

◆特集：砂防・河川・海岸における土砂管理の取り組み◆

流砂系の総合的な土砂管理支援システムの開発

水野秀明* 小山内信智** 清水武志*** 稲村貴志****

1. はじめに

土砂は山腹斜面から溪流に入り、河川の中を流水によって運搬され、河口を通過し海域に到達する。その過程において、土砂移動はダム貯水池における堆砂を含めた河床上昇、河床低下、汀線の前進・後退といった地形の変化をもたらす。これらの地形の変化は貯水容量の低減、流下能力の低減、橋梁等の基礎部の不安定化、河口閉塞、越波量の増大、生態系の産卵場や利用場の消失など、防災・環境・利用上の問題を引き起こす。これらの問題を解消するための対策は、これまで土砂が移動する領域を砂防・ダム・河川・海岸に分割し、それぞれの領域でとられてきた。しかし、各領域だけの対応では限界があり、上下流一体となって取り組まなければならない問題が生じてきた。そのため、建設大臣（当時）が河川審議会に諮問し、河川審議会総合土砂管理小委員会から総合的な土砂管理の確立に向けた報告が出された¹⁾。なお、この総合的な土砂管理が必要となった背景については、参考文献²⁾に詳しく示されている。

流砂系における総合的な土砂管理はリスクマネジメントシステムのプロセスで考えると分かりやすい。方針は前述の河川審議会総合土砂管理小委員会の報告に示されているように、上下流一体となって取り組まなければならない防災・環境・利用上の問題を解消することである。第一のプロセスは計画の策定である。計画は、①顕在化している問題及び顕在化する可能性のある問題の分析、②各領域が連携して対策を取るべき問題を明らかにするための評価、③その問題に対する対策の選択、④その対策を実施するプログラムの作成から構成される。第二のプロセスでは、計画で作成したプログラムの実施である。第三のプロセスでは、プログラムの実施状況の監視・対策の効果評価、想定した効果が現れない場合には計画とプログラムの修正を行う。第四のプロセスでは、最高責任者がリスクマネジメントシステムの維持と適切性

及び有効性の改善を目的として、システムのレビューを行うことになる。従って、流砂系における総合的な土砂管理を確立するためには、第一から第四までのプロセスが機能するリスクマネジメントシステムのようなマネジメントシステムを構築しなければならない。本稿では、このマネジメントシステムを「流砂系の総合的な土砂管理支援システム」と呼ぶことにする。

砂防研究室では、上記のような考えのもとで流砂系の総合的な土砂管理支援システムに必要となる要素技術の開発を行ってきた。本稿では、総合的な土砂管理の考え方をレビューするとともに、土砂移動モニタリング技術や地形変化推定モデルといった技術開発の成果を報告する。

2. 総合的な土砂管理の考え方

流砂系の総合的な土砂管理支援システムは計画、実施、監視・評価・修正、レビューといった4つの過程から構成される。これらの過程の中でも特に重要となる計画についてみると、前述の計画①と②については、ダム貯水池における堆砂量の状況³⁾、河床低下・上昇の状況⁴⁾、海岸侵食の状況⁵⁾などが全国的に調べられており、問題を引き起こしている、あるいは、引き起こす可能性のある地形変化は各領域において把握されてきており、上下流一体となって取り組まなければならない問題も徐々に明確になりつつある。計画③では問題が解消するために必要となる流砂量あるいは漂砂量を設定した上で、対策を選択しなければならない。流砂量あるいは漂砂量の設定に際しては、問題が生じている箇所あるいは区間だけでなく、上下流の領域の土砂移動に及ぼす影響を考慮して、流砂系としての健全性が悪化しない対策を選択する必要がある。しかし、流砂系の健全性を評価する技術はこれまで開発が試みられてきた⁶⁾ものの、まだ途上であり、実際の現場に適用できる段階までに更に時間を要すると考えられる。計画④では、計画③で作成した対策の計画・設計を行うとともに、その対策の効果を監視する計画（土砂移動モニタリング計画）を作成する。

計画の中でも重要となる、流砂系全体としての健全性を評価する技術はまだ開発途上である。一方、黒部川流砂系では扇状地の河床低下に伴う護岸基礎の浮き上がりや海岸侵食による越波などといった問題を解消するために透過型砂防えん堤の設置やダム排砂を実施している事例⁷⁾、鳥取沿岸における総合的な土砂管理の事例⁸⁾等といったように、問題が顕在化した流砂系では、いくつかの領域が連携した土砂管理が実際に動き始めている。このような背景を考えると、当面は問題の生じている領域において土砂管理上の対策を、土砂移動に及ぼす影響を考慮しつつ講じることが現実的と考えられる。そこで、各領域が考えている土砂管理についてレビューする。

砂防の領域では、「平時の土砂の流出を阻害せず流下させ、災害を引き起こすような土砂流出時には、これをコントロールする」⁹⁾という考え方が示されている。最近では、災害を引き起こすような土砂流出時の対策、すなわち土砂災害対策は従来から砂防の根幹的目的として行われていることから、砂防の領域の土砂管理は平時の環境的な視点での議論に絞ったほうが分かりやすいという指摘¹⁰⁾もある。

ダムの領域では、「自然の土砂の流れに近い形でダムから下流に土砂を流す」⁷⁾という考え方が示されており、梅雨時等に生じる出・洪水時に排砂を行っているところもある。また、最近では、適切な運用を行えば、貯水池は土砂調節施設として大きな効果を発揮することが期待される¹¹⁾。

河川の領域では、構造物の安全性の低下、瀬・淵の規模や数の縮小に伴う水生生物相や現存量の減少といった河床低下や土砂流送量の減少に起因する問題を改善すること¹²⁾が目標として挙げられる。

海岸の領域では、「河川から海岸への土砂供給を確保し、沿岸漂砂を連続的にして、砂浜を回復する」¹³⁾という考え方が示されている。具体的には、目標とする海岸地形を決めて、それを維持するための必要計画流砂量を定める¹⁴⁾。目標とする海岸地形については、「現在の汀線を保全することを基本的な目標とし、必要な場合には、さらに汀線の回復を図る」こととされている。

当面の間は、基本的に、顕著な問題の生じている領域における土砂管理の考え方に沿って対策を講じることになる。その際、その対策が上下流の領域における土砂移動に及ぼす影響を流出解析、

河床変動計算、汀線変形モデルといった数値解析に基づいて推測し、防災上・環境上・利用上の条件が現状よりも悪くならないような対策を選択して実施することになる(計画③)。

3. 流砂系の総合的な土砂管理支援システムのための技術開発

流砂系の総合的な土砂管理支援システムを構築するための重要な技術は、対策の選択に必要な土砂移動を予知・予測する技術と、対策の効果評価を行うための土砂移動モニタリング技術である。これらの技術開発の成果を紹介する。

3.1 土砂移動の予知・予測技術

地形変化推定モデルは既往研究¹⁶⁾で示した通り、斜面部から溪流(河道部)へ降雨の流入を計算する部分(降雨流出解析)、溪流・河道部内の土砂移動を計算する部分(河床変動計算)、海岸域の土砂移動を計算する部分(海浜変形モデル)を組み合わせたものである。

降雨流出解析は、表面流をKinematic wave法(式(1)、(2))、中間流を連続式(式(3))とダルシー則(式(4))から計算した。

$$\frac{\partial h_A}{\partial t} + \frac{\partial q_A}{\partial x} = (r - f_1) \cos \theta_A \quad \dots (1)$$

$$q_A = (\sqrt{I_A} / N) \cdot h_A^{5/3} \quad \dots (2)$$

$$\lambda_{Bm} \frac{\partial h_{Bm}}{\partial t} + \frac{\partial q_{Bm}}{\partial x} = (f_m - f_{m+1}) \cos \theta_A \quad \dots (3)$$

$$q_{Bm} = k_m h_{Bm} S_m \quad \dots (4)$$

ここで、 h_A : 表面流の水深 [m]、 q_A : 表面流の単位幅流量 [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$]、 r : 降水量 [m/s]、 f_1 : 第1層への浸透能 [m/s]、 θ_A : 斜面勾配 [度]、 I_A : 斜面勾配 ($=\tan \theta_A$)、 N : 等価粗度係数 [s/m^3]、 t : 時間 [s]、 x : 距離 [m]、 λ_{Bm} : 第 m 土層内の有効間隙率、 h_{Bm} : 第 m 土層内の水深 [m]、 q_{Bm} : 第 m 土層内の単位幅流量 [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$]、 f_m : 第 m 土層の浸透能 [m/s]、 m : 斜面部の土層番号 ($=1, 2$)、 k_m : 第 m 土層内の透水係数 [m/s]、 S_m : 第 m 土層の動水勾配である。

河床変動計算は式(5)から(10)により計算した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial (uh)}{\partial x} = \frac{q_{AB}}{B} + r \cos \theta \quad \dots (5)$$

$$u = (1/n) I^{1/2} h^{2/3} \quad \dots (6)$$

$$B = 5\sqrt{Q} = 5\sqrt{Bu_h} \quad \dots (7)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad \dots (8)$$

$$Q_s = Q_B + Q_{SL} + Q_w \quad \dots (9)$$

$$Q_w = \begin{cases} -(1-\lambda)B P_w \cdot \partial z / \partial t & \partial z / \partial t \leq 0 \\ 0 & \partial z / \partial t > 0 \end{cases} \quad \dots (10)$$

ここで、 h : 水深 [m]、 B : 河幅 [m]、 u : 流速 [m/s]、 Q : 流量 [m³/s]、 q_{AB} : 当該河道部に隣接する斜面部からの単位幅流入流量 [m³/s/m]、 θ : 河床勾配 [度]、 n : マニングの粗度係数、 I : 河床勾配、 z : 河床位 [m]、 λ : 河道堆積物の間隙率、 Q_s : 全流砂量 [m³/s]、 Q_B : 掃流砂量 [m³/s]、 Q_{SL} : 浮遊砂量 [m³/s]、 Q_w : ウォッシュロード量 [m³/s] (ここでは粒径0.1mm以下の土砂)、 P_w : 河床材料に含まれるウォッシュロードになる土砂 (ここでは粒径0.1mm以下の土砂) の含有率とした。但し、河川区間での水位は式 (11)、(12) により求めた。

$$\frac{\partial (Bu_h)}{\partial x} = 0 \quad \dots (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2g} + h \cos \theta + z \right) + \frac{u_*^2}{gR} = 0 \quad \dots (12)$$

ここで、 g : 重力加速度 [m/s²]、 u_* : 摩擦速度 [m/s]、 R : 径深 [m] である。

海浜変形モデルには等深線変化モデルを用いた。等深線位置の変化は式 (13) により計算し、波浪変形は放物型波動方程式により計算した。

$$\frac{\partial x_k}{\partial t} + \frac{1}{D_k} \left(\frac{\partial Q_{ck}}{\partial y} - q_{ok} \right) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad \dots (13)$$

ここで、 x_k : k 番目の等深線位置 [m]、 Q_{ck} : k 番目の等深線の沿岸漂砂量 [m³/s]、 D_k : k 番目の等深線の漂砂の移動高さ [m]、 q_{ok} : k 番目の等深線における河川からの供給漂砂量 [m³/s]、 k : 等深線番号、 n : 等深線の本数である。 $\sum q_{ok}$ は河床変動計算モデルで算出された河口における Q_s のうち、海岸の地形変化に寄与する土砂量とした。

3.1.1 土砂収支の推定

地形変形推定モデルを安倍川流砂系に適用して、長期間の土砂収支の再現性を確認した。再現期間は1982年から2001年までの20年間とした。その他の計算条件は参考文献¹⁶⁾を参考としていただきたい。

図-1は安倍川流砂系の流域を分割した小流域を示したものである。

図-2は20年間の土砂移動量の年平均値で表わしたものである。計算結果と実績の土砂収支を比較したもので、20年間の年平均値として整理した

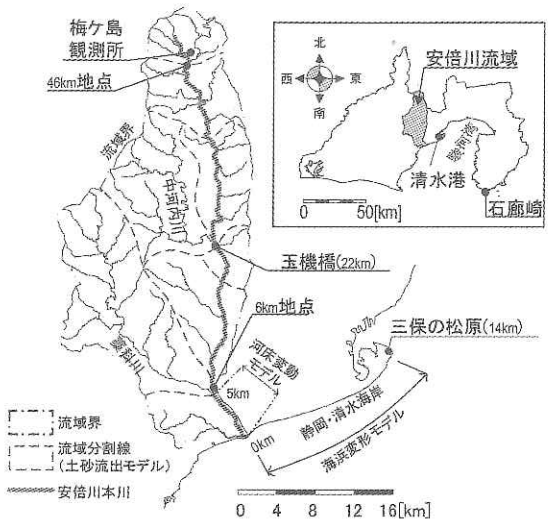


図-1 安倍川流砂系¹⁶⁾

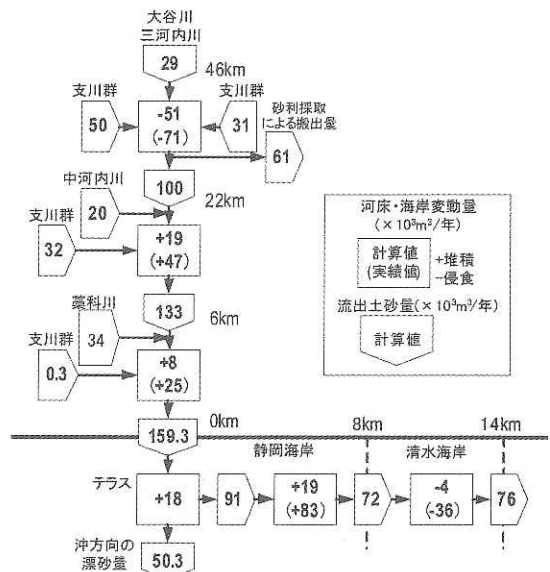


図-2 土砂収支推定例 (安倍川流砂系)¹⁶⁾

ものである。計算値は実績値と比べて、安倍川本川の0km～22kmの間では $45 \times 10^3 \text{m}^3/\text{年}$ 程度少ない堆積量で、22kmより上流域では $21 \times 10^3 \text{m}^3/\text{年}$ 程度少ない侵食量、静岡海岸では $64 \times 10^3 \text{m}^3/\text{年}$ 程度少ない堆積量、清水海岸では $32 \times 10^3 \text{m}^3/\text{年}$ 程度少ない侵食量であった。全体的に、変動量は少なく計算されているが、侵食や堆積といった傾向は再現できた。また、河川からの供給漂砂量のうち静岡・清水海岸の地形変化に寄与する土砂量（粒径0.1～10mm）の計算値 $91 \times 10^3 \text{m}^3/\text{年}$ は深淺測量データ等から算出した安倍川河口からの供給土砂量（約 $100 \times 10^3 \text{m}^3/\text{年}$ ¹⁷⁾）とほぼ整合する値であったことから、河口から流出する沿岸漂砂量を再現できた。

このように土砂移動の予知・予測技術は流砂系全体としてみると河床の侵食や堆積、等深線の前進や後退といった地形変化の傾向、地形の変化に伴う土砂の移動量を概ね再現できる精度であるといえる。しかし、局所的な地形の変化を推定する精度が低くなる場合もあった。例えば、安倍川本川34km～41.5kmの間では河床位の計算値が実績値に対して高くなった。この原因として、山地流域の支川の河道部における侵食可能深を深く設定（3m程度）したために多量の土砂が本川に流れ込んだこと等が考えられる。また、静岡・清水海岸では、水深の深い等深線の場合、計算値は実績の変動量よりも小さかった。これは、沿岸漂砂量の計算値が実際と比較して沿岸方向に変化しなかったためと考えられる。

3.1.2 流砂量の推定

次に、地形変形推定モデルを安倍川流砂系で平成16年9月7日から8日にかけて実施した土砂移動モニタリングに適用し、流砂量の再現性を確認した¹⁸⁾。なお、安倍川流砂系では海岸侵食に伴う問題が顕在化しており、海岸を構成する土砂の主な粒径が0.1mmから10mm程度であったので¹⁶⁾、山地部での土砂移動モニタリングでは主に浮遊形態の流砂を対象とした。その他の計算条件は参考文献¹⁶⁾、¹⁸⁾を参考としていただきたい。なお、流水の連続式と運動量方程式（式（5）、（6）、（7）、（11）、（12））は次に示す式に修正した。

$$\partial h / \partial t + \partial(Uh) / \partial x + \partial(Vh) / \partial y = -i_b \quad \dots (14)$$

$$\partial(Uh) / \partial t + \partial(U^2 h + 0.5gh^2) / \partial x + \partial(UVh) / \partial y$$

$$= -gh \cdot \partial z_b / \partial x - n^2 U \sqrt{U^2 + V^2} / h^{4/3} \quad \dots (15)$$

$$\partial(Vh) / \partial t + \partial(UVh) / \partial x + \partial(V^2 h + 0.5gh^2) / \partial y$$

$$= -gh \cdot \partial z_b / \partial y - n^2 V \sqrt{U^2 + V^2} / h^{4/3} \quad \dots (16)$$

$$\partial(C_i h) / \partial t + \partial(C_i U h) / \partial x + \partial(C_i V h) / \partial y$$

$$= -C_{*i} i_b \quad \dots (17)$$

$$\partial z_b / \partial t + (1/C_{*}) \cdot$$

$$\left\{ \partial q_{Bx} / \partial x + \partial q_{By} / \partial y + \sum_i (q_{sui} - q_{sdi}) \right\} = 0 \quad \dots (18)$$

$$i_b = \partial z_b / \partial t \quad \dots (19)$$

ここで、 U, V ：流速の X, Y 成分 [m/s]、 g ：重力加速度 [m/s²]、 C_i ：粒径階 i の土砂容積濃度（ $i=1, 2, 3, 4, 5$ ）、 C_{*i} ：堆積層中の粒径階 i の土砂容積濃度、 i_b ：堆積速度 [m/s]、 z_b ：河床位 [m]、 q_{Bx}, q_{By} ： x, y 方向の掃流砂量 [m³/s/m]、 q_{sui}, q_{sdi} ：浮遊砂の浮上量及び沈降量 [m³/s/m²]である。なお、掃流砂量は芦田・道上式で算出した。浮遊砂の浮上量は芦田・道上式（ $k_1=0.0042$ ）で算出した。浮遊砂の土砂容積濃度の鉛直分布は指数型とし、沈降量は沈降速度に基準面濃度をかけたものとした。

図-3は断面平均土砂容積濃度についての観測値と計測値を比較した事例で、河口から上流に22kmの地点（玉機橋）のものである。計算値は観測値の2倍程度大きくなったが、その時間変化はおおむね再現できた。このように土砂移動の予

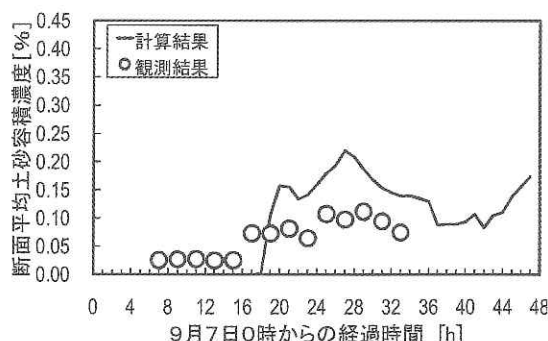


図-3 流砂量推定例（安倍川流砂系）

知・予測技術はある程度の精度で流砂量を推定できるといえる。

3.2 土砂移動モニタリング技術

流砂量観測装置は一般的に「観測機器」と「導流設備」または「誘導手段」から構成される。「観測機器」は水中の土砂量あるいは土砂容積濃度を計測するもので、常時、自動計測する「無人固定式」(例えば写真-1)、洪水時など一定期間流水中に固定し、流水を一旦採取し、その採取したサンプルを計測する「有人固定式」(例えば写真-2)、および、観測地点に観測機器を搬入し、洪水時など一定期間、流水を一旦採取し、その採取したサンプルを計測する「搬入式」(例えば写真-3)がある。「導流設備」は観測機器に流水を導く装置のことで、管、水路等がある。「搬入手段」は観測機器を流水内の所定の深さに固定する方法のことで、パワーショベル、棒、ワイヤー等がある⁶⁾。

土砂移動モニタリングの観測精度は観測機器が土砂を捕捉する効率によるところが大きい。そこで、水路実験により代表的な観測機器の捕捉効率を計測したところ、その捕捉効率は計測しようとしている土砂の粒径や流れの速度(流速)から影

響を受けることが分かった。その結果は参考文献⁶⁾を参考にさせていただきたいが、その結果に基づいて主な観測機器の適用範囲を図示すると、図-4のようになった。

図-5は観測機器として濁度計を用いて、流砂量を計測した事例である。このように無人固定式の観測機器を用いると、搬入式の観測機器では安全性の理由から計測が困難であったピーク流量時においても計測が可能であり、連続的に土砂移動を監視することができる。また、図-4に示した観測機器は秒単位といった短時間の流砂量を計測



写真-3 搬入式観測機器の例 (自吸式ポンプ)

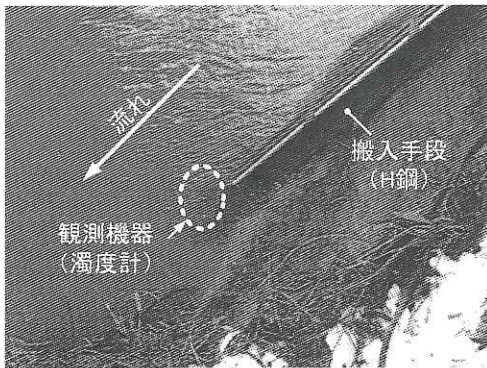


写真-1 無人固定式観測機器の例 (濁度計)

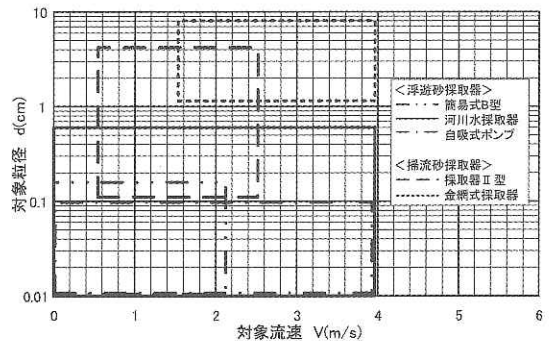


図-4 主な観測機器の適用範囲

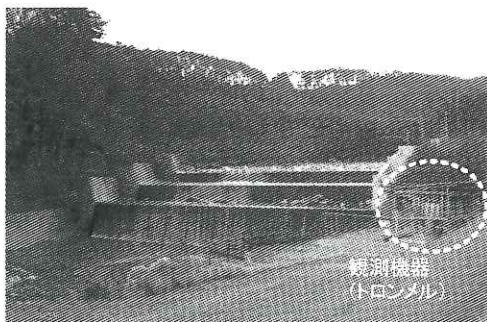


写真-2 有人固定式観測機器の例 (トロンメル)

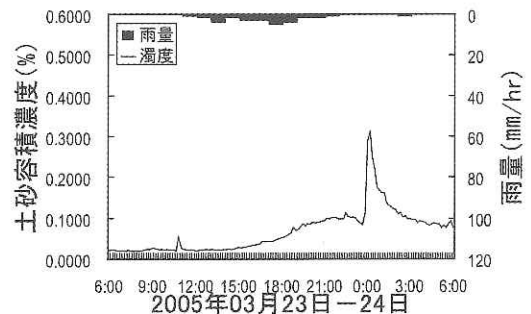


図-5 濁度計による計測例 (芋川) 20)

するためのものであったが、最近ではTime-integrated sampler¹⁹⁾のように月単位といった長期間の流砂量(総量)を計測する観測機器が開発されている。

土砂移動モニタリング計画を策定する際には、監視すべき土砂移動の質(粒径)とその継続期間を考慮し、前述のような観測機器の特性を踏まえて適切に策定する必要がある。

4. おわりに

これまでの研究では、流砂系の総合的な土砂管理を実施するために必要な技術の開発や流砂系における土砂移動実態の把握が精力的になされてきたため、流砂系の総合的な土砂管理支援システムといったような枠組みに関する研究が余り進んでこなかった。今後は、顕在化した問題を抱える流砂系を対象に具体的な計画の策定を通して、流砂系の総合的な土砂管理支援システムの構築手法を開発していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 建設省河川局砂防課：河川審議会「総合土砂管理小委員会」報告と今後の取り組みについて、河川、No.628, pp.6-7, 1998
- 2) 例えば、高橋 保：流砂系の総合的な土砂管理に向けて、河川、No.628, pp.3-5, 1998
- 3) 例えば、櫻井寿之、柏井条介、大黒真希：ダム貯水池の堆砂形態、土木技術資料45-3, pp.56-61, 2003
- 4) 例えば、高橋 保：流砂系の総合土砂管理、土砂流出現象と土砂害対策、近未来社, pp.359-398, 2006
- 5) 田中茂信、小荒井衛、深沢 満：地形図の比較による全国の海岸線変化、海岸工学論文集、第40巻, pp.416-420, 1993
- 6) 中野泰雄、杉浦信夫、網木亮介：健全な水循環系・流砂系の構築に関する研究、国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告第16号, 76pp., 2007
- 7) 金澤裕勝：総合的な土砂管理システムの確立を、季刊

河川レビュー, No.131, pp.80-84, 2005

- 8) 安本善征：鳥取沿岸の総合的な土砂管理ガイドライン、沿岸域学会誌, Vol.18, No.4, pp.3-6, 2006
- 9) 水山高久：姫川の大規模土砂流出と土砂管理、河川、No.628, pp.8-13, 1998
- 10) 水山高久：流砂系における土砂動態と土砂管理そして砂防、土木学会論文集No.754, II-66, pp.1-8, 2004
- 11) 柏井条介：総合土砂管理とダム貯水池の堆砂、ダム水理関係発表論文集資料-IV、土木研究所資料第3957号, pp.196-207, 2005
- 12) 福岡捷二：河道における土砂管理上の留意点、河川、No.628, pp.14-17, 1998
- 13) 磯部雅彦：総合的な土砂管理、沿岸域学会誌第19巻第1号, pp.34-35, 2006
- 14) 磯部雅彦：海岸環境と流砂系土砂管理、河川、No.628, pp.24-31, 1998
- 15) 鳥居謙一、山本幸次：海岸侵食対策の動向、土木技術、Vol.58, No.8, pp.76-86, 2003
- 16) 福嶋 彩、水野秀明、寺田秀樹：流砂系を一貫して扱う地形変化推定モデルの開発と安倍川流砂系への適用、土木技術資料46-2, pp.50-53, 2004
- 17) 国土交通省河川局砂防部保全課海岸室ほか：流砂系一貫の土砂管理による海岸保全計画に関する調査、土木技術資料, 44-4, pp.20-25, 2001
- 18) 水野秀明、小山内信智、福島 彩、原横利幸、西川友幸、高橋正行、加藤善明、村上正人：安倍川流砂系における土砂移動実態について、平成17年度砂防学会研究発表会概要集, pp.284-285, 2005
- 19) 小山内信智、水野秀明、沖中健起、原横利幸：Time-integrated samplerの浮遊砂採取効率に関する水路実験、国土技術政策総合研究所資料、第265号, 70pp., 2005
- 20) 水野秀明、小山内信智、林真一郎、沖中健起：緊急時における土砂災害リスク監視のための一手法、土木技術資料, Vol.48, No.8, pp.24-29, 2006

水野秀明*



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター砂防研究室主任研究官、農博
Hideaki MIZUNO

小山内信智**



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター砂防研究室長、農博
Nobutomo OSANAI

清水武志***



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター砂防研究室研究員
Takeshi SHIMIZU

稲村貴志****



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター砂防研究室交流研究員
Takashi INAMURA