

山地流域における土砂生産予測手法の研究

河川局砂防部砂防計画課

○独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム

北海道開発局建設部河川計画課

各地方整備局河川部河川計画課

内閣府沖縄総合事務局開発建設部河川課

1 はじめに

本課題は、砂防基本計画に必要となる短期、中・長期の基本生産土砂量について、実際の土砂移動現象を踏まえた物理的な土砂生産予測手法により、基本生産土砂量と土砂供給のタイミングを客観的・合理的に予測する手法を提案することを目標として、平成16年度から18年度を研究期間として実施されている。

平成16年度は、対象とする現象を特定するとともに、各現象に対する調査・観測手法を明らかにした。続いて平成17年度は、各現象の調査・観測地点を選定し、観測を行い、データの収集を行った。平成18年度は、生産土砂量推定手法の提案を行い、各観測結果からこれらの手法の再現性の検証を行うものとする。

2 生産土砂量の予測手法

2.1 研究であつかう土砂移動現象

生産土砂量予測手法を検討するため、まず土砂移動現象を、短期・中期・長期に分けて検討することとした。ここで短期とは計画規模の一連の降雨に対するもの、中期とは短期の降雨とともに発生する土砂量の影響期間（数年間程度）に対するもの、そして、長期とは短期・中期を除いた数十年間程度またはそれ以上の期間に該当する。その上で、短期に相当する土砂移動現象として、表層崩壊、中規模崩壊、大規模崩壊等の斜面崩壊（表-1）を、中

表-1 短期の土砂生産現象の分類







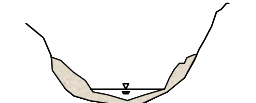
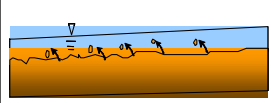


	表層崩壊	中規模崩壊	大規模崩壊
概要	表層の風化土層と基岩との間の面を境界として表土層が崩壊するものである。個々の規模は小さく、崩壊の深さも数10cm～2m程度であるが、発生数は多い。花崗岩地帯に多く、長さ、幅とも小規模で、表層土層も比較的薄い斜面であることが多い。	過去の土砂移動（崩壊、侵食、地すべり、火砕流等）の堆積物により形成された斜面や、基岩が認められないほど強度に風化が進行した斜面において発生する崩壊である。個々の規模は大きく、崩壊の深さも大きい。発生頻度は低い。	基岩内部で崩壊が発生するものである。個々の規模は極めて大きく崩壊の深さも大きい。発生頻度は低い。第三紀層、破砕帯等の堆積岩地帯に多く、長さ、幅の大きい斜面で発生することが多い。
模式図			
事例	 2003年 福島県太宰府市災害 御堂川支川	 2004年 青森県新居浜市 大生院の崩壊	 1997年 鹿児島県出水市針瀬川

表-2 中期・長期の土砂生産現象の分類

	渓岸・渓床侵食	表面侵食
概要	過去に大規模な斜面崩壊が発生し、河道に侵食を受けやすい堆積物が大量に堆積している溪流において、大規模な出水時に大きく進行する渓岸部、渓床部の侵食現象を対象とする。	表面流によって斜面表層の微細土砂が斜面から分離され、下方へ運搬される現象を対象とする。侵食深は一般に小さく、流送される土砂は微細であるが、降雨によって表面流が発生する度に発生する。
模式図		
事例	 富士川水系大春木川の渓床侵食	 三宅島火山灰の表面侵食

長期では溪床・溪岸侵食（表-2）を支配的な現象として、検討を進める。

以下に、各現象に対する生産土砂量推定手法について述べる。

2. 2. 1 表層崩壊による生産土砂量推定手法

表層崩壊による生産土砂量の推定は、浸透流解析と安定解析を用いて検討した。検討対象地（図-1）は、広島市の荒谷川支流（流域面積 0.18km^2 ）の斜面である。この斜面では、1999年に広島豪雨災害により、2箇所で崩壊が発生している（図-2）。

解析に先立ち、簡易貫入試験により、表層土厚の分布を把握し、計算メッシュは $5\times 5\text{m}$ で、作成した。次に、飽和・不飽和浸透流解析と、安定解析を逐次行った。安定解析は、表層崩壊を仮定した無限長斜面手法¹⁾を用いて行い、安全率 (F_s) が1以下となる範囲を求め、簡易貫入試験で求めた表層土厚を乗じて、生産土砂量を求めた。これらの解析には、土層厚、飽和透水係数、水分特性曲線、単位体積重量、粘着力 (C)、内部摩擦角 (ϕ)

等のパラメータが必要となる。これらのうち、安定度に大きく影響を与えるものは、 C である。さらに、降雨浸透による飽和度の変化により C は変化することから、2種類の C を用いて、 C の変化が生産土砂量の推定に与える影響を検討した。 C は、飽和度を変化させて一面せん断試験を行った結果から、(1) $C=7\text{kPa}$ 、(2) $C=3\text{kPa}$ と設定した。降雨波形は、対象地より北に 1.4km に位置する魚切ダムの1999年豪雨災害時の観測データを用いた。 F_s の計算結果を図-2に示す。図中に示す1999年の崩壊発生箇所と比較すると、実際の崩壊は、 $F_s<1$ のセルで発生している。 $F_s<1.0$ の全セルに対して土層厚を乗じ、生産土砂量は、(1) $5,892\text{m}^3$ 、(2) $11,308\text{m}^3$ という結果が得られた。これに対して、実際の崩壊土量は、2つ併せて 500m^3 程度であり、推定土量よりもかなり少ない。このように潜在的な崩壊の危険性のある箇所が一度に崩壊するのではなく、大きな降雨毎に一部が崩壊すると考えられるが、降雨等の条件次第では、一度に危険性のある部分が崩壊する事も考えられる。さらに、この検討では、 C の値により、生産土砂量が異なる結果となり、パラメータを精度良く推定する重要性が確認された。



図-1 荒谷川流域平面図

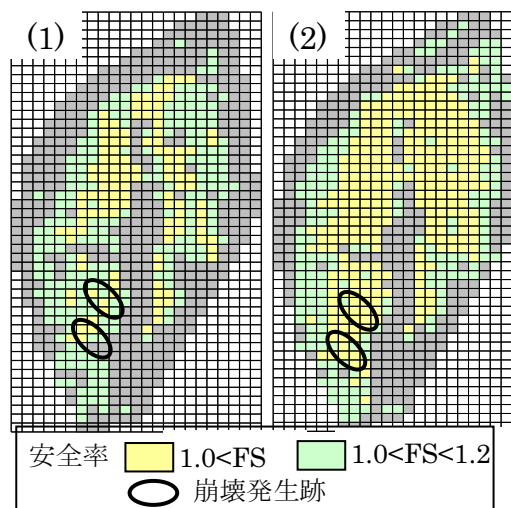


図-2 ピーク降雨時の安全率分布

(1) $c=7\text{kPa}$ (2) $c=3\text{kPa}$

一方で、この手法ではあくまでセルに対する危険度評価であり斜面全体が、一度に崩壊する規模の予測は難しい。また、安全率による危険度評価は計算によるものなので、実現象を本当に表現しているかは、安全率という相対的な数値で確認することになる。

一方、これらを踏まえ、土木研究所土砂管理研究グループで研究を進めている浸透流解析と有限要素法（FEM）を組み合わせ、飽和度の上昇による粘着力の低下の関係を反映できるモデルを紹介する。この解析手法は、降雨による飽和度の変化に伴う斜面変形を再現しようとするものである²⁾。本手法は、セルではなく、斜面全体を対象に崩壊につながる変形を指標に危険度を評価するものなので、実際の動きを確認できるという分かりやすさも特徴として有している。

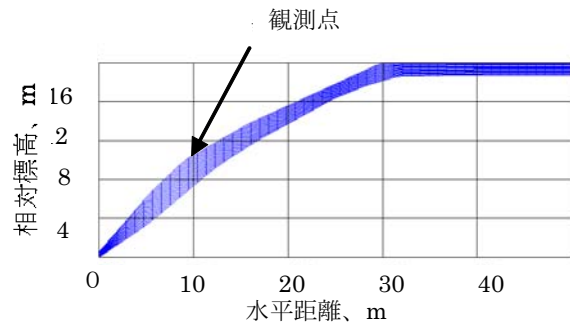


図-3 計算測線(濃色部が土層厚)

表-3 解析モデルパラメータ

土粒子密度	26.5 KN/m ³	λ	0.6
(1/G ₀)	0.035	μ	0.48
C _d	0.017	サクシヨンと粘着力	C(S)= 2.063*S ^{0.596} kPa
σ_{min}	98kPa	飽和透水係数 K _s	0.02084 (cm/sec)
C _c	0.073	水分特性モデル(バンゲヌヒテン)	$\alpha=0.0522, n=5.6784$
C _s	0.011	飽和体積含水率 θ_s	0.4

前ページと同じ流域内に、テンシオメータ及び伸縮計等を設置し、観測を行っている。ここでの観測値と計算結果を比較している。図-3 に、地盤モデルを示す。表層部（濃色部）を計算領域とし、表層下部は、変位及び水の出入りはないものとする。計算領域は要素 864、節点 792 に分割した。また、解析に用いたパラメータを表-3 に示す。

2006年6月から約1ヶ月間の降雨とテンシオメータの推移を図-4 に示す。この間の降雨は、累積雨量70~80mm前後の降雨が6回ほど記録されている。テンシオメータの記録では、全般に浅い方から浸透し、降雨のピーク直後に、急激にサクシヨンがゼロ付近（飽和状態）まで低下し、降雨がやむとサクシヨンが回復している。浸透速度は、深度20cmでは、降雨強度に比例した挙動が見られ、50cm以降の挙動は、深度に応じて遅くなっている傾向がみられる。なお、この程度の降雨では、斜面変位は

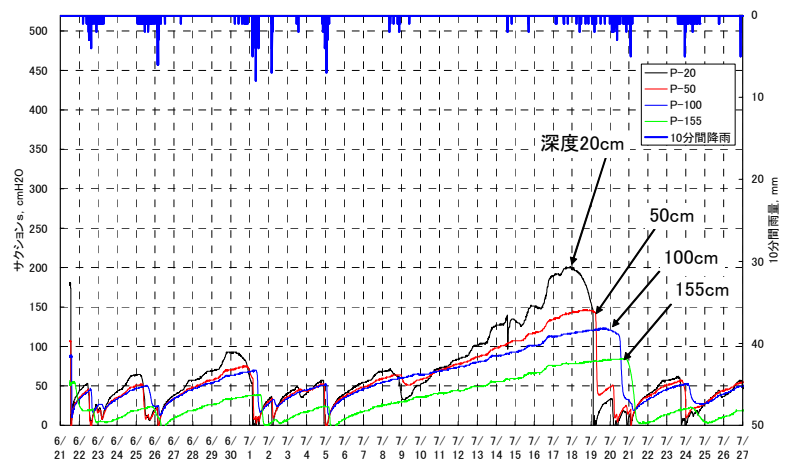


図-4 テンシオメータの挙動(2006年)

観測されなかった。

次に 2005 年 9 月の総雨量 236mm, 最大時間雨量 52mm を観測した降雨における伸縮計の観測結果とその再現計算結果を示す (図-5)。両者ともに, 9 月 6 日以前の降雨に対しては顕著な動きを示していないが, 9 月 6 日の降雨では, 伸張の変位速度が増加し, 降雨のピーク後は変位の増加は見られなくなり, 累積で 1.0mm の斜面下方への伸張変位が生じるなど, モデルの再現性が確認できた。

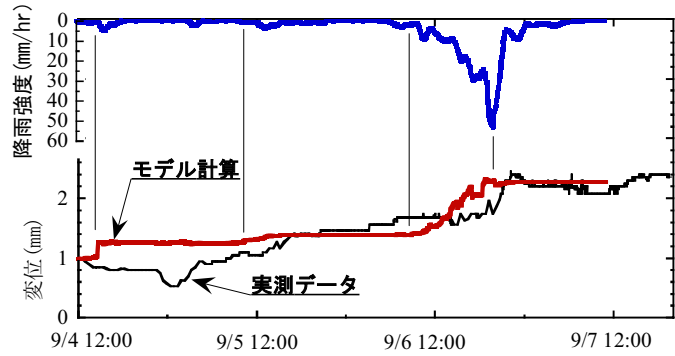


図-5 降雨時の伸縮計挙動と計算結果(2005 年 9 月)

以上より, ある程度の降雨があると, 表層斜面が飽和し, 変形が生じ始めることが分かった。今後は, 変位と崩壊のタイミングの関係を実測, 計算の両面から検討し, 変位の挙動を三次元的に計算から求めることができるのであれば, 生産土砂量の推定が可能になると考えられる。残念ながら, 今回は実際の崩壊を観測できなかつたために, これらは今後の課題であるが, 前兆現象の把握も含め, 微小な変位の把握が今後の崩壊や土砂生産の検討のキーワードと言える。

2. 2. 2 中・大規模崩壊による生産土砂量推定手法

中・大規模崩壊による生産土砂量についても, 浸透流解析と 3 次元安定解析を用いた手法を適用する。なお, 基礎式は紙面の関係上, 省略する。

検討は, 富士川水系早川の支川である春木川 (流域面積 20.9km²) で行った (図-6)。春木川

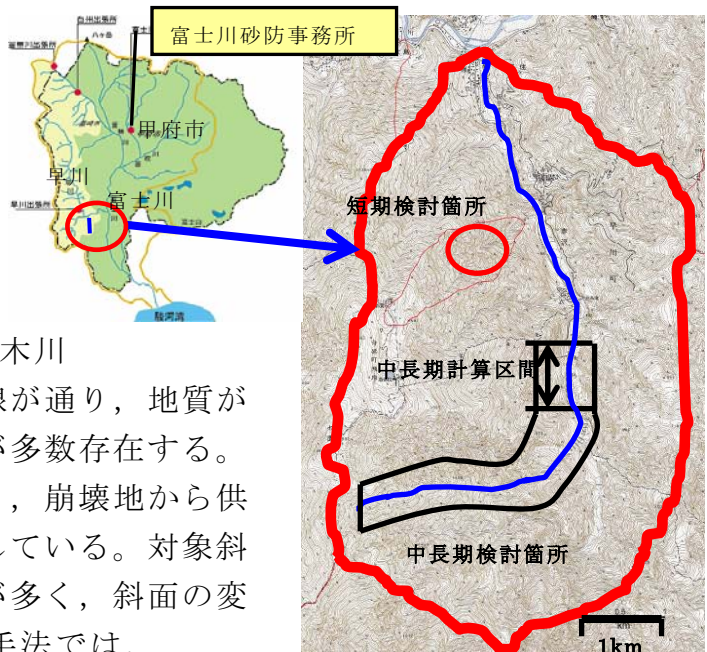


図-6 春木川位置図と検討箇所

は, 流域内を糸魚川-静岡構造線が通り, 地質が脆弱であり, 流域内には崩壊地が多数存在する。そのため, 土砂生産が活発であり, 崩壊地から供給された土砂が河道に厚く堆積している。対象斜面は, 流域の中でも特に崩壊地が多く, 斜面の変状が見られる箇所とした。この手法では, 崩壊箇所, 崩壊ブロックの抽出精度が生産土砂量に影響を与えるため, 崩壊箇所, ブロックを正確に抽出することが重要である。そこで, 物理探査と電気探査を行い, 5つの崩壊ブロックを特定した (図-7)。対象斜面の地質は, 斜面下部の頁岩に礫層が載る構造となっている。礫層部のブロックは①, ②, 頁岩部のブ

ックは③～⑤である。規模は①，②が斜面長 25, 30m, 幅 15m, 深さ 5m 程度、③～⑤は，斜面長 55m, 幅 20～25m, 深さ 10m である。3次元安定解析手法は，最も一般的な修正 Hovland 法³⁾を用いた。また降雨波形は，現場で計画に用いられる降雨(図-8)を用いた。

図-8に降雨にともなうブロック⑤の安全率の変化を示す。計算の結果，降雨量の増加に伴い，安全率は徐々に低下し，30時間を越えた時点でFs=1.00を下回る。同様にブロック④も安全率がFs=1.00を下回り，④，⑤合わせて約25,000m³の土砂が生産される結果となった。

以上の結果より，流域内の崩壊危険箇所とその崩壊面，計算に必要なパラメータが特定できると，本手法により，生産土砂量の推定ができる可能性がある。しかし，土砂生産のタイミングについては，特に崩壊深が深い場合，降雨ピークから遅れて発生することも考えられるため，実現象との整合について課題が残る。また，崩壊地と崩壊ブロックを精度良く抽出することが重要であることは先に述べたが，これについては，現在土木研究所で，中・大規模崩壊発生危険箇所抽出の参考になる手法を検討中である。以下に，その概要を示す。

2. 2. 3 中・大規模崩壊地抽出手法

検討を進めている「抽出手法案」は，既往の崩壊事例の地形・地質的な特徴に着目し，それらをまとめて抽出指標としている。その概要を図-9に示す⁴⁾。

抽出の手順は大きく2つに分かれている。第1段階は，地下水を多量に貯留する可能性のある区域という観点から，マクロな視点(縮尺 1/20万程度の調査スケール)で危険区域を抽出するもので，机上調査で行う。第2段階は，抽出された危険区域の中から，地下水の貯留・湧出や厚い土層厚の存在を示唆する地形や地質構造に着目して，より大縮尺(縮尺 1/2.5万程度の調査スケール)のミクロな視点で危険渓流を抽出するもので，机上調査の他，現地の地形・地質

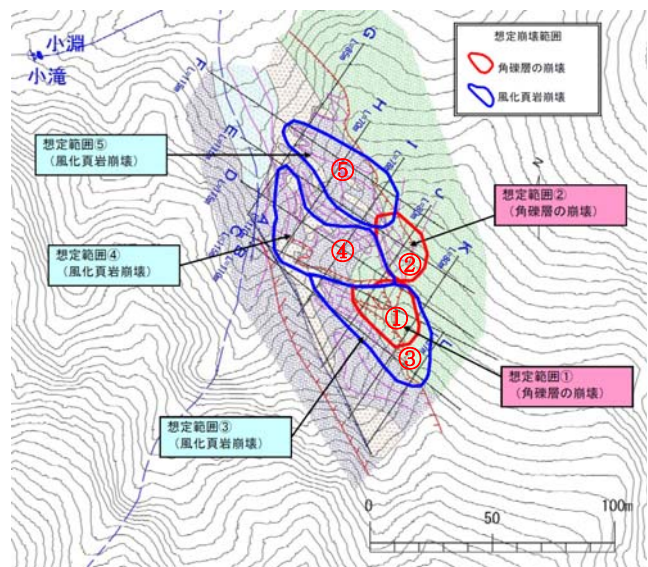


図-7 検討斜面の状況

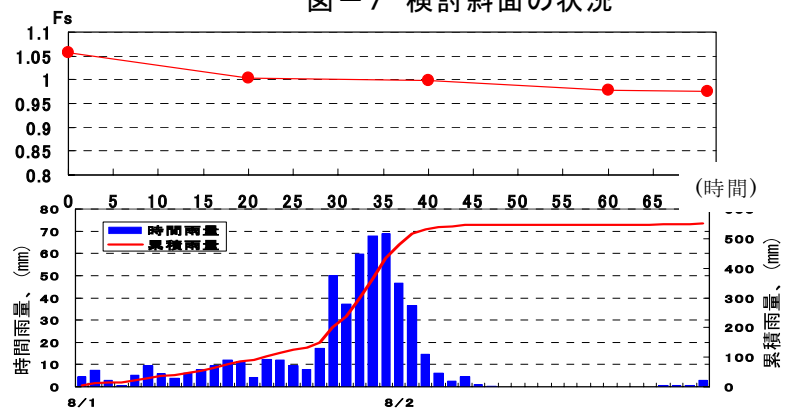


図-8 ブロック⑤の安全率変化の状況

調査及び水文調査が加わる。

「抽出手法案」に基づいて、2005年9月台風14号の豪雨で中・大規模の崩壊が多数発生した宮崎県鰐塚山周辺の流域に対して適用した結果を表-4に示す。

なお、第2段階の抽出には現地調査が含まれるが、ここでの適用は災害発生後に実施したもので、災害前の流域状況の把握は実施していないため、表-4ではB群の評価は省略した。

第1段階では、鰐塚山周辺は火山岩分布地域ではないが、明瞭なりニアメントや断層破砕帯の可能性が認められたので、マクロな危険区域の候補地域として抽出された。

第2段階では、崩壊の発生した各流域ともA群で3つの指標が該当しているので、深層崩壊のおそれのある溪流として抽出される素因を備えていることになる。C群では、空中写真判読結果から山頂緩斜面(小起伏面)と崖錐等の堆積物の2つの指標が認められ、机上調査のみからでも中・大規模崩壊の発生のおそれのある溪流として抽出された。

上記の結果から、抽出手法案により、中・大規模崩壊発生危険溪流の抽出の可能性が確認できたが、実用には、更なる実証が必要である。

一方、既往調査による $10^5 m^3$ オーダー以上の深層崩壊発生箇所は、特定の地域(火山地域、破砕帯地域など)にまとまっており、類型区分ができそうである。また、現時点では、崩壊発生箇所を対象とした抽出指標との関連性を考察したが、実際に

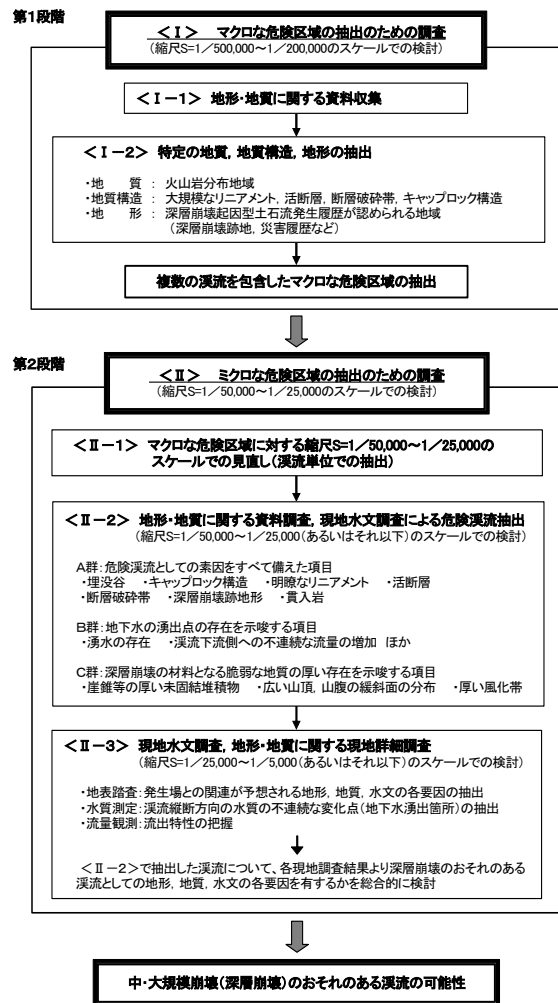


図-9 「抽出手法案」の概要

表-4 「抽出手法案」の適用結果

◎ マクロな危険区域の設定のための調査		◎ ミクロな危険区域の抽出のための調査 <II-2のみ>				
		抽出結果				
		別府田野川	片井野川	境川	七瀬谷川	
地質	火山岩分布地域	—	—	—	—	
	明瞭(大規模な)ニアメント	○	○	○	○	
	活断層	△	△	△	△	
地質構造	断層破砕帯	△	△	△	△	
	キャップブロック構造	▲	—	—	—	
	深層崩壊起因型土石流発生履歴が認められる地域(深層崩壊跡地、災害履歴など)	▲	—	—	—	
地形	水系網(流路を結んだ谷線部)	△	—	—	—	
	組織地形(ホッグバック、ケスタ、メサ)	▲	—	—	—	
	崖錐等の厚い未固結堆積物	△	△	△	△	
A群	埋没谷	—	—	—	—	
	キャップブロック構造	—	—	—	—	
	明瞭なりニアメント	○	○	○	○	
B群	活断層	—	—	—	—	
	断層破砕帯	△	△	△	△	
	深層崩壊跡地地形	○	○	○	○	
C群	貫入岩	—	—	—	—	
	崖錐等の厚い未固結堆積物	△	△	△	△	
	広い山頂、山腹の緩斜面の分布	○	○	○	○	
厚い風化帯		▲*	▲*	▲*	▲*	

【抽出結果】
 ○：ほぼ全域に該当する。
 △：対象流域の一部に該当する。
 ▲：この段階では判断が困難である。(あるいは、できない)。
 ▲*：現地調査による確認なしでは判断が困難である。(あるいは、できない)。
 —：該当項目ではない。

は崩壊の非発生箇所との比較も行い、抽出指標の優位性を確認する必要がある。

2. 2. 4 短期生産土砂量推定手法のまとめ

以上に短期の生産土砂量推定手法を示した。崩壊箇所と崩壊ブロック，また表層土厚や土質定数等のパラメータ等が推定できると，崩壊現象による短期の生産土砂量を物理的に予測できる可能性があると言える。但し，パラメータや崩壊ブロックの推定には，多大な労力を要することから，解析モデルだけではなく，これらの簡便な把握手法の開発も必要である。

2. 3 中長期の生産土砂量予測手法

中長期の対象とする溪岸・溪床侵食による生産土砂量は，河床変動計算を用いて，対象区間内の堆積・侵食の土砂収支を計算することにより，予測が可能である。的確な土砂量を求めるためには，地形，粒度分布といった初期条件，計算区間の境界に与える流量や土砂量等の条件（境界条件）を的確に推定し，計算を行う必要がある。このうち，粒度分布や流量は，現地調査や観測により，直接，精度の高いデータ収集が可能であるが，境界条件として与える土砂量については，直接的な計測が困難である。また，地形条件についても，源頭部は，地形が急峻であり，地上からの縦横断測量が困難である。そのため，今回の検討では，高精度の地形データの収集が可能であることから，近年使用実績が増えている航空レーザー測量により，2 時期の測量結果から求めた地表変動量により土砂移動量を求め，境界条件として与えることを検討した。以下にその結果を報告する。

2. 3. 1 検討対象地の状況

検討は，2.2.2 と同じ富士川水系早川の支川である春木川である（図-6）。このうち，中長期の生産土砂量の検討は，上流部の約 4km 区間を対象に行い，春木川第一～第二堰堤間の約 1km（河床勾配 1/13）では，上流部で行った航空レーザー測量から得られた変動土砂量を与えて，河床変動計算を行った（図-6）。

2. 3. 2 河床変動計算条件

河床変動計算は，一次元のモデルにより実施した。計算に用いる掃流砂量式は，芦田・高橋・水山式，浮遊砂量式は，芦田・道上式を適用する。なお，流れ，流砂量，河床変動を表す各基礎方程式については，紙面の関係上，省略する。溪岸侵食については，本検討では，通常の流水による侵食を想定していることから，側岸の限界掃流力と流砂量式から侵食される土砂量を求めて拡幅量を求める芦田・江頭・加本のモデル⁵⁾を使用した。

$$q_{p*} = \frac{q_p}{u_* d} = F_{0*} \tau_*^{1/2} \left[1 - \frac{1}{\varepsilon^2} \cdot \frac{\tau_{*sc}}{\tau_*} \right]^3 \left[\frac{h}{d} \cdot \frac{1}{\sin \theta_1} \right] \quad (1) \text{式}$$

ここに， q_{p*} ：無次元側岸侵食量， q_p ：単位河道長さ辺りの側岸侵食量， θ_1 ：側岸傾斜角， τ_* ：河床の無次元掃流力， h ：水深（本モデルでは河床の比高）， d ：

河床材料の平均粒径である。また、 $F_{0*} = 2(\kappa_2 / \kappa_3) \varepsilon^2 F_0$ であり、 F_0 は実験係数で $F_0 = 0.03 \sim 0.35$ 、 κ_2 、 κ_3 砂粒子の形状係数で、 $\kappa_2 = \pi/4$ 、 $\kappa_3 = \pi/6$ である。

ε^2 は側岸の無次元掃流力 τ_{*s} と河床の無次元掃流力 τ_* の関係を示す係数で $\tau_{*s} = \varepsilon^2 \tau_*$ と置かれ、 $\varepsilon^2 = 0.05$ 程度の値をとる。よって、 $F_0 = 0.03$ とすれば、 $F_{0*} = 0.02$ となる。さらに、 τ_{*sc} は側岸斜面における砂粒子の無次元限界掃流力であり次式で表される。

$$\tau_{*sc} = \tau_{*c} \cos \theta_1 \sqrt{1 - \left[\frac{\tan \theta_1}{\mu} \right]^2} \quad (2) \text{式}$$

ここに、 τ_{*c} : 河床の無次元限界掃流力、 μ : 砂粒子の内部摩擦係数である。

河道断面は、航空レーザー測量結果に基づき、50m 間隔で矩形断面を設定した。また、河床材料は、計算区間に堰堤の堆砂域が含まれるため、河床材料調査により、堰堤堆砂区間とそれ以外の区間に分けて、設定した(図-10)。

境界条件として与える土砂量は、二時期(2006年5月、11月)の航空レーザー測量から得られた地形変動量から求めた $21,431\text{m}^3$ を、計算区間の上流端から流砂量に応じて与えた(表-5)。

流量については、再現期間である2006年5月から11月までの実績降雨量を用いて、キネマティックウェーブ法により流出解析を行い、ハイドログラフを作成した(図-11)。なお、流量が小さい期間は河床変動が生じないため、計算を省略している。

2. 3. 3 検討結果

以上の条件から、2006年5月～11月の降雨を対象に、河床変動計算を実施した。この結果、計算区間の

河道内では約 7.3 千 m^3 の土砂が生産され、計算区間下端の春木川第一堰堤から、約 2.9 万 m^3 の土砂が流出する結果が得られた(表-5)。

航空レーザー測量による変動量も、これに近い約 2.4 万 m^3 の結果が得られた。また、河床変動計算と航空レーザー測量結果を比較すると(図-12)、河床変動

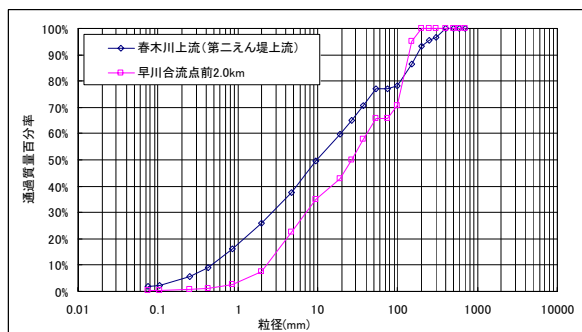


図-10 計算に用いる粒度分布

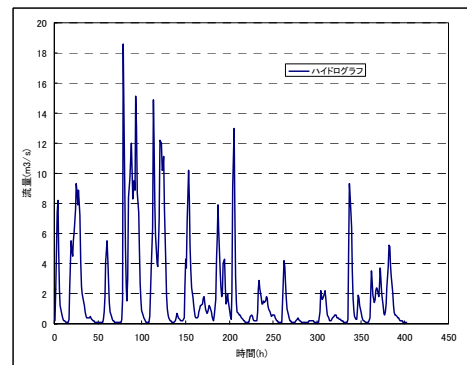


図-11 計算に用いるハイドログラフ

表-5 土砂収支計算結果(単位; m^3)

	計算区間上端に与える土砂量	河道内生産土砂量	春木川第一堰堤からの流出土砂量
河床変動計算	21,431	7,289	28,720
航空レーザー測量	21,431	2,700	24,131

が生じた箇所、変動量も、両者は同様の傾向を示している。しかし、計算区間上下流端は、航空レーザー測量の結果とは逆の傾向を示している。これは、上流端は境界条件の影響、また下流端は、計算結果の方が生産土砂量が多いことから、下流端付近で堆積の傾向が実際より、強く現れたためと考えられる。

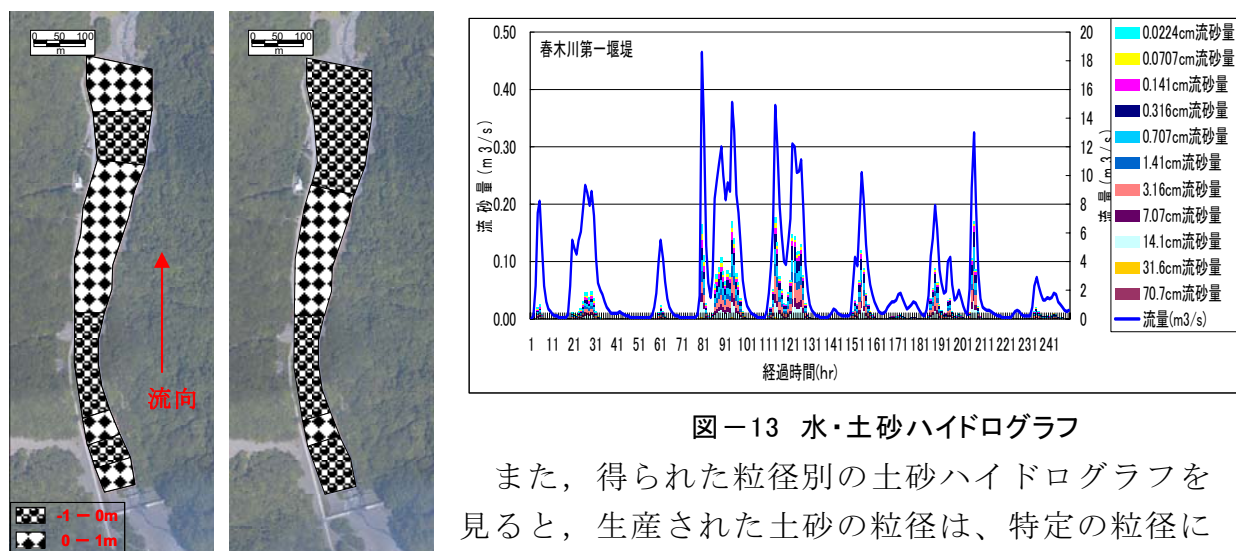


図-12 河床変動量の比較
(左;計算 右;航空レーザー測量)

図-13 水・土砂ハイドログラフ

また、得られた粒径別の土砂ハイドログラフを見ると、生産された土砂の粒径は、特定の粒径に偏らず、細粒分から粗粒分まで均等に分布する傾向が得られた(図-13)。

2. 3. 4 中長期生産土砂量予測手法のまとめ

今回の検討により、計算条件として土砂量と流量を的確に与えることにより、一次元の河床変動計算を用いて中長期の生産土砂量が推測できること、計算に与える供給土砂量は、航空レーザー測量の成果が有効であること、また、本手法により、流量・土砂ハイドログラフが得られることから、河道内の土砂生産のタイミングの推測も可能と思われる。

以上より、河床が安定している時期、河床変動が起きた大きな出水後は、土砂生産源となる斜面、河道において航空レーザー測量を実施し、2時期の比較から、面的な土砂移動の動向を把握し、計算に与える土砂量等の条件を求めることが出来るようにしておくことが必要である。

3 まとめと今後の課題

今年度は、調査・観測事例に基づき、短期、中長期の生産土砂量予測手法とその再現性について検討を行った。短期は、表層崩壊、中・大規模崩壊による生産土砂量の推定について、不飽和・飽和浸透流解析・安定解析の適用が可能か検討を行った。その結果、従来の安定解析を3次元的に扱う手法により、面的な把握がある程度可能であることを示し、新たに斜面変形モデルを用いた解析手法に取り組んだ。そして、規模やタイミングを精度良く推定するには、更に研究が必要であること、パラメータにより結果が大きく異なるため、浸透・

安定解析に必要なパラメータを簡便かつ精度良く推測する手法を確立する必要があると言える。

中長期については、河床変動計算による推定手法を示し、計算条件のうち、計算区間上端に与える土砂量について航空レーザー測量の適用により推定できる可能性があることを示した。しかし、今回の検討は1出水期を挟む期間で、限定された区間で実施したことから、更に長期間、広範囲で検証を実施し、その適用性を確認する必要がある。また、河床変動計算に必要となる流出解析を行うに当たり、定数の設定と結果の検証を行う必要があることから、山地流域における精度の高い流量観測が必要である。

表-6に本研究の結果を示す。3年の研究期間内で、観測・調査箇所における大きな降雨が無かったこともあり、土砂生産域における土砂動態を十分に解明できたとは言いがたい。しかし、必要な調査・観測手法や、具体的解析手法案を示すことができた。今後は、本研究で検討された調査・観測手法に基づき、短期における斜面変位と地下水挙動のモニタリング、中・長期における河床変動のモニタリングを実施し、データの蓄積と解析を行う必要がある。

表-6 検討結果のまとめ

対象現象	生産土砂量推定手法	H18までの到達点	課題
短期 表層崩壊	①飽和・不飽和浸透流解析、3次元安定解析により、計算セル毎に斜面安全率を求め、安全率が1以下のセルに簡易貫入試験で求めた土層厚を乗じる。 ②飽和・不飽和浸透流解析と、有限要素法を用いて、斜面変位の量を基に、範囲を予測する。	①不安定斜面で生産される潜在的な土砂量として推測が可能。 ②短期間のモニタリングではあるが、降雨による斜面変位を、2次元である程度、再現することができた。	①セル単位の危険度評価に基づく崩壊土量の推定であり、実際に発生する崩壊範囲との整合性が課題。また、土層厚や土質定数等のパラメータの精度が結果に影響を与えるため、簡便かつ適切にパラメータを推測する手法が必要。 ②適切な斜面のモデル化とパラメータ設定手法の確立が必要。破壊に対する変位の閾値の設定や3次元への展開も必要。
中期 中・大規模	事前に崩壊ブロック(範囲と深さ)を推定し、飽和・不飽和浸透流解析と、3次元安定解析により、安全率を求め、1以下となった時点で崩壊発生タイミングと崩壊土量を求める。	物理探査や電気探査等により、崩壊発生箇所と崩壊ブロックの範囲、崩壊深の推定が可能な場合、崩壊土量が推定できることを示した。	崩壊発生箇所を予測する手法が必要。また、物理探査等による土中構造の把握は高コストとなる可能性が高い。土砂生産のタイミングは、中・大規模崩壊の場合、降雨ピークから遅れる場合があり、 $F_s < 1$ で崩壊発生と見なすことについて、実現象との整合性が課題。
中・長期 渓床・溪岸侵食	1次元河床変動計算により、土砂収支を計算する。計算に必要な供給土砂量は、航空レーザー測量により、計算区間上流側の地表の変動量から推定する。溪岸侵食量は芦田・江頭・加本の式を使用。	側岸侵食を考慮した1次元河床変動計算により、航空レーザー測量から求めた実際の値に近いと思われる生産土砂量を再現することができた。土砂生産のタイミングは、河床変動計算から、土砂ハイドログラフを作成することにより、推定が可能。土砂生産の推定に当たり、航空レーザー測量が適用できることを示した。	今回の検討は、1出水期を対象とした狭い範囲での検討であったため、より広範囲、長期間の土砂流出の事例を用いた検証が必要。また、計算条件に必要な流量を求めるため、精度の高い山地流域の流量データの蓄積が必要。

<参考文献>

- 1) (社)地盤工学会(1989):斜面安定解析入門, pp. 42-45.
- 2) 笹原克夫, 酒井直樹, 孫躍, 阪上最一(2006):降雨に伴う斜面崩壊の2次元FEM解析手法の提案, 第41回地盤工学研究発表会講演集, pp. 2191-2192.
- 3) H, J, Hovland(1977):Three dimensional slope stability analysis method. Proc. ASCE., Vol. 103, GT9, pp. 129-140.
- 4) 酒井直樹, 鈴木隆司, 栗原淳一(2006):地形・地質特性からみた深層崩壊発生溪流の抽出手法の提案, 第3回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 土木学会西部支部, pp. 53-58.
- 5) 芦田ほか(1983);山地流域における侵食と流路変動に関する研究(2), 京大防災研究所, 年報第26号B-2.