

河川砂防技術研究開発

【成果概要】

①研究代表者		氏 名（ふりがな）	所 属	役 職					
		後藤 聡（ごとう さとし）	山梨大学 大学院総合研究部	准教授					
②技術研究 開発テーマ	名称	地形発達史の視点から表層崩壊による土砂の生産・移動履歴を評価した土砂流出モデルの開発							
③研究経費（単位：万円）		平成29年度	平成30年度	平成31年度	総 合 計				
※端数切り捨て。		182.5万円	182.5万円	134.8万円 (変更137.28万円)	499.8万円 (変更502.28万円)				
④研究者氏名（研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）									
氏 名		所属機関・役職（※令和2年3月31日現在）							
檜垣 大助		日本工営㈱・技師長（弘前大学・名誉教授）							
佐藤 剛		帝京平成大学・教授							
北爪 貴史		東電設計株式会社・課長							
⑤研究の目的・目標（様式地砂-1、地砂-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。）									
（研究の背景） 「総合的な土砂管理」に向けて、時間的・空間的な拡がりを持った、流域の源頭部から海岸までの一貫した土砂移動の場において、国土マネジメントとしての土砂管理が行われている。土砂管理の視点として、場と時間の連続性、土砂の質と量、水との関連が、重要である。									
（目的・目標） 本研究は、富士川砂防事務所管内の早川流域等を対象とし、 <u>源頭部における土砂生産ポテンシャルの数値化</u> および <u>流域における土砂流出</u> について、地形発達史の視点から表層崩壊による土砂の生産・移動履歴を評価した土砂流出モデルを開発することを目的・目標とする。目標とする手法は、他地域の同様な堆積岩、火成岩にも適用できるような汎用性のある程度持たせるような検討も行う。									
（調査・研究内容） 以下の3つの研究課題について、3年間で検討を行う。 課題(1)：LIDARデータ及び現地調査による表層崩壊の発生場・発生規模の履歴特性 課題(2)：斜面上の風化堆積物の土質力学的特性と降雨時及び地震時の斜面崩壊特性 課題(3)：地形発達史の視点から表層崩壊による土砂の生産・移動履歴を評価した土砂流出モデルの開発									
（研究成果の砂防行政への反映） 地形発達史の視点から表層崩壊による土砂の生産・移動履歴を評価した土砂流出モデルの開発により、「総合的な土砂管理」等の砂防行政に活かすことができる。									

⑥研究成果

(具体的にかつ明確に記入下さい。)

1 流域土砂生産ポテンシャル評価手法の提案

1-1 調査地の地形・地質と土砂生産状況

本研究は早川水系春木川上流域を調査地に設定し、流域における土砂生産のポテンシャルを評価する手法を開発することである。

調査地の地形・地質について、図-1及び2に示す。図-1左図に示すように、春木川上流域は、北から夜子沢、小春木沢、池之沢、池之沢-2、大春木沢、タル沢などで構成される。

図-1の矢印a付近では二重山稜が発達している。二重山稜は稜線が二つに分かれ、その間に線状の凹地が存在するものである。また、図-1の矢印bに示す大春木沢の谷頭には七面山崩壊があり、土砂生産が盛んである。図-6Aは2006年および2015年に実施された航空レーザ測量の結果（数値標高モデル；以後、DEMと呼ぶ）から差分をとることで作成したものであるが、大春木沢上流域に存在する崩壊源での侵食が進んでいること、また、谷沿いにおける土砂の堆積が進んでいることを示している。春木川本調査地における主要な土砂生産は崩壊に起因するものと、崩壊後に河床に堆積した物質の二次移動である。

1-2 AHP法による土砂生産ポテンシャル

地形判読は、地形学の専門家が主として航空写真や地形表現図を目視し、主観的な判断に基づいて行われる。しかし、土砂災害発生危険度を評価する場合は、客観性が強く望まれるので、判断要素と判断プロセスを一般化する必要がある。そこで、本研究では、階層構造分析法（Analytic Hierarchy Process；AHP法と呼ぶ）を用いて客観性を満足する手法とした。

図-3に示すように、土砂生産のポテンシャルを示すと考えられる地形や植生などの要素を抽出し、AHP法を用いて100 mメッシュ単位でそれぞれの評点を算出・合算した。流域のある地点から上流域におけるメッシュ評点の総和として流域土砂生産ポテンシャルの評価を行い、メッシュ評点総和値を流域面積で除すことで流域における土砂生産ポテンシャル値とすることができる。本手法の開発は、流域管理の視点で砂防事業の優先度を比較・検討するために寄与することができる。

土砂生産性についてAHP法を用いて評価するには、評価に用いるための要素を抽出する必要がある。そこで現地での地形および土砂生産状況を理解したうえで、傾斜、岩盤クリープ地形、崩壊跡地形、植被率、水系の5つを要素として要因として抽出した（表-1）。これらの要因は、DEMおよび航空写真から読み取ることができ、それぞれに対しAHP法を用いて重みづけを行い（表-2）、メッシュ毎の要素（小分類）の評点を算出し合算することで、各メッシュの土砂生産性を示すことが可能となる。なお、AHPの重みづけに際しては、檜垣・佐藤・後藤の3名からのヒアリング結果を基に分析した。図-4に主な調査地である大春木沢流域の状況を示す。

Yk: 夜子沢
Kh: 小春木沢
Ik: 池之沢
Ik-2: 池之沢-2
Oh: 大春木沢
Ta: タル沢

a: 二重山稜
(2つの稜線間に凹地)
b: 七面山崩壊

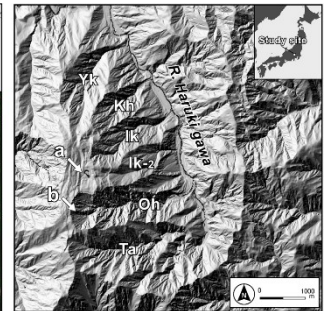
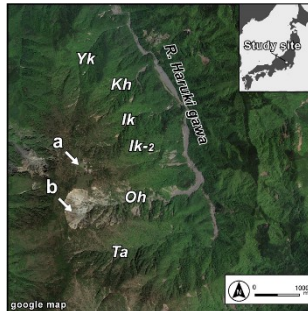


図-1 調査地の地形（衛星写真および陰影図）

Yk: 夜子沢
Kh: 小春木沢
Ik: 池之沢
Ik-2: 池之沢-2
Oh: 大春木沢
Ta: タル沢

SM: 砂岩と泥岩の互層
DR: 閃緑岩と石英閃緑岩
RH: デイサイト・流紋岩
AD: 安山岩・玄武岩質安山岩
PY: 閃緑岩

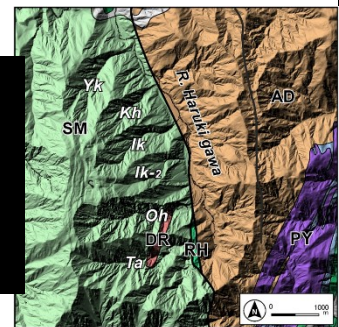


図-2 調査地の地質（地質図 NAVI）

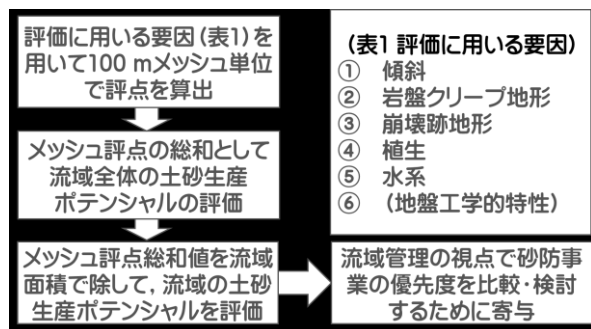


図-3 表層崩壊による土砂の生産・移動履歴を評価した土砂流出モデル



図-4 大春木沢流域の状況
(2019年2月17日に空撮)

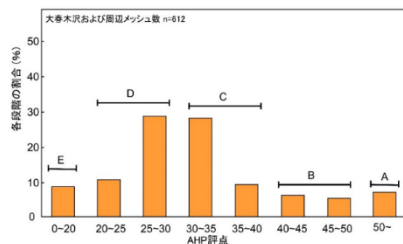
⑥研究成果（つづき）

表 1 土砂生産・移動プロセスの評価に用いる要因

① 傾斜
重力に起因する斜面構成物質の移動しやすさを、「傾斜 $\tan \theta$ 」で評価する。これは、各メッシュ内の平均傾斜で求める。評価に用いる地形要因として起伏もあるが、流域単位での評価に際しては、溪流上の計算地点から上流のメッシュ評点総和とするので、傾斜に含まれると判断し考慮しない。AHP 法を用いた評価にあたっては、 5° 以上 20° 未満、 20° 以上 35° 未満、 35° 以上 50° 未満、 50° 以上の 4 段階に区分した。
② 岩盤クリープ地形
調査地には岩盤クリープによって形成された二重山稜や線状凹地・低崖などの微地形が分布する。基盤岩の緩みが生じていることから、これらの地形が認められる範囲を岩盤クリープの範囲とする。AHP 法を用いた評価にあたっては、岩盤クリープを反映する地形が存在する範囲と存在しない範囲の 2 段階に区分した。
③ 崩壊跡地形
過去に崩壊跡が発生した斜面では、その内部や隣接斜面において新規の崩壊が発生しやすい。AHP 法を用いた評価にあたっては、各メッシュ内に崩壊跡地形が含まれるか否かの 2 段階に区分した。
④ 植生
植生に乏しい斜面は、主として最近発生した崩壊地形からなり、土砂の生産および移動が起きやすい斜面である。国土交通省関東地方整備局が 2015 年に撮影したオルソ航空写真で見られる裸地のうち露岩、溪流の侵食・堆積によるものを除いた斜面を対象とする。AHP 法を用いた評価にあたっては、樹木による根系の緊迫効果や雨滴侵食抑制を考慮して、100m メッシュ内で植被率を 0%以上 33%未満、33%以上 66%未満、66%以上 100%未満の 3 段階に区分した。
⑤ 水系
豪雨時の河床侵食や河岸侵食で土砂が生産されることを鑑み、最上流部の 0 次谷（等高線からみて U 字谷をなす最も上流の谷）と 1 次谷（等高線からみて V 字谷をなす最も上流の谷）を評価の対象とする。具体的には地形表現図上にこれらの谷を入力し、次にメッシュ内の水系本数をカウントする。なお、侵食の誘因となる流量は水流の合流で増大するが、同時に水流次数の増加によって河床勾配は減少する。従って、ストレーラーの水流次数の違いによる侵食しやすさの差は設けない。AHP 法を用いた評価にあたっては、0 本、1～2 本、3 から 4 本、5 本以上に区分した。

表-2 土砂生産ポテンシャル評価の階層構造と重み

階層Ⅰ 目的	階層Ⅱ		階層Ⅲ		得点	AHP得点
	要素	ウエイト	項目	ウエイト		
土砂生産ポテンシャル評価	傾斜	0.265	5～20°	0.113	0.080	4.203
			20～35°	0.340	0.239	12.609
			35～50°	0.377	0.265	14.010
			50～90°	0.170	0.119	6.304
	岩盤クリープ	0.120	有	1.000	0.120	6.368
			無	0.000	0.000	0.000
	崩壊跡地形	0.157	有	1.000	0.157	8.279
			無	0.000	0.000	0.000
	植被率	0.265	0～33%	0.538	0.265	14.010
			33～66%	0.346	0.170	9.006
			66～100%	0.115	0.057	3.002
	水系	0.193	0本	0.000	0.000	0.000
			1～2本	0.163	0.064	3.396
			3～4本	0.347	0.137	7.217
			5本以上	0.490	0.193	10.189



AHP 評点	メッシュ数(n=612)	割合(%)	レベル
50 以上	39	6.37	A(赤)
45 以上 50 未満	27	4.41	B(橙)
40 以上 45 未満	35	5.72	
35 以上 40 未満	57	9.31	C(黄)
30 以上 35 未満	165	26.96	
25 以上 30 未満	171	27.94	D(緑)
20 以上 25 未満	68	11.11	
20 未満	50	8.17	E(青)

図-5 大春木沢および周辺の土砂生産ポテンシャル評価の結果（大春木沢および周辺における AHP 評点分布。A, B, C, D および E は土砂生産ポテンシャルのレベルを示す）

⑥研究成果（つづき）

1-3 AHP法による土砂生産ポテンシャルの数値化

大春木沢及び周辺における100mメッシュ単位毎の土砂生産性についてAHP法を用いて評価した結果を図-5および図-6Bに示す。このうち、AHP評点50点をレベルA（赤）、40点以上50点未満をレベルB（橙）、30点以上40点未満をレベルC（黄）、20点以上30点未満をレベルD（緑）、20点未満をレベルE（青）とした。この結果、大春木沢上流域では周囲と比較し流域がレベルB以上のメッシュで占められていること、さらに春木沢最上流部はレベルAのメッシュが集中して分布していることが判明した。

この結果を検証するために、2006年および2015年の2時期のDEMから作成した差分結果との比較検討を試みた。2時期における標高差分図を図-6Aに示す。差分図の表現にあたっては、侵食域は赤色、堆積域は青色で示し、侵食量はその濃淡によって表現している。図-6Aと6Bを比較すると、AHP評点が高いエリアは侵食が進んでいることが分かる。

土砂生産ポテンシャルと標高差分値との相関性を検討するために、レベルA～Eの差分値の差分総和値を算出し、AHP評点と差分総和値の関係を図-7に示す。AHP評点の大小と差分総和値の間に明らかな正の相関が認められ、本研究手法の妥当性が証明された。

本研究で構築されたAHPを用いた土砂生産ポテンシャル評価手法を、春木川左岸流域（図-8）に適用した結果を図-9および表-3に示す。大春木沢では、AHP評点が20以上から50を超えるメッシュがまんべんなく存在し、大春木沢およびタル沢のみAHP評点が40を超えるメッシュが存在することが分かる。大春木沢およびタル沢以外の沢では、AHP評点が低い傾向にある。

表-3 各流域の土砂生産ポテンシャル

流域名	夜子沢 (n=166)		小春木沢 (n=83)		池之沢 (n=127)		池之沢-2 (n=105)		大春木沢 (n=211)		タル沢 (n=275)	
AHP評点	メッシュ数	割合(%)	メッシュ数	割合(%)	メッシュ数	割合(%)	メッシュ数	割合(%)	メッシュ数	割合(%)	メッシュ数	割合(%)
50～	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	37	17.54	5	1.82
45～50	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	24	11.37	28	10.18
40～45	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	23	10.90	33	12.00
35～40	15	9.04	9	10.84	4	3.15	7	6.67	35	16.59	36	13.09
30～35	67	40.36	42	50.60	56	44.09	26	24.76	47	22.27	78	28.26
25～30	75	45.18	25	30.12	52	40.94	35	33.33	42	19.91	83	30.18
20～25	9	5.42	6	7.23	12	9.45	24	22.86	3	1.42	10	3.64
0～20	0	0.00	1	1.12	3	2.26	13	12.38	0	0.00	2	0.73

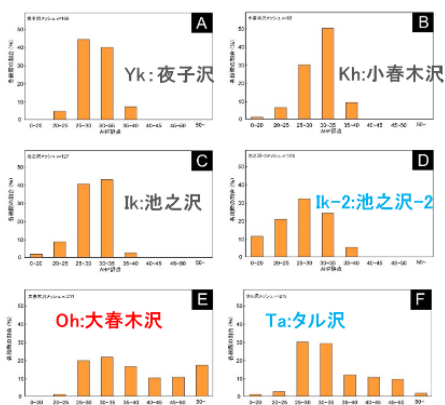


図-9 各流域におけるメッシュのAHP評点分布

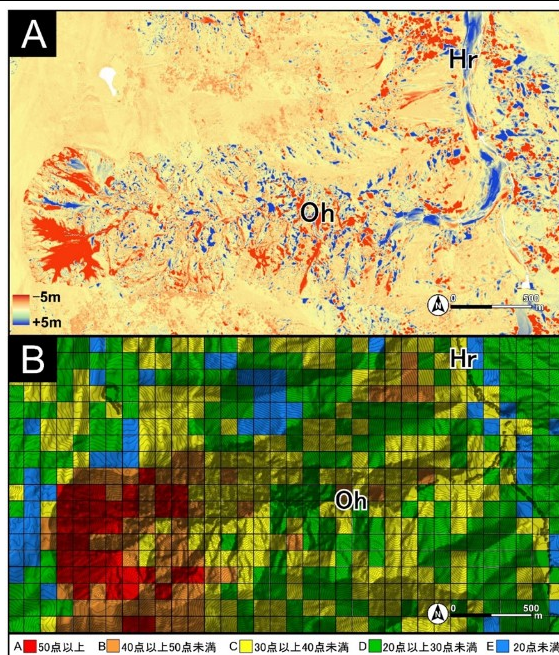


図-6 標高差分図（2006年－2015年）と土砂生産ポテンシャル図

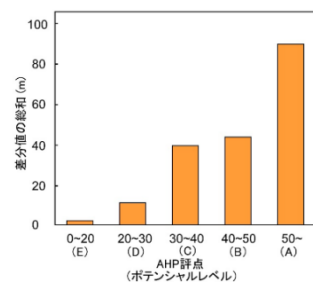


図-7 各レベルの差分総和値とAHP評点の相関

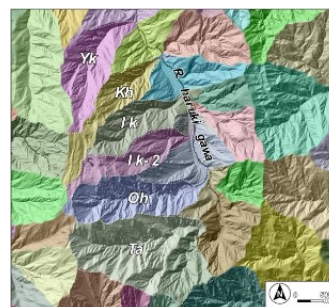


図-8 春木川左岸流域の流域区分図

⑥研究成果（つづき）

2 土砂流出シミュレーションの試み

土砂生産ポテンシャル(評価値)を初期値とした土砂流出シミュレーションを実施した。シミュレーション・ツールとして、既存のセルラーオートマトン(Cellular Automaton : CA)とマルチエージェントシステム(Multi Agent System : MA)を用いた。

図-10に示すように、CAは解析領域を規則的に配置した空間格子(セル)に分割し、セルの一つ(注目セル)がある解析ステップにおいて任意の環境や状態を有し、隣接する近傍セルの状態量の相互作用(ローカルルールとも称される)を考慮して次ステップの状態量を順次求める。全てのセルが同期して変化することにより、解析領域全体の環境や状態の変化(現象)を表現する手法である。CAの特徴は、簡単なセル間の局所的相互作用から複雑な現象を再現できることにある。

MAはエージェントと称される環境や状態を知覚して行動を起こし、また、環境や状態に影響を及ぼす要素を用いて、複数種類のエージェントを配置することで(マルチ・エージェント)それらが相互作用し、その総和として複雑な現象を表現するシステムのことである。土砂流出シミュレーション・ツールでは、環境や状態を「セル」内に表現し、土砂を構成する水、砂、礫などを「エージェント」としている。

大春木およびタル沢流域の土砂流出シミュレーションに用いる解析モデルを図-11に示す。上流域に土砂生産ポテンシャル(初期表層厚)3mの土砂を仮定し、それらの土砂が降雨によって流出する状況をシミュレーションした。図-12にシミュレーションによる土砂の侵食・堆積の様子を示す。図-12(a)は初期の土砂厚さを示しており、解析の進行に伴って谷部が侵食され(図-12(b))、大春木およびタル沢流域が土砂堆積域となる。さらに解析を進めると(図-12(c))、土砂が下流域(モデル領域外)に消出する。

以上により、土砂生産ポテンシャル(評価値)と既存のCA・MAによるシミュレーション・ツールを組み合わせることにより、土砂の生産・移動履歴を評価した土砂流出モデルを開発することができた。

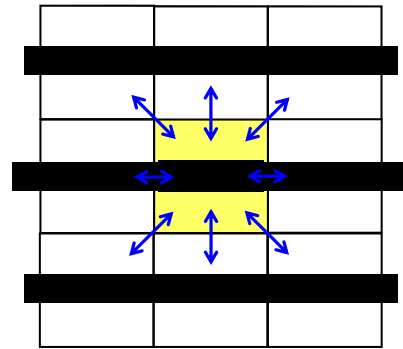


図-10 注目セル(i, j)と近傍セル

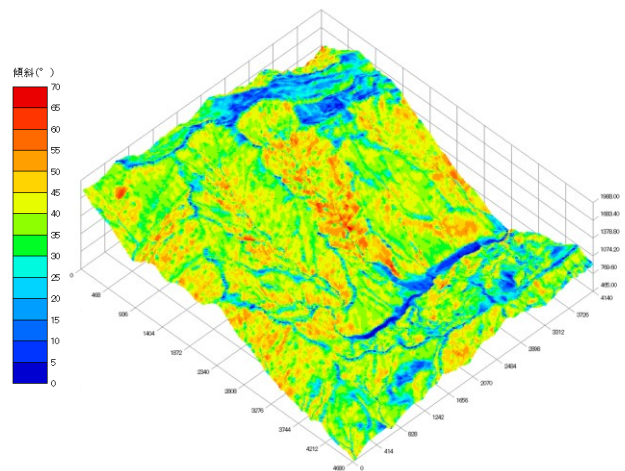


図-11 大春木およびタル沢流域の解析モデル
(カラー・コンターは各セルの傾斜を示している)

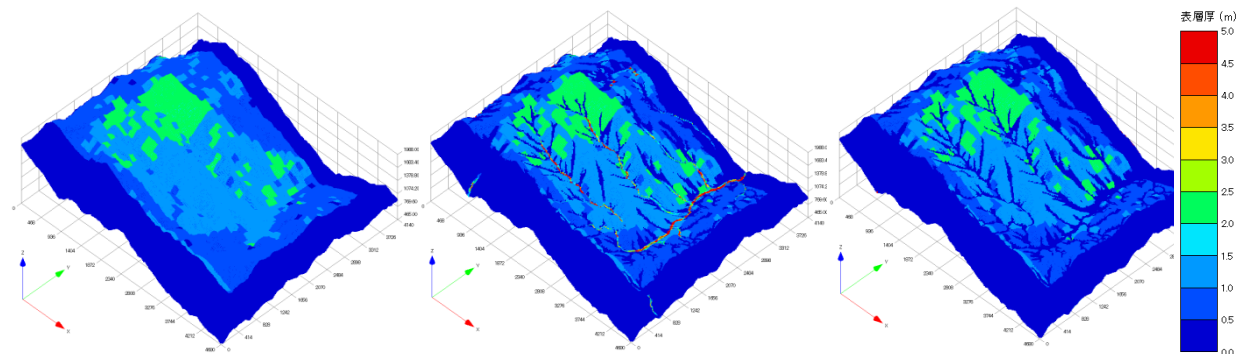


図-12 シミュレーションによる土砂の侵食・堆積の様子
(a) 初期の土砂厚さ, (b) 解析 50step, (c) 最終 step)

⑦研究成果の発表状況・予定

(本研究の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。)(以下記入例)

- ・これまでに発表した代表的な論文
- ・著書(教科書、学会妙録、講演要旨は除く)
- ・国際会議、学会等における発表状況
- ・主要雑誌・新聞等への成果発表
- ・学術誌へ投稿中の論文(掲載が決定しているものに限る)
- ・研究開発成果としての事業化、製品化などの普及状況
- ・企業とのタイアップ状況
- ・特許など、知的財産権の取得状況
- ・技術研究開発成果による受賞、表彰等

張朝，佐藤剛，檜垣大助，後藤聡，北爪貴司 (2019) : AHP法を用いた山梨県南西部春木川流域における土砂生産ポテンシャルの評価，第58回日本地すべり学会研究発表会，pp.169-170.

北爪貴司，佐藤剛，張朝，檜垣大助，後藤聡(2019) : CA/MA法による土砂流出シミュレーションの適用性検討，第58回日本地すべり学会研究発表会，pp.157-158.

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

山梨日日新聞，令和元年6月6日（木）朝刊，「土砂崩落の要因分析 山梨大と国交省 早川支流で」

⑨表彰、受賞歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

特になし。

⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や砂防政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

溪流上のある地点から上流域におけるメッシュ評点の総和として土砂生産ポテンシャルの評価を行い、メッシュ評点総和値を流域面積で除すことで流域における土砂生産ポテンシャル値とすることができる。本手法の開発は、流域管理の視点で砂防事業の優先度を比較・検討するために寄与し、総合的な土砂管理等の砂防行政に活かすことができる可能性がある。

さらに、AHP評価に用いる要因分析等を見直すことにより、本手法を他の地域でも適用できる可能性がある。他の地域・流域において、AHP評点により求めた土砂生産ポテンシャルの数値を崩壊深度と関係づけ、流域における侵食・堆積と土砂流出シミュレーションにおけるローカルルールと関係づけることができれば、他地域での土砂流出シミュレーションを行うことが可能となり、流域の源頭部から海岸までの一貫した土砂の総合管理の一助となるような将来性がある。

今回の研究課題では、AHP法を用いた土砂生産ポテンシャルの評価に「地盤工学的要因」を入れることができなかった。春木川流域の左岸および右岸から試料を採取してスレーキング特性などの風化特性について、部分的に把握することができたが、地図上で風化特性等を広域に求める手法の開発には至らなかった。今後の展望として、空中電磁探査や宇宙線ミュオン¹⁾を用いた山地斜面における広域な領域での水理・地質構造の把握が必要である。

1) 居島薫・永嶺謙忠・藤牧拓郎・鳥養映子・鈴木秀典・鈴木美季・小林拓・白木一郎・堀裕和・後藤聡(2019): 宇宙線ミュオンによる富士山透視の試み, NPO法人富士山測候所を活用する会第12回成果報告会(2019/3/17),O-12.

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、砂防政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

古第三紀の付加体地質が卓越する早川流域のような場所では、山体の重力変形による脆弱化で表層崩壊が発生しやすく、同時に過去の崩壊跡地形や溪流沿いの侵食による土砂生産場が存在する。流域土砂管理の視点では、これらの土砂生産ポテンシャルを流域単位で評価し、砂防事業の優先度検討や大規模土砂災害予知に役立てる必要がある。

ここでは、土砂生産・移動履歴を表す斜面地形発達に注目し、風化などの表層土砂生産に関係する植被も考慮した、表層崩壊を主とした流域土砂生産に関わる斜面地盤要因を選択し、それらをAHP法による重みづけから流域の任意の地点から上流の土砂生産ポテンシャルを評価する手法を提案するものである。この手法で、小流域内のポテンシャル値を比較して砂防事業優先度を比較したり、砂防施設や河川施設管理計画にも役立てることができる。