度の土砂流入をピークを含めて連続的に計測し、その実用性について確認することができた。今後は、引き続き貯水池内での観測を継続するとともに、本システムの特徴である「高濃度測定」についても現地実験を試みる予定である。

3. 戸台川流域における土砂生産形態と粒径特性

三峰川流域のうち戸台川流域を重点検討流域として採り上げ、土砂移動の実態に関する検討を行った。その成果は以下の通りである。

(1) 戸合川流域における土砂移動の特徴

戸合川は三峰川右支川である黒川の一支川である。その流域面積は30.8km²であり、美和ダムの集水面積311.1km²の約一割を占める。標高は990m～3032mで、標高差が2000mを越える山岳性の流域であり、美和ダムへ流入する土砂の主な生産源の一つと考えられる。戸台川流域の地質は上流側から砂岩、石灰岩、チャートである。

この流域における土砂移動の特徴を明らかにするため、現地踏査をおこなった。その結果、各小流域からの土砂移動の特徴を規定する要因として、以下のような事項が考えられた。

a) 氷河地形・周氷河地形の影響

戸合川流域の最上流部に位置する藪沢流域には、その水源域においてカール・モレーンなどの氷河地形が見られる他、戸台川本川への合流部付近には幅約1km、長さ約2km、厚さ数100mにおよぶアウトウォッシュ堆積物がある。また、比較的高標高地にある大きな支流流域の中腹付近には、周氷河地形であるソリフラクションによる岩海が広がっている。アウトウォッシュ堆積物は、それ自体が流路脇に不安定な斜面を形成しており、大規模な土砂生産源となる可能性が考えられた。一方、ソリフラクションによる岩海は、その部分において流水がほとんど伏流するために、その上部で移動を開始した土砂を支流流域内でとどめてしまう効果が考えられた。

b) 地質の影響

砂岩地帯においては、上部が高標高地に位置するため、前述のような氷河地形の影響を受けるところが多々見られたが、風化土層が発達しているところでは比較的粒径の小さい土砂材料が厚く堆積し、豪雨時に土石流となって流下することが考えられた。石灰岩地帯では、地形が急峻なこともあって母岩から剥離するようにして生産された土砂の移動が恒常的に見られ、豪雨時には急崖の下部に堆積していた土砂が土石流となって流下する移動形態が考えられた。チャート地帯においては山腹斜面内の風化あるいは半風化状態の堆積物が比較的厚い表土層を形成しており、大規模な土砂移動を誘発しやすい傾向にある。ただし、谷の出口等に緩勾配部があるため、かなりの土砂がこの領域に堆積すると考えられる。

c) 地形の影響

比較的流域面積が小さくて起伏量の大きい小流域や、数百年以上前に発生したと思われる大規模崩壊の堆積や氷河地形などの影響によって小流域内に緩勾配部がある場合には、緩勾配部に土砂が貯留される傾向が見られた。

(2) 土砂収支

三峰川流域は昭和57年の豪雨によって著しく荒廃し、大規模な土砂の流出が生じた。この昭和57年災害時の調査報告書と現地踏査の結果から、戸合川本川を囲む各小流域毎の移動土砂量と末端での堆積土砂量、およびそれらと地形・地質条件などとの関係について検討した。その結果、昭和57年災害時に戸台川流域の小流域内から移動・流下を開始した土砂量は計約31万m³であり、これは同じ時に残流域の斜面から溪岸崩壊などによって生産された土砂量約2万m³に較べて圧倒的に大きい。ただし、小流域内で移動を開始した土砂がそのまま全て本川に流入するわけではなく、小流域の末端(本川への合流部直上部)には顕著な土砂の堆積が認められる。今年度の現地踏査において、植生指標などを用いてその土量を見積もった結果、堆積土砂量は移動を開始した土砂量に較べて決して小さくないことがわかった。表-1は各小流域毎にs57災時の土砂移動状況について整理したものである。小流域の末端に堆積した土砂量は合計約11万m³と見積もられ、小流域で移動を開始した土砂量からこの土砂量を引いた分が本川へ流入したと考えると、本川流入土砂量は約20万m³となる。

また、小流域から戸台川へ流入する土砂だけではなく、戸台川の河道内に蓄積(堆積)されていた不安定土砂についても重視する必要がある。現地での聞き取り調査で、「s57災時に丹溪山荘付近(藪沢が戸合川本川に合流する地点)にあった山が二つ流された。」という証言を得た。これは、戸合川河道あるいはその近傍に藪沢上流部からもたらされたアウトウォッシュ堆積物のことと思われる。戸台川の河道内部において土砂生産があったことを示すものであろう。現在でもその付近にいくつかの凸地形が残されており、今後の豪雨によってもこれらの凸部における侵食や流動化の可能性が考えられる。

(3) 粒径特性

戸合川流域内各地の表土の粒径分布を調べるために、山腹、あるいは堆積土の代表的な断面を50cm程度掘り下げて、そこからさらに50cm四方の面積内を約30cm程度掘り下げて土砂を採取した。図-7～図-9には粒度分布に関する観測結果を示している。これらを見ると、地質による粒径分布の差は小さく、また、地山と堆積物の間にもあまり差が見られないことが分かる。また、ほとんどの場合に1cm以下の成分が50%程度含まれており、流下過程における破碎も考えると下流に多くのウォッシュロード成分が流下することも理解される。

表-1 各小流域における土砂動態

流域No	57年災移動土砂量(m³)	末端堆積土砂量(m³)	移動量-堆積量(m³)	面積(km²)	地質
R-01	846	0	846	0.266	チャート
R-02	1365	338	1027	0.063	チャート
R-03	21177	3150	18027	0.529	チャート
R-04	389	0	389	0.126	チャート
L-01	2411	710	1701	0.272	チャート
L-02	0	4500	-4500	0.071	チャート
L-03	0	550	-550	0.077	チャート
L-04	3076	0	3076	0.233	チャート
L-05	0	0	0	0.115	チャート
R-05	30453	2625	27828	2.464	石灰岩
R-06	859	6400	-5541	0.144	石灰岩
R-07	332	2100	-1768	0.12	石灰岩
R-08	732	16800	-16068	0.327	石灰岩
R-09	2705	6400	-3695	1.142	石灰岩
L-06	0	3000	-3000	0.343	石灰岩
L-07	0	2625	-2625	0.12	石灰岩
L-08	2967	750	2217	0.534	石灰岩
L-09	1729	4700	-2971	0.395	石灰岩
L-10	4278	8000	-3722	0.485	石灰岩
L-11	9948	28375	-18427	1.081	石灰岩
R-10	188	0	188	0.229	砂岩
R-11	278	0	278	0.176	砂岩
R-12	31906	0	31906	0.475	砂岩
R-13	1269	100	1169	1.013	砂岩
R-14	21144	0	21144	1.794	砂岩
R-15	2295	0	2295	0.855	砂岩
R-16	73367	0	73367	4.061	砂岩
L-12	0	16380	-16380	0.087	砂岩
L-13	0	1500	-1500	0.053	砂岩
L-14	12817	0	12817	1.366	砂岩
L-15	0	1375	-1375	0.266	砂岩
L-16	0	0	0	0.392	砂岩
L-17	83869	0	83869	7.265	砂岩
合計	310400	110378	200022	26.939	

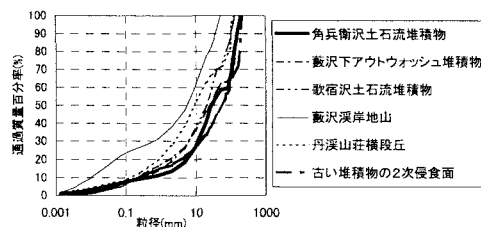


図-7 砂岩地帯における土砂の粒度分布

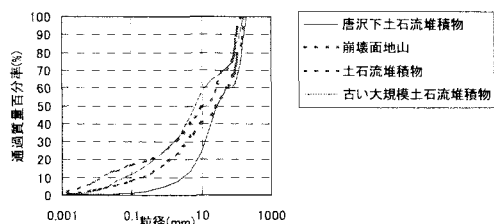


図-8 石灰岩地帯における土砂の粒度分布

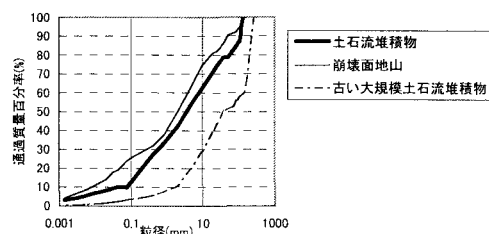


図-9 チャート地帯における土砂の粒度分布

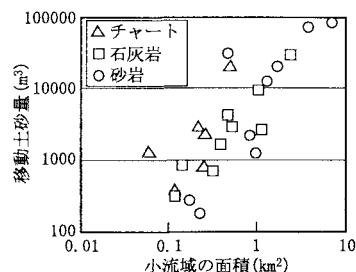


図-10 s57年災における移動土砂量と流域面積の関係

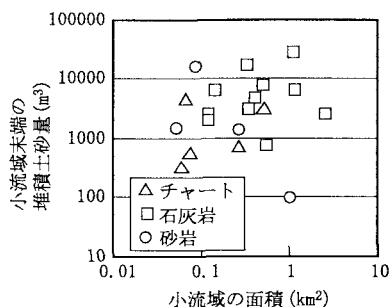


図-11 流域末端における堆積土砂量と流域面積

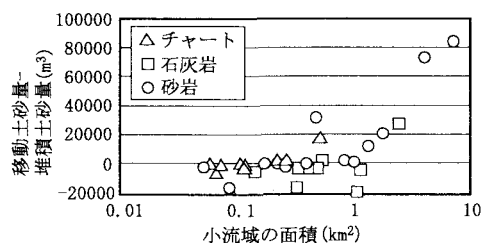


図-12 移動土砂量から堆積土砂量を差し引いた値と流域面積との関係

(4) 小流域別の土砂生産量の評価

戸台川流域における土砂生産に関する評価は、各小流域の特徴を十分に考慮しながら進める必要があると思われる。図-10、図-11は小流域毎に、s57災時の移動土砂量と今回の踏査で見積もった流域末端での堆積土砂量を流域面積に対して示したものである。これらの図を見ると、移動を開始する土砂量そのものは流域面積と強い相関が認められるが、小流域末端での堆積量は流域面積には無関係に散らばっていることが分かる。

図-12は小流域毎に、s57災時の生産土砂から末端での堆積土砂を差し引いた土砂量を示したものである。石灰岩地帯では災害時に生産された土砂が少ないにもかかわらず、小流域末端に多くの堆積がある。これは、石灰岩

の風化過程の特徴を表したもので、降雨にかかわらず恒常的に母岩から剥離するように生産された土砂が小流域末端まで流下するが、そこに比較的透水係数の高い堆積を作るためにそこから再移動しにくくなった結果と考えられる。チャート地帯ではかなりの土砂生産があるが、それに見合った堆積があり、結果として本川に流入する土砂量は少なくなると考えられる。これは、チャート地帯では一つ一つが比較的大規模なマスマーブメントとして土砂が小流域内を流下するため、勾配が急変する末端においてその駆動に必要な水の量が不足して大きな堆積を作るためと考えられる。砂岩地帯では流域内から大量の土砂が移動・流下し、末端での堆積も比較的少ないので、戸合川本川に大量の土砂を供給している。とくに、流域面積が0.2km²より大きい小流域における土砂は、その大半が本川にそのまま流下している。

4. 砂防ダム堆砂域の粒度分布に関する現地調査

美和ダムに流入する土砂を、量だけではなくその質（粒径分布や岩質）までも的確に予測するためには、上流域において生産される土砂の量と質を把握し、かつ、土砂が流出する経路における砂礫の分級過程を明らかにしなければならない。ことに流域内に砂防ダムが設置されている場合には、その上流域に土砂が堆積するため、土砂流出に大きな影響が現れることが考えられる。

著者らは混合砂礫の堆砂過程に関する数値シミュレーション法を既に構築しており、このモデルにより砂防ダム上流域における砂礫の分級を伴う堆積過程を再現できると考えている。しかしながら、砂防ダム堆砂域における粒度の鉛直分布に関する情報は乏しく、モデルの妥当性を検証するためのデータの収集が望まれていた。

そこで、戸台川流域にある戸台第1砂防ダムの堆砂域において河床の掘削を行い、堆積土砂の粒度分布特性を調べてみた。調査は砂防ダムから60m上流の地点（第1地点）と650m上流の地点（第2地点）および950m上流の地点（第3地点）において行われた。図-13には第1地点と第2地点における粒度分布の観測結果が深さごとに示されている。

第1地点では堆積土砂の粒径特性が鉛直方向に大きく変化していることが図からも明らかである。地表から深さ1mの範囲ではほぼ20cm間隔で層構造が見られ、直径10cm以上の大きな礫が含まれていた。それより深い部分では比較的粒径の小さい土砂が支配的であった。ことに、2mより深い部分では細砂やシルトが大量に堆積していた。図-13(a)の「底泥」はこのような細砂とシルトの混合物を指している。このような粒子は浮遊砂として輸送されてきたものが、砂防ダム上流に湛水域が形成されていたために沈降・堆積したものと考えられる。

第2地点では表面から深さ1mまでの範囲に直径50cm程

度の礫が数多く含まれているのに対し、それより深い領域ではほとんどそのような大きな粒子の存在は認められなかった。図-13(b)を見ても、表層だけがかなり粗粒化していることが明らかである。

従来、最大粒径程度の表層をはぎ取ってその下の材料をサンプルとして採取する方法がとられてきたが、今回の観測により、表層最大粒径の2倍程度の深さまで顕著に粗粒化していることが判明した。これは堆積過程における土砂輸送形態の変化によるものと考えられるが、砂防ダム堆積域以外においても同様の傾向があるとすれば、土砂サンプルの採取方法を今一度考える必要がある。

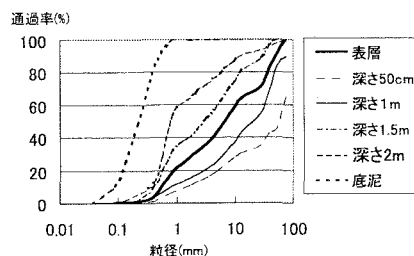


図-13(a) 第1地点における土砂の粒度分布

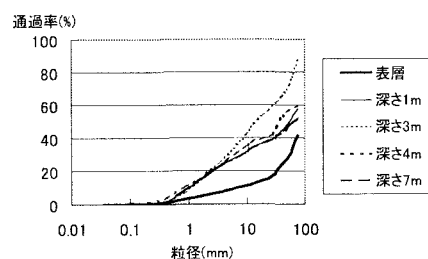


図-13(b) 第2地点における土砂の粒度分布

5. おわりに

本論文においては、高濃度の領域まで浮遊砂濃度を計測できるシステムが提案され、美和ダム貯水池におけるフィールド試験を通じて、その実用性が確かめられた。また、三峰川支川である戸台川流域における現地調査により、この流域の土砂移動の特徴が明らかになり、各支川から戸台川への土砂供給量が評価された。さらに、戸台川流域の砂防ダム堆砂を掘削することにより、堆積土砂の鉛直方向の粒度分布特性が明らかになった。

今後、得られた情報を基に土砂生産の質と量の予測手法を開発するとともに、空中写真を用いて河道内土砂移動特性を解明する予定である。

参考文献

- 1) 角 哲也・森田佐一郎・越智隆志・小宮秀昭：差圧測定による浮遊砂濃度計測システムの開発，ダム工学，11(3)，pp. 4-12，2001.
- 2) 角 哲也・森田佐一郎・越智隆志・小宮秀昭：差圧センサーを用いた河川・ダム貯水池における新しい浮遊砂濃度計測手法の開発，水工学論文集，第46巻，pp. 779-784，2002.

(2002. 4. 15 受付)