

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

流砂系においては土砂や洪水の氾濫、ダム貯水池における堆砂、河床低下に伴う人工構造物の基礎部損傷、海岸侵食などの問題が発生しており、土砂の生産・流出過程の把握が必要となっている。このため、国土技術研究会指定課題「流砂系における土砂移動実態に関する研究（平成11年～15年度）」では、流域全域の土砂モニタリングを実施し、流砂系一貫として土砂移動の実態を量・質・時間的に明らかにしてきた。しかし、山地流域における土砂生産量と山地河川流量の推定精度の向上が課題として残されている。

砂防基本計画では生産土砂量の算定が基本となるため、山地流域における土砂の生産量や、山地河川流量に依存している流出土砂量の推定手法の確立が必要である。計画では100年以上の確率降雨に伴う現象を対象として、過去の災害などの実績に基づいて土砂生産の量や発生時期を推定している。しかし、通常そのような規模の実績データを得ることは困難であるため、基本生産土砂量の推定は既往データの統計処理による経験的な方法ではなく、土砂移動現象を物理的にシミュレートして生産土砂量を求める手法が望ましい。

以上のことから、本研究では平成16年度から18年度を研究期間として、まず地形、地質等の情報に基づいた物理的な土砂生産モデルにより、短期および中・長期の基本生産土砂量と土砂供給タイミングを客観的・合理的に推定する手法を提案する。そして、過去の災害事例が乏しい流域や調査が困難な流域においても適用可能な手法を開発することを目的としている。

2 土砂生産予測調査の実施状況

2.1 研究方法

基本生産土砂量を推定するために、短期・中期・長期に分けて検討する。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。

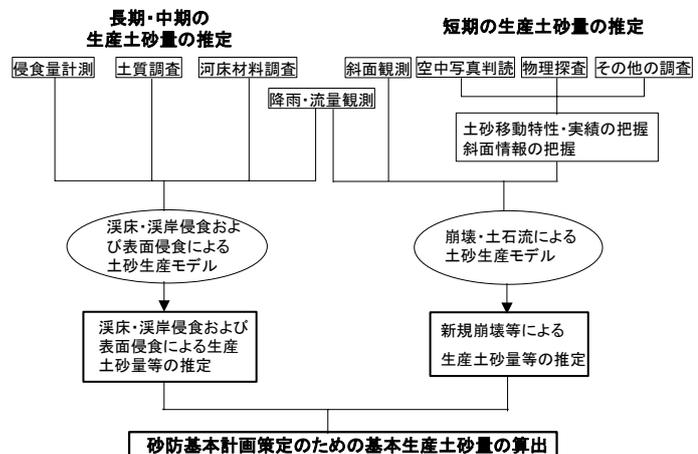


図1 山地流域における土砂生産予測手法の調査内容

本研究では、短期に相当する土砂移動現象として斜面崩壊、中長期では溪床・溪岸侵食を支配的なものであると考え、それぞれを対象として研究を進めている。

生産土砂量推定の調査内容を図1に示す。土砂移動現象を物理的に説明するために、現象が発生する場の地形、地質等に関する基礎的な調査を行うとともに、モデルによる土砂生産計算結果の検証に供するための現地計測(モニタリング)を実施する。

2. 2 モニタリング実施状況

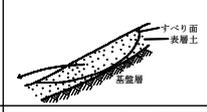
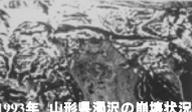
2. 2. 1 短期の生産土砂量

短期の基本生産土砂量を推定する場合、計画規模の降雨時に流域内で発生する斜面崩壊を対象とする。規模、崩壊機構等の観点から表1のとおり表層崩壊、中規模崩壊、大規模崩壊に分類し、全国の直轄砂防事業を実施しているエリアのうち、図2の箇所において対象溪流を設定し観測体制の整備を行っている。

2. 2. 2 中期・長期の生産土砂量

中期・長期の基本生産土砂量の推定にあたっては、表2のとおり溪岸・溪床侵食と表面侵食を対象とする。研究実施対象流域としては、中・古生層の堆積岩地帯等において、過去大規模な斜面崩壊が発生して不安定な土砂が河道に堆積しており、今後侵食を受けやすいと考えられる流域を、また、表面侵食による生産土砂量については、侵食により微細土砂流出が発生している流域を対象に図3の箇所を選定した。

表1 短期の土砂生産現象の分類

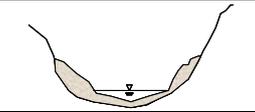
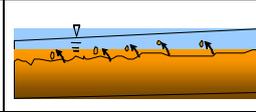
	表層崩壊	中規模崩壊	大規模崩壊
説明	表層の風化土層と基岩との間の面を境界として表土層が崩壊するものである。個々の規模は小さく、崩壊の深さも数10cm~2m程度であるが、発生数は多い。花崗岩地帯に多く、長さ、幅とも小規模で、表層土層も比較的薄い斜面であることが多い。	過去の大規模な火砕流堆積物により形成された斜面や、基岩が認められないほど強度に風化が進行した斜面において発生する崩壊である。個々の規模は大きく、崩壊の深さも大きい。発生頻度は低い。たとえば火山噴出物地帯が挙げられ、長さ、幅とも大規模で、斜面表面から基岩までが深い急峻な斜面で発生することが多い。	基岩内部で崩壊が発生するものである。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			

斜面崩壊の区分
 ○ 表層崩壊
 △ 中規模崩壊
 □ 大規模崩壊



図2 研究対象溪流位置図(短期)

表2 中期・長期の土砂生産現象の分類

	溪岸・溪床侵食	表面侵食
説明	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溪岸部、溪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		

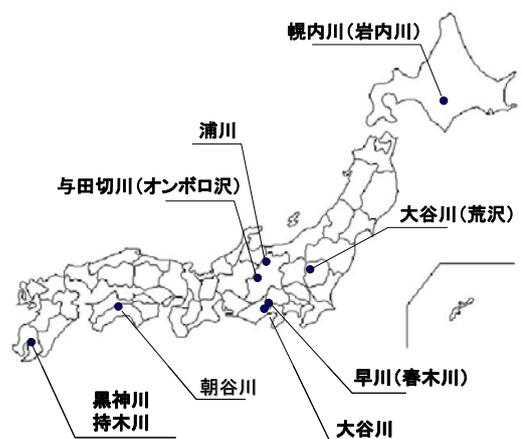


図3 研究対象溪流位置図(中期・長期)

3 短期の生産土砂量の推定

3. 1 短期の生産土砂量推定手法の開発に必要な調査・観測と方法

短期の土砂生産は、表1に示されるように3種類に分類されるが、ここでは、最も一般的な斜面崩壊で、発生数の多い表層崩壊に絞って、基本生産土砂量と土砂供給タイミングを推定するための研究手法について説明する。

ここでは、不飽和斜面において降雨による飽和度の上昇により表層崩壊が発生するというモデルを考える。すなわち表層崩壊は、不飽和土斜面において、①降雨浸透による飽和度の上昇によるみかけの粘着力の低下、②降雨浸透による土塊の重量増加によるせん断力の増加というメカニズムで発生すると想定した。既存の安定解析では、前述したような特性を考慮した計算を行うのは難しい。そのために数値解析的手法として、斜面内の飽和不飽和浸透流解析を行い、湿潤線の変動挙動を追跡し、斜面安定解析においては、表層の不飽和土の特性である①、②を考慮した弾塑性有限要素解析を行う。最終的には、飽和不飽和浸透流解析と弾塑性解析を連成させた3次元弾塑性解析を行うことで斜面の安定性の定量的評価が可能となる。一方、現地モニタリングとして、さきのモデルの検証に対して特に必要なものに水分含有量、表層変位量の計測、流域の水文観測、風化層の厚さと強度特性を把握するための土質、力学試験があげられる。以上にあげた、数値解析と現地モニタリングを有機的に結びつけ、降雨時や降雨後の斜面の安定性および生産土砂量と土砂供給タイミングについての定量的評価を目的としたシステムの確立を目指している。



写真1 荒谷観測斜面

3. 2 調査観測の分析事例

3. 2. 1 現地モニタリングシステムの概要

図2に示した対象溪流のうち、広島市街地から西方約11kmに位置する太田川水系八幡川流域の荒谷川(写真1、図4)のシステムおよび観測例を紹介する。調査地周辺には、基盤岩として広島花崗岩類が広範囲に分布し、場所により風化が進んでおり、斜面崩壊や土石流などが発生する素因を形成している。平成11年には、荒谷川で土石流が発生し、多くの被害を起こしている。

表3に観測機器の一覧表、図5に観測位置を記した平面図および断面図(図6)を示す。

水文関係については、雨量計を設置するとともに、量水堰を設置して水位を観測し、流量



図4 荒谷川流域平面図

を把握した。

斜面の土壌水分観測として、サクシオン（土壌水分量）の変化を計測するために、テンシオメータを、深度 15cm、50cm、1m、2m を基本に設置した。

斜面の変位観測としては、崩壊が想定される斜面において、伸縮計と傾斜計を設置した。伸縮計は、微地形調査より想定した崩壊斜面の上部と下部の2箇所、傾斜計は下部の伸縮計の付近に1箇所設置した。テンシオメータ、伸縮計、傾斜計の観測は、晴天時は30分間隔、雨天時は3分間隔で行なった。

斜面において表層土深を三次元的に推定するために、簡易貫入試験とレイリー波探査を行った。しかし、レイリー波探査は、対象地域（荒谷）のように表層土深が最大でも2m ぐらいの場合は、精度よく推定できなかった。そのため、簡易貫入試験を用いて表層土深を計測した。土質試験は、サクシオンと粘着力の関係を把握するためのサクシオン一定不飽和三軸試験や浸透特性を把握するための水分特性試験（図7）、不飽和浸透試験などを行った。

なお、現地で観測されたデータは、携帯電話による遠隔通信システムを用いてデータを取得することを可能としている。これらは、比較的安価に構築でき、効果的なメンテナンスの実施やデータ取得の迅速性が向上するなどの利点がある。事務所においては、災害が予想される際に迅速にデータを取得でき災害予測にも大いに活用が可能と思われる。

3. 2. 2 モニタリング計測結果例

モニタリングは、2004年4月から開始した。ここでは、2004年10月19日から2日間のモニタリング結果について紹介する。

<降雨の特徴> 10月18日21時ごろか

表3 観測調査一覧

観測機器	数量	備考	
雨量観測	雨量計	2	
流量観測	流量堰	2	
斜面土壌水分観測	テンシオメータ	20	
	地下水位観測	1	
斜面変位観測	伸縮計	2	
	傾斜計	1	
調査、試験	簡易貫入試験	150	土層深分布
	土質試験	1式	せん断試験

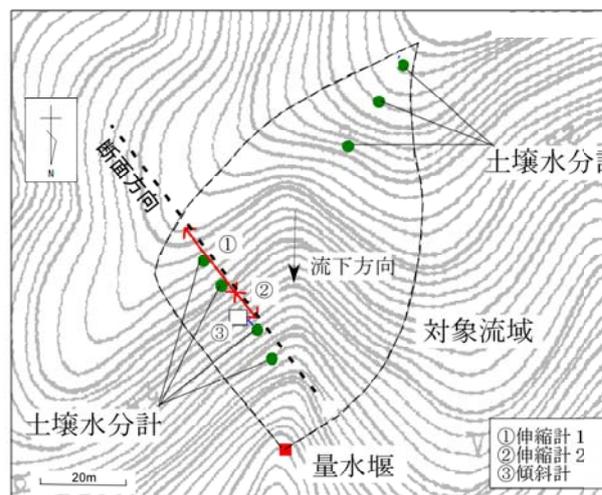


図5 観測位置平面図

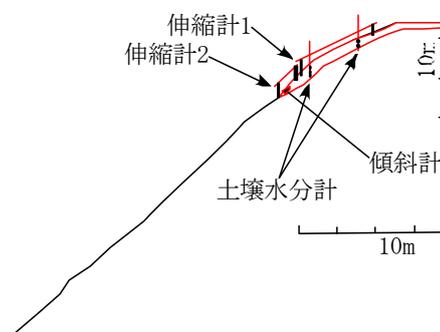


図6 測線断面図

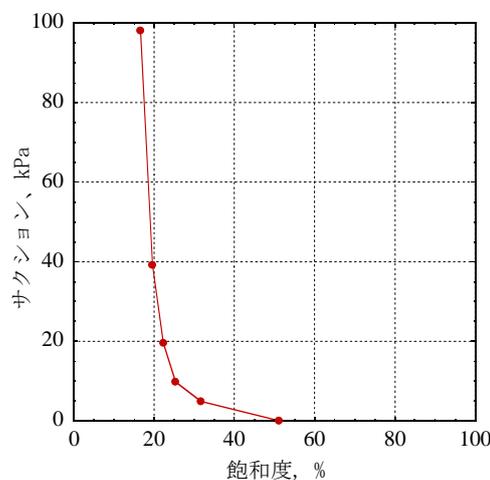


図7 水分特性試験結果（荒谷）

ら降り始め、10月20日16時ごろまで断続的に降り続いた。この時の総雨量は131.4mm、最大時間雨量は10.4mm、最大10分間雨量は、2.3mmであった。

＜流量観測＞ 量水堰で得られた降雨と比流量との関係を図8(a)に示す。降雨波形のピークと流量のピークがほぼ一致し、降雨波形に対応して流量も敏感に増減する傾向がある。

＜サクシオン計測＞ 図8(b)は、サクシオンの降雨に対する変化を時系列で表している。なお、降雨開始前4日間は無降雨であった。19日午前7時に時間雨量6mmの降雨を記録し、サクシオンが急に下がるのがわかる。大局的にみると、深度15cmのサクシオンは、19日7時の降雨に反応して下がった後、低いところで一定傾向を示す一方、深度50cmは20日0時から6時にかけて、深度100cmは、20日13時以降から、ほぼ飽和状態を示し、浅い順にサクシオンは小さくなる傾向を示している。一方、深度200cmでは反応が鈍く降雨による影響は小さい。今回のような降雨強度が小さい雨では、降雨浸透による飽和領域が緩やかに上部から下部へ伝わっていくことがわかる。

＜変位観測＞ 伸縮計は、未崩壊の斜面に設置するため、微地形調査により崩壊範囲を推定し、尾根部付近より、①24.87mの地点と②その下方に7.9mの地点にインバー線を設置した。図8(a)で見られる降雨ピークは19日15:00付近にあるが、それほど鋭いピークではなく、その後も同程度の降雨が続いている。図8(d)では、降雨量のピークから約22時間後に、伸縮計1は急に引っ張りの方向に変位した。同時に伸縮計2でも変化がみられ、圧縮傾向を示している。また傾斜計でも、同時期に傾斜角が増加する変化が記録されている(図8(c))。これらから20日10時より18時にかけて、斜面表層部が下方に変位したのが捉えられた。このように崩壊に至らない場合でも斜面は変形することを示し、その変形挙動(地表面の変位)をとらえることができれば、突発的に発生するといわれる斜面崩壊でも、その崩壊予測ができる可能性があることを

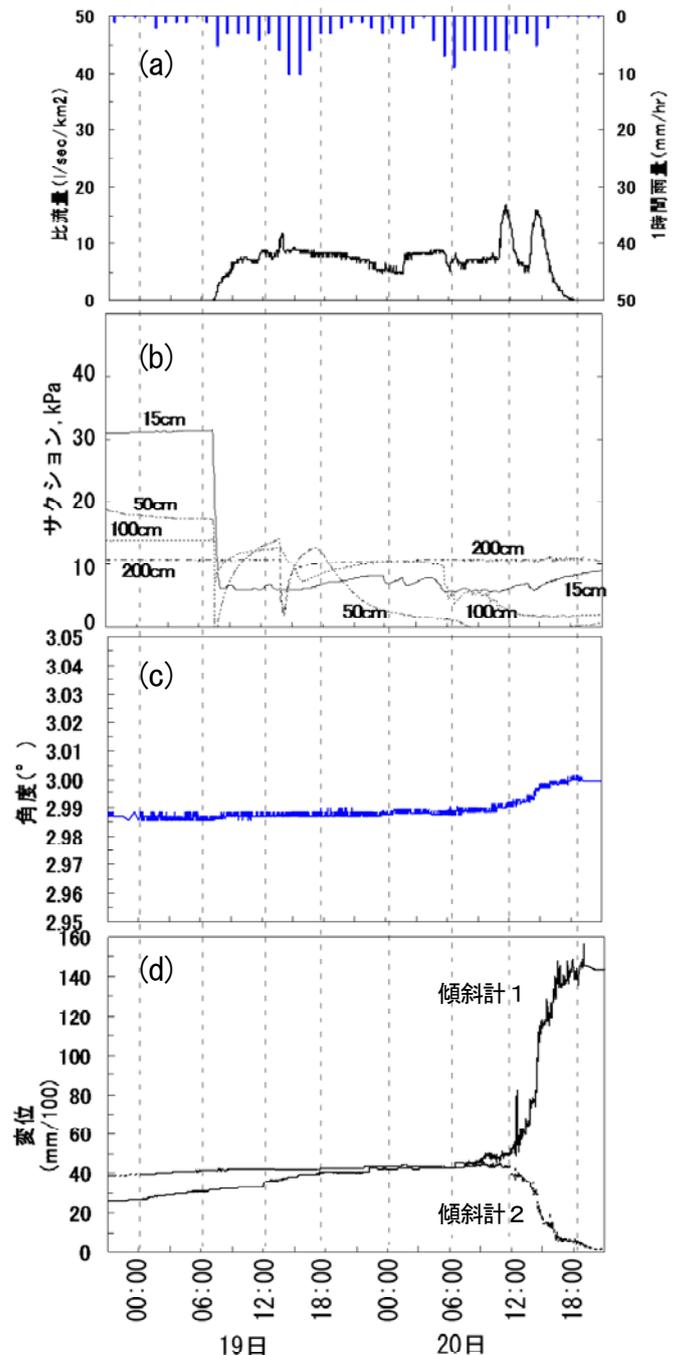


図8(a) 時間降雨と比流量との関係

(b) 時間降雨とサクシオンとの時系列変化

(c) 傾斜計と、(d) 伸縮計の時系列変化

意味する。なお伸縮計は、地表面に設置するので近辺で倒木などがあつた場合、その影響を受けやすいので、伸縮計に加え傾斜計などの装置をあわせて設置するのが望ましい。

3. 3 解析モデルと解析事例

<斜面安定問題> 斜面の安定性の評価は、一般的に分割法を用いた極限平衡法による安全率で行われている。しかし、この方法では、破壊前のすべり面の想定が困難な場合、風化など地質構造に大きく影響をうける場合、不飽和化などにより力学特性が変化する場合などの評価は一般的には困難である。特に本課題のように降雨浸透によって土の力学特性が大きく変化する場合は、浸透問題も絡むためより困難となる。ここでは、その解決法の一つとして有効な有限要素法（FEM）を用いた評価法を考える。この方法の利点は、破壊形態を予め決めることなく、複雑な地形形状、地質構造などに対しても実態に即した安定性の評価ができ、浸透流解析と連携すれば、不飽和土の力学特性を考慮した FEM も可能となる。さらに降雨浸透などによる斜面の変形状態を追っていくことで、安定度の推移を追跡することも可能である。

<不飽和土の力学> 不飽和土のせん断強度式は、ビショップの有効応力理論に適用し、導出する¹⁾と次のようになる。

$$\tau = \sigma_{net} \tan \phi_{net} + c_{net} \quad (1)$$

$$c_{net} = c' + \chi(u_a - u_w) \tan \phi' \quad (2)$$

ここで、 σ : 全応力、 u_a : 間隙空気圧、 u_w : 間隙水圧、 $\sigma_{net} = \sigma - u_a$: 基底応力、

$S = u_a - u_w$: サクシオン、 χ : サクシオンの有効応力への寄与分を表すパラメータ、

c_{net} , ϕ_{net} : 不飽和土の強度パラメータ、 c' , ϕ' : 飽和土の強度パラメータ

(1)式は、形は飽和土の強度式（モールクーロン式）と同様であり、右辺の第2項 c_{net} が不飽和土のサクシオンに起因するみかけの粘着力を包含している。この c_{net} は、(2)式で表されるように、飽和時の粘着力 c' と右辺第2項のサクシオンによる増加分とで表されていると考えることができる。これらのパラメータを理論的に構成則に取り入れる研究も行われているが、このサクシオン（飽和度）—粘着力関係は、土によって大きく異なることから、ここでは、実験的にその関係を求めることにした。

<解析モデル> ここで用いる解析モデルは図9に示すような、表層風化層を考慮した2層構造を考え、飽和不飽和浸透流解析と弾塑性解析を組み合わせた連成解析を行う。この計算では、表層を計算領域とし、基盤における変位境界と水理境界は、それぞれXY固定、非排水としている。ここでは、“サクシオン（飽和度）に応じた粘着力の増減”をモデルに組み込んでいる点が特長である。

<解析結果> 観測の項で述べた荒谷川をモデルにした解析例を示す。ここでは、50mm/hを連続して降らした場合の飽和度分布の時間変化を示している。本解析では、表土層（最

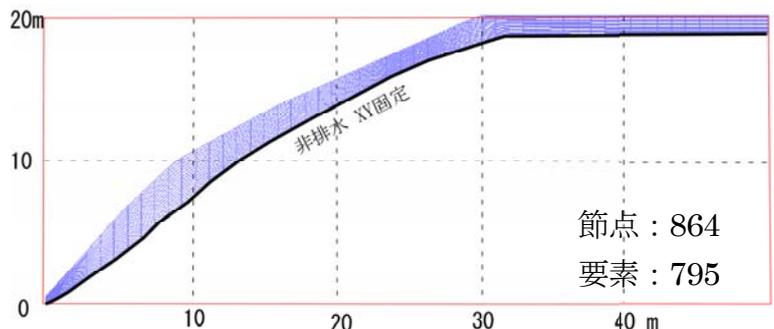


図9 解析モデルとメッシュ図

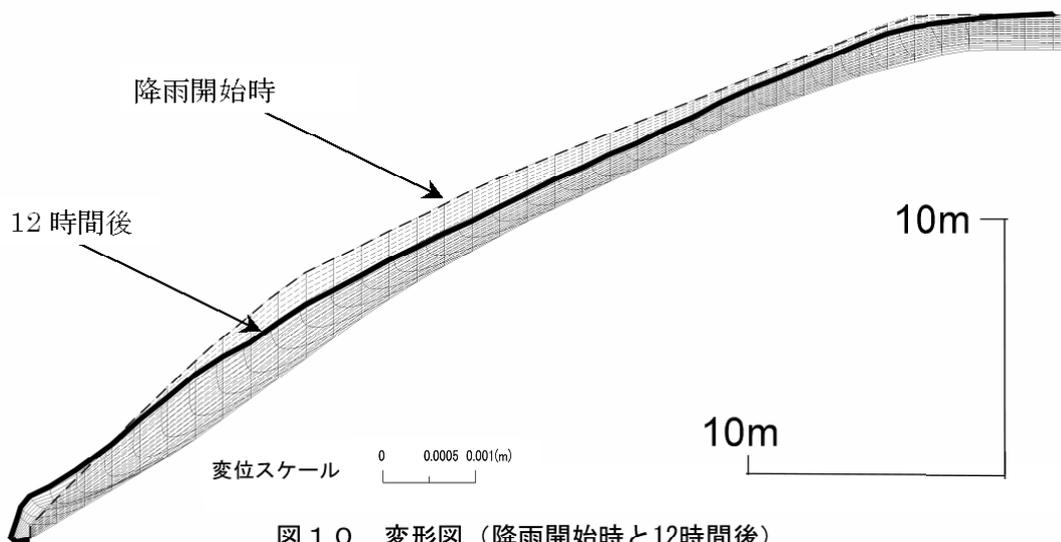
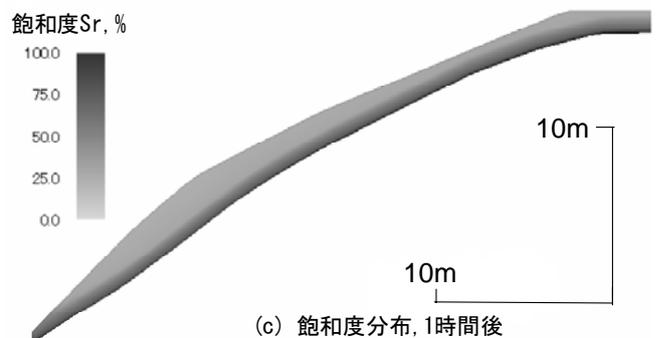


図10 変形図（降雨開始時と12時間後）

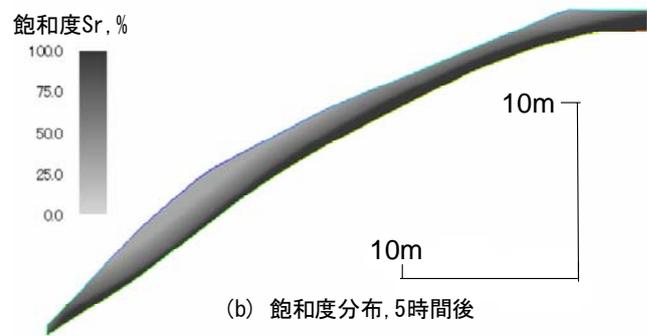
大厚さ 2.0m) のみを解析対象としている。図10に開始時点と降雨12時間後の変形図を重ねて示した。なお縦横変倍にして変形を見やすくしている。境界条件で基盤は固定としているが、基盤上で大きな変位を示し、上層に向かって変位が相対的に小さくなっていることがわかる。

次に図11に飽和度分布図を示す。黒の部分に100%の飽和状態を示し、不飽和になると色が白くなっている。時間とともに飽和度の高まっていく様子が見られる。特に基盤形状と表層の厚さにより飽和度上昇の違いが見られ、表層の薄いところ、基盤の緩傾斜部での飽和度の上昇がみられる。しかし、透水係数が大きいため、降雨が続くにつれて下方から飽和している。

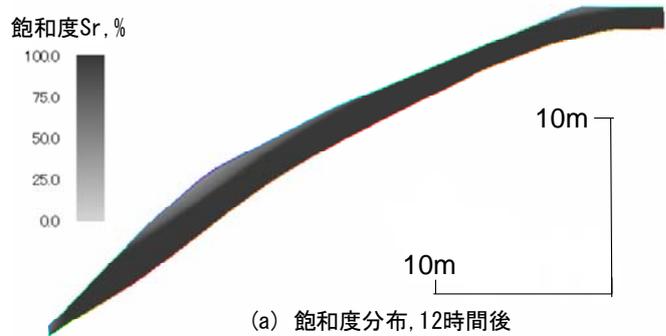
以上のように本モデルでは、飽和度の増加と変形の関係が調和的であることがわかる。今後更にこのような解析を進め、変位量や局所安全率を用いて斜面の危険度を評価する方法を検討するとともに、現地データの蓄積を図っていく予定である。なお、現時点では、これらの解析は2次元であるが、今後3次元化に移行する予定である。これにより、土砂生産量の予測を検討することができるようになる。



(c) 飽和度分布, 1時間後



(b) 飽和度分布, 5時間後



(a) 飽和度分布, 12時間後

図11 解析結果（飽和度分布の時系列変化）

4 中期・長期の生産土砂量推定

4. 1 中期・長期の生産土砂量推定手法に必要な調査・観測と方法

中期・長期の土砂移動現象のうち、今回は溪岸・溪床侵食の再現モデルと観測の概要について説明する。

モデルの考え方は、ある区間の溪床、溪岸においてある流量を想定して、水面形や掃流力等の水理計算から掃流砂量や浮遊砂量を求め、対象区間の上下流の断面を流入・流出する土砂量の差から河床変動量を決定する方法である。なお、溪岸侵食につ

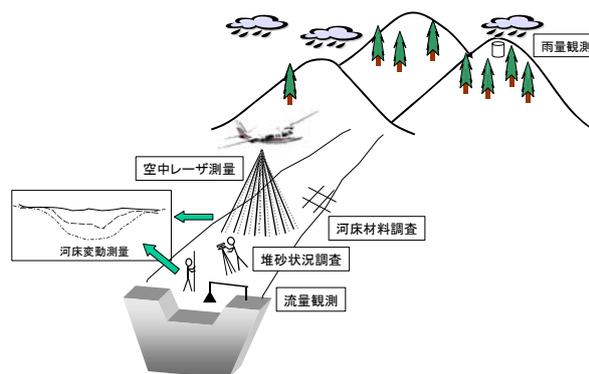


図12 中・長期の基本生産土砂量推定手法研究のための調査・観測イメージ(溪岸・溪床侵食の場合)

いてもこの収支に加えて評価を行う。河床変動を表現するには、刻々と変化する流れの状態と流砂量を評価して、流砂量の変化を追跡する必要がある。このため、基本的に①流れの計算、②流砂量の計算、③河床変動量の計算という3つのモデルを必要とする。流れの基礎方程式は連続式と運動方程式、流砂量の評価には流砂量式(掃流砂・浮遊砂)を用いるが、溪岸侵食の計算や混合粒径を扱う場合は粒度分布の変化の計算も必要となる。

溪岸・溪床侵食モデルに必要な調査・観測項目を図12に示す。土砂生産量を計算するには、現地計測により溪岸、溪床の地形と河床材料の粒径分布を調査する必要がある、作成したモデルは溪岸、溪床侵食量の実測結果と照合して検証を行う。このほか、侵食を引き起こす原因である山地の河川流量の予測手法についても検討を行う。

4. 2 調査・観測の分析事例

4. 2. 1 航空レーザー測量による溪岸・溪床の計測

溪流の土砂動態は通常定期横断測量による平均断面法により土砂量を算出して検討されているが、測量結果は数百mの一定間隔しか得られないこと、上流部ほど作業効率が低下するなどの欠点がある。最近ではレーザーによる面的な地形計測が可能となっており、精度のよい土砂動態の把握手法としての適用性について検討を行っている。

中部地方整備局天竜川上流河川事務所管内の天竜川水系与田切川は、木曾山脈の念丈岳を源流とし、急峻なV字谷をなして東流しながら伊那盆地で段丘を開析する「田切地形」を形成して天竜川に合流する。与田切川左岸支流のオンボロ沢は、赤椰(あかなぎ)岳南東斜面の大規模な崩壊地である百間ナギを源流としている(図13)。

当地では2001年12月より毎年出水期前後の2時期(6~7月、10~12月)において、航空レーザーによる河道地形測量を実施している。計測は1m²あたり6点の計測密度で

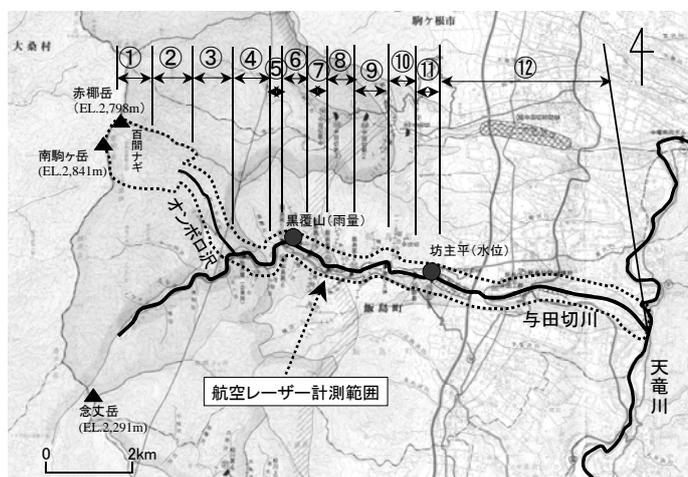


図13 与田切川・オンボロ沢位置図

行い、0.5m間隔の正方格子に正規化して各種の解析に供する。精度検証として、現地の17箇所における地上の横断測量結果と航空レーザー測量の結果について、高さを2000点で比較した。その結果、平均較差-2cm、最大較差1.4m、標準偏差23cmとなり、従来の定期横断測量に比較しても同等のデータが面的に入手でき、人の進入が困難な上流域でも下流域と同様の精度で面的な河道土砂動態の把握が可能であることが判明した。

4. 2. 2 与田切川（オンボロ沢）の河床変動・土砂動態

与田切川では2001年12月から2004年11月まで計7回の航空レーザー計測が行われている。土砂の変動量は2時期の計測値で作成したDTM（デジタル地表面モデル）を差分した標高変化量に格子面積を乗じて体積変化として計算できる。地上測量では区間断面面積の変化量と区間長から体積変化量を求めるため、詳細な変化は不明であったが、レーザー計測は格子の変化量を直接的に計算可能で、細部の変化が把握できるのが利点である。

しかし、計測タイミングは離散的であるため、計測した期間における土砂量の増減はわかるが、中間時の変化は捉えていないので期間中の土砂生産、移動量の積算値ではないことに注意する必要がある。ここでは、2時期で地表面が上昇した場合を堆積、低下した場合を侵食と解釈し、そのときの体積変化量をそれぞれ堆積量、侵食量として土砂動態の傾向を把握した。

2004年は6月と11月に計測を行ったが、期間中に黒覆山雨量観測所で日雨量100mmを超える日が4日あり、中小規模の出水が発生した。この期間のオンボロ沢下流区間（図13の③）について解析した結果を段彩図として図14に、また、断面A、Bの河床横断の変化について図15に示す。レーザー計測では堆積、侵食の場が面的に細部まで表現でき、

溪岸・斜面の変化も詳細に計測が可能で、この区間の土砂量の変化は侵食量 $20,700\text{m}^3$ 、堆積量 $46,600\text{m}^3$ 、変動量は $+25,900\text{m}^3$ で、平均変動高は $+0.43\text{m}$ と求めることができた。このように、航空レーザー測量では見通しの可能な範囲であれば、面的に精度の高い計測ができるため、溪流の土砂動態の把握に活用が期待される。しかし、植生が密な

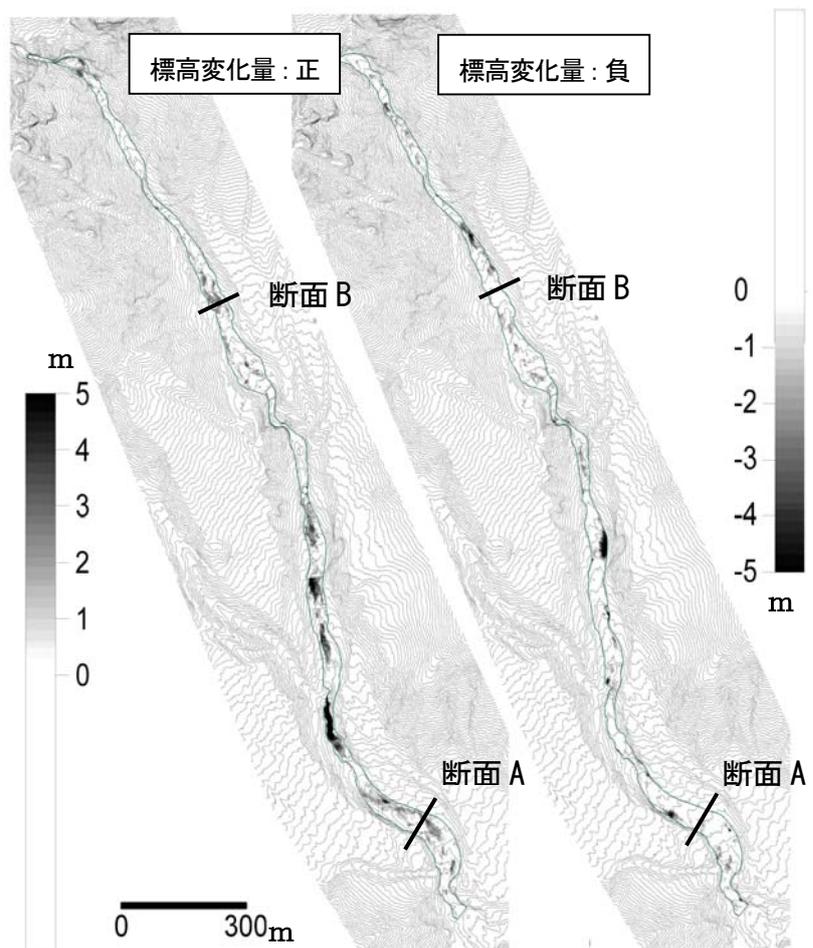


図14 河床の標高変化（オンボロ沢 2004年6～11月）

場合には地表面を計測することは困難であり、また、当地ではオンボロ沢上流部（図13の①、②）の区間では、積雪が雪渓として残るため、出水期前の計測値は不正確となる。このような場合は、現地での補足調査や解析期間の検討が必要となる。

次に2001年12月の計測結果を基準に、6回の計測について12区間の河床変動量を平均変動高で図16に示す。降水量は2001年12～2002年11月は1,326mm（最大日雨量88mm）で、以降2003年10月まで2,205mm（同120mm）、2004年11月までは2,701mm（同147mm）であった。崩壊地付近の①②で変動が大きいのが、③以降の下流では大きな変動がみられない。2004年は①②の区間は侵食傾向で、③以降の区間は変動高が正で堆積傾向となっているが、天竜川本川との天竜川の合流部付近の⑪⑫はほとんど変化がなく、ここまでは土砂の移動は達していないものと推定される。

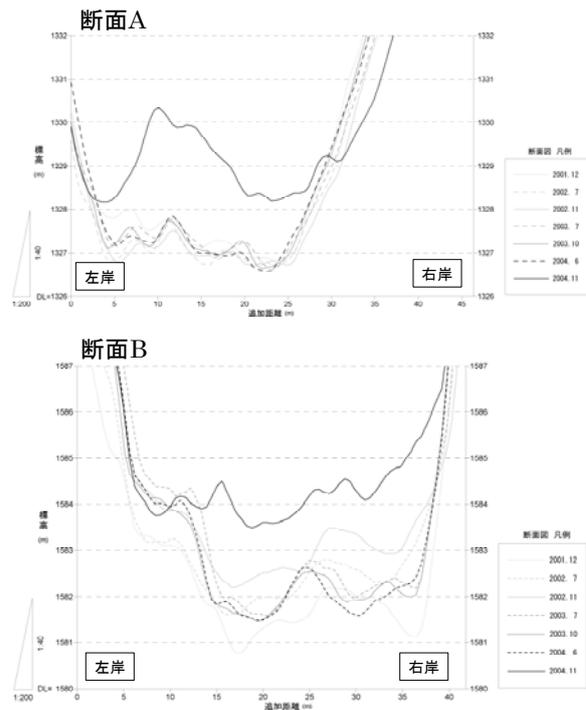


図15 オンボロ沢の断面①、②における河床横断の変化

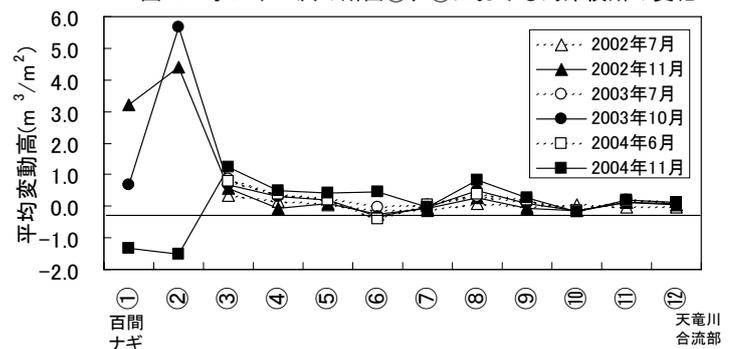


図16 2001年12月～2004年11月の河床変動
(2001年12月を0とする)

5 まとめと今後の課題

今回は短期のうち表層崩壊、中長期では溪岸・溪床侵食を例に現地における観測と解析事例を紹介した。表層崩壊では、降雨浸透と浸透による力学的な影響を同時に考慮して斜面の不安定化を予測できることを示した。今後は観測データの蓄積と解析により、崩壊予測を3次元に拡大して斜面の安定性を評価し、崩壊土砂量の推定や発生タイミングについて検討する予定である。また、溪岸・溪床侵食に関しては均一で高密度の土砂動態計測が可能であり、今後は溪岸侵食を考慮した河床変動推定手法の提案と、各地で計測された土砂動態から溪流の土砂移動を表現可能なモデルを検討する予定である。

本研究は平成16年度から平成18年度まで実施する計画で行っており、平成17年度には各試験地の整備が整い本格的なデータ収集が開始された。本研究が対象とする範囲は山地の源頭部が主体で、調査、観測には困難が伴うが、土砂生産・移動モデルの設定とそれを検証できる精度の良いデータを計測することにより、山地流域における土砂生産予測手法が確立できると期待される。

参考文献

- 1) 地盤工学会, 不飽和地盤の挙動と評価, pp85-142, 2004.