

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
	里深好文 (さとふかよしふみ)		立命館大学	教授
②研究テーマ	名称	火山地域における水文・土砂流出メカニズムの解明と土砂災害防止事業支援のための数値シミュレーション法の開発		
	政策領域	[分野] 砂防技術分野 [公募課題]	融合技術	(リモートセンシング, 非破壊検査, 認知行動学 等)
③研究経費 (単位: 万円)	平成 年度	平成 年度	平成 年度	総 合 計
	3,015	2,278	1,891	7,185
※端数切り捨て。				
④研究者氏名				
氏名		所属・役職 (※平成 年3月31日現在)		
宮本 邦明		筑波大学生命環境系・教授		
藤田 正治		京都大学防災研究所・教授		
小杉 賢一朗		京都大学大学院農学研究科・教授		
権田 豊		新潟大学農学研究科・准教授		
堤 大三		京都大学防災研究所・准教授		
水野 秀明		(国) 土木研究所・上席研究員		
今泉 文寿		静岡大学大学院農学研究科		
宮田 秀介		京都大学防災研究所・助教		
中谷 加奈		京都大学大学院農学研究科・助教		
山川 陽祐		筑波大学生命環境系		
江頭 進治		(独)土木研究所・研究・研修指導監		
執印 康裕		宇都宮大学・教授		
菊池 喜昭		東京理科大学・教授		

堀田 紀文	筑波大学・准教授
竹林 洋史	京都大学・准教授
二瓶 泰雄	東京理科大学・教授
清水 義彦	群馬大学大学院・教授
田中 規夫	埼玉大学大学院・教授
藤沢 和範	(国)土木研究所・土砂管理研究グループ長
畑山 満則	京都大学・教授
神谷 大介	琉球大学・准教授
鼎 信次郎	東京工業大学・教授

⑤研究の目的・目標

火山地域において今後とも発生が予想される土砂災害を科学的根拠に基づいて効果的に防止・軽減するため、次の(1)～(10)について、現地調査・観測、資料解析、室内実験及び数値シミュレーション法を通じて究明する。すなわち、(1)降雨浸透・流出機構の解明・予測技術の開発、(2)深層・表層崩壊発生機構の解明・予測技術の開発、(3)崩壊危険度評価法と危険斜面の抽出法、(4)崩壊発生の限界降雨条件、(5)泥流の流動機構および泥流による危険領域の推定法、(6)流木の生産・流出・捕捉機構と氾濫に対する影響評価法、(7)火山地域の土砂・流木流出機構の解明・予測技術の開発、(8)災害対応策、(9)地球温暖化による降雨特性値の変化と災害外力に対するその影響の評価、さらに(10)これらの技術を統合することによって、火山地域の土砂流出に対する予警報システムと効果的かつ効率的な砂防施設的设计・配置を支援するシステムを提案する。

⑥研究成果

(1) 降雨浸透・流出機構の解明・予測技術の開発（里深G）

(1-1)火山灰ならびに火山性土壌の飽和・不飽和水分特性の計測技術の開発

火山灰ならびに火山性土壌の飽和・不飽和水分特性（土壌の体積含水率 θ と圧力水頭 ψ の関係、ならびに土壌の透水係数 K と ψ の関係）を、簡易かつ低コストで計測するために、蒸発法に基づく新たな実験装置を開発した（**図 1.1**）。本装置は、従来装置と異なり動水勾配計測に分解能の高い差圧計を用いることで、透水係数算定精度の大幅な向上を図っている。また、従来装置と異なり下面から水分蒸発させることで、飽和定常浸透法を同時に行える利点がある。さらに、**図 1.1**右端に示した多孔質板アタッチメントを取り付けることで、不飽和定常浸透法にも容易に応用できる。

本装置を用いて、伊豆大島の火山灰や火山性土壌の飽和・不飽和水分特性の計測を行った。実験では、テフラ（火山灰土）とレス（風積土）を100 cc サンプラーに詰め、それぞれに対し3回の繰り返しで行った。**図 1.2**に、テフラとレスの全ケースで得られた $K-\psi$ 曲線を示す。図中には、蒸発法の3ケースに加えて飽和透水係数 K_s を示している。テフラは湿潤領域において不飽和透水係数 K が高く、乾燥に伴い K が指数関数的に減少する曲線が良好に計測されており、繰り返し実験による再現性も概して高かった。ただし飽和付近において値に乱れがみられ、乾燥に伴う K_s からの連続的な低下も得られなかった。レスの K は湿潤領域においてテフラより2オーダー程度小さい一方、乾燥に伴う減少が緩やかな傾向がみられた。繰り返し実験による再現性も高く、テフラとは異なり、飽和付近における K の乱れもなく、乾燥に伴い K_s の値から連続して低下する良好な計測結果が得られた。

図 1.3には、湿潤領域（ $0 > \psi > -100 \text{ cmH}_2\text{O}$ ）におけるテフラの $K-\psi$ 曲線を拡大して示した。この図より、テフラは蒸発法により $\psi < -35 \text{ cmH}_2\text{O}$ 、 $K < 5.09 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ の範囲で信頼性の高い計測が行われたが、それより湿潤側は計測が不安定であったといえる。これは本装置による蒸発法計測の有効範囲を示しており、2本のテンシオメータ間の動水勾配が約0.0054以上の範囲が計測可能区間であることが、経験的に示された。一方、既往研究の計測範囲は概ね $K < 1.0 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ である。このように本装置は計測精度の向上により、 K の計測可能範囲を従来装置より2オーダー程度引き上げることに成功した。さらに**図 1.3**には、不飽和定常浸透法（定常法）で計測された $K-\psi$ 曲線も併せて示した。計測値は $-4 > \psi > -40 \text{ cmH}_2\text{O}$ 、 $2.0 \times 10^{-3} > K > 2.5 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ の範囲に存在し、乾燥に伴う連続的な減少傾向を示した。さらに、飽和側では K_s と、乾燥側では蒸発法による $K-\psi$ 曲線と良好な連続性を示した。以上から、飽和付近の湿潤領域における透水係数が大きいテフラの場合は、蒸発法と不飽和定常浸透法を組み合わせることにより、飽和から乾燥領域までの全域において連続的な $K-\psi$ 曲線を計測できることがわかった。一方、飽和付近の透水性が低いレスの場合は、蒸発法のみで連続的な $K-\psi$ 曲線を計測できることが示された。

水分特性曲線（ $\theta-\psi$ 曲線）に関しては、従来の加圧板法による計測結果と比較することで、蒸発法により計測された水分特性曲線が十分な精度を持つ事例を示すことができた。蒸発法では、加圧板法に比べて計測時間を大幅に短縮できた。

以上のように、本研究開発によって、火山灰や火山性土壌の飽和・不飽和水分特性を迅速かつ容易に計測できる装置ならびに手法を提示することができた。

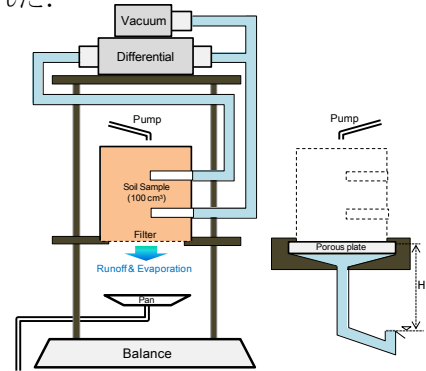


図 1.1 蒸発法装置本体とアタッチメント

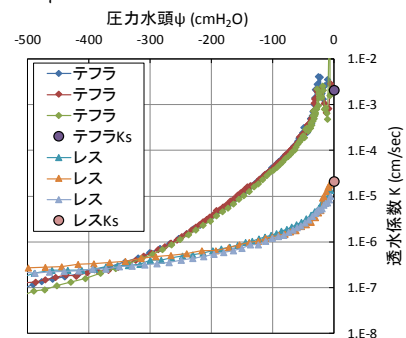


図 1.2 蒸発法で計測した $K-\psi$ 曲線

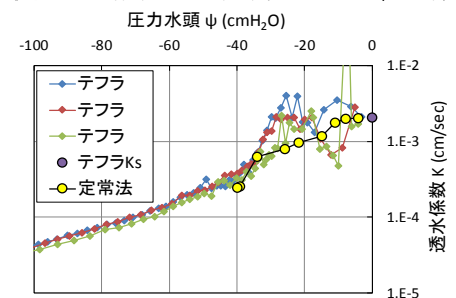


図 1.3 $K-\psi$ 曲線の拡大図（テフラサンプル）

⑥研究成果 (つづき)

(1-2) 継続的な火山灰供給と降雨履歴による表面流出発生特性の定量的評価法の構築

現地降雨実験から得た累積降雨と表面流出率の関係とX-band MPレーダから推定した降灰量時空間分布を降雨-流出モデルに組み込むことで、降雨の累積により火山灰層表面に形成されるクラストが表面流出を促進し(図1.4)、流域の流出が増大することが示された(図1.5)。また、2010年のメラピ火山噴火後の、Putih川、Gendol川における土石流発生頻度と上流域のNDVIの関係から、上流域のNDVIが0.4未満の面積割合の経年変化により土石流の発生頻度やピーク流量の経年変化を推測できること、特にNDVIが0.4未満の割合がPutih川、Gendol川ともに火山噴火前の値になると土石流が発生しなくなることがわかった(図1.6、図1.7)。

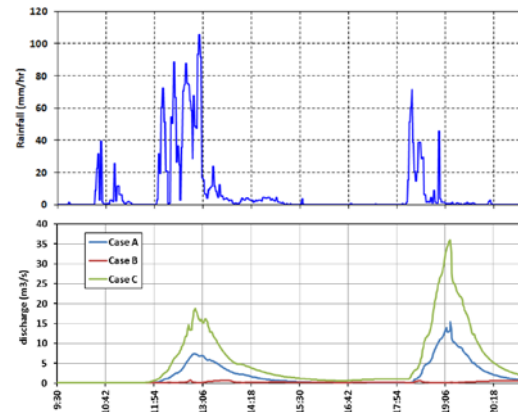


図1.5 (Case A) 固定の浸透能, (Case B) 累積降雨がなくクラスト未形成, (Case C) 累積降雨 200 mm でクラスト形成での桜島・有村流域における流出量計算結果

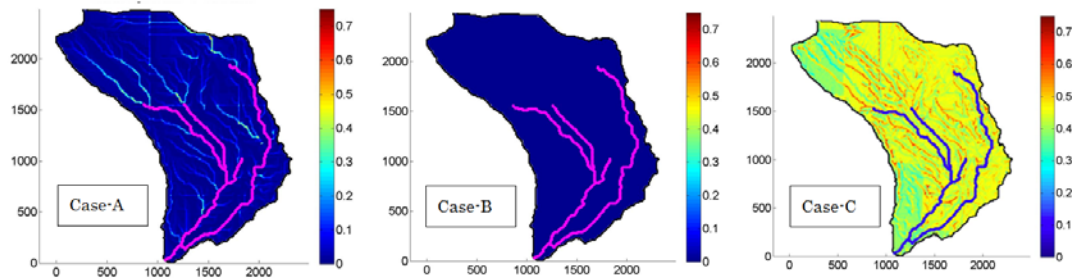


図1.4 (Case A) 固定の浸透能, (Case B) 累積降雨がなくクラスト未形成, (Case C) 累積降雨 200 mm でクラスト形成での桜島・有村流域における表面流水深計算結果

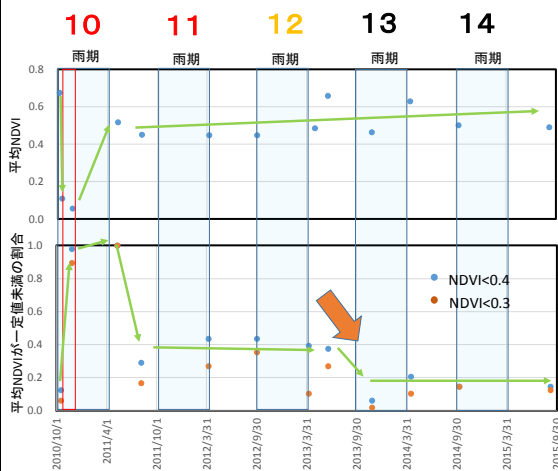


図1.6 Putih川上流域における平均NDVIとNDVIが一定値未満の面積割合

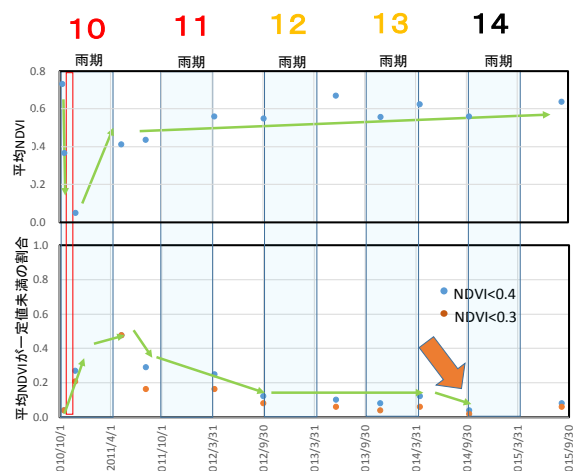


図1.7 Gendol川上流域における平均NDVIとNDVIが一定値未満の面積割合

⑥研究成果（つづき）

（２）深層・表層崩壊発生機構の解明・予測技術の開発（里深G）

(2-1) 深層崩壊のメカニズムと崩壊規模の予測

降雨波形と崩壊規模の対応について検討するため、昨年度までに開発したCPMPによる現地調査、および多層構造を有する斜面における間隙水圧モデルを用いた解析を熊本県阿蘇地域で実施した。間隙水圧モデルに3つの崩壊発生降雨（1990年、2001年、2012年）を与えたところ、間隙水圧が大きく上昇するすべり面が降雨ごとに異なることが示された。このことは、同一地域であっても降雨波形によって崩壊の規模（深さ）が変化する可能性を示しており、予測される崩壊の規模に応じた警戒避難を行う重要性が示唆された（図2.1～2.3）。

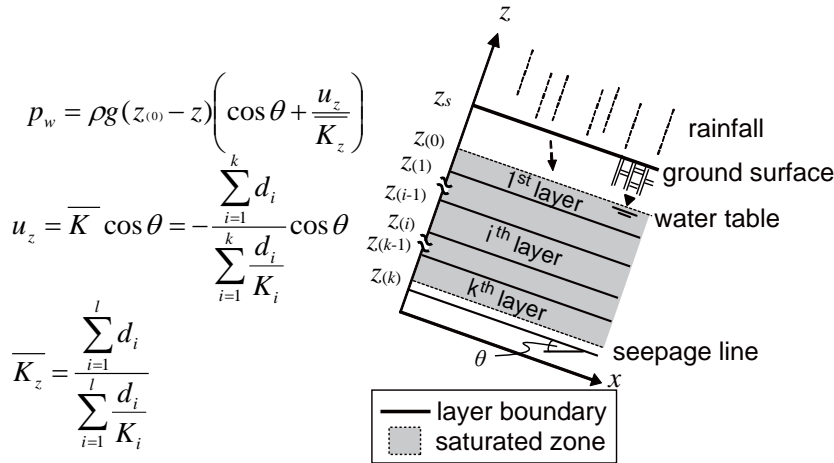


図 2.1 多層構造を有する斜面の間隙水圧モデル（一昨年度導出）

深さ(m)	透水係数(cm/s)	間隙率
0		
0.5	7.8 × 10 ⁻³	0.5
1.0	2.2 × 10 ⁻³	0.5
1.5	3.9 × 10 ⁻³	0.5
2.0	2.2 × 10 ⁻³	0.5
2.5	3.9 × 10 ⁻³	0.5
3.0	1.7 × 10 ⁻⁴	0.5

図 2.2 CPMP, 透水試験により求めた阿蘇地域における土層構造

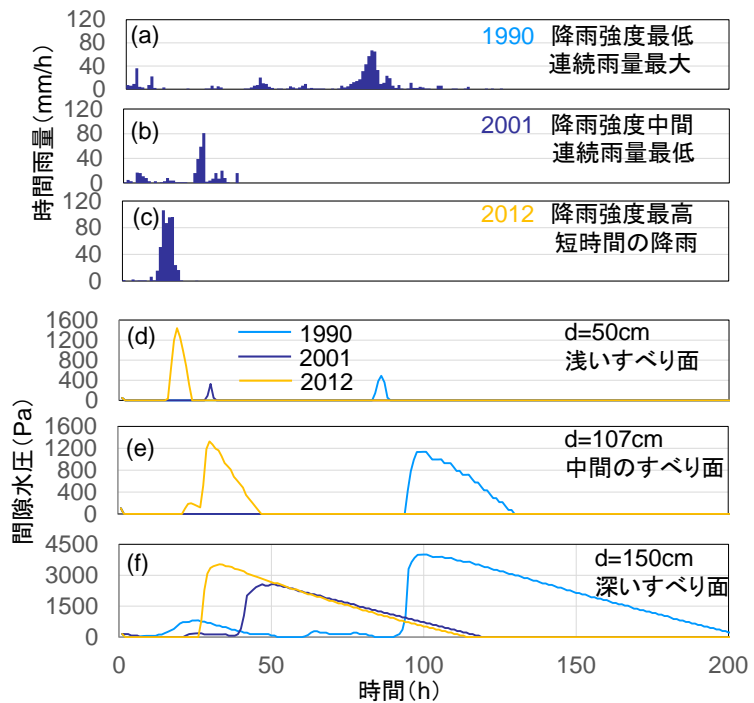


図 2.3 阿蘇地域において土砂災害を発生させた降雨の降雨波形 ((a)1990年6月29日～, (b)2001年6月28日～, (c)2012年7月11日～) と、多層構造斜面の間隙水圧モデルによって計算された深さごとの間隙水圧の変化 ((d)～(f))

⑥研究成果 (つづき)

(2-2) 植生を考慮した表層崩壊発生機構と予測モデルの構築

昨年度までに開発したストリームチューブによって流域全体を分割しそれぞれのチューブ単独で降雨浸透・流出と斜面安定を解析する手法を用い、伊豆大島災害流域での解析を高精度で実施するとともに、広島災害流域でも解析を実施した(図2.4, 2.5)。その結果、火山地域である伊豆大島流域のように比較的土層深が均一で、しかも土層物理性も均質な対象においては、非常に精度良く崩壊発生箇所を再現計算できることが示された。一方で、広島災害流域の様な花崗岩等の地質からなる流域では、実際の崩壊箇所を精度良く再現することができなかつた。これは、広島災害流域が伊豆大島流域

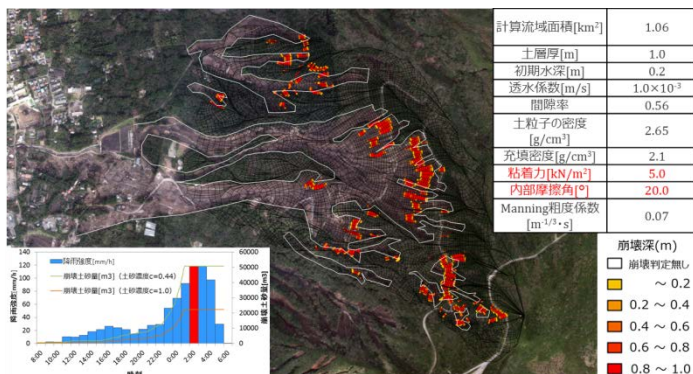


図 2.4 伊豆大島災害解析結果 (表層崩壊)

に比較して、土層深や物理特性の不均一性が大きい地域である事から、それらを均一な値と仮定した本研究での解析が不十分であることが大きな原因であると考えられる。また、流出解析では、降雨の土層内での不飽和鉛直浸透を無視している事も、現象を正確に再現できない原因でもある。

伊豆大島での表層崩壊解析結果において、それぞれのチューブで発生した単独の崩壊土を等加速度運動させて、崩壊下端を通過した土塊が土石流化するとして斜面領域において土石流の流下挙動を解析した。その結果を図2.6に示す。この解析結果においては、斜面崩壊が降雨ピーク前に徐々に発生し、滑動した土塊は水分不足のため崩壊面直下に一旦堆積した後、降雨のピークに伴って急増する表面流流量によって、再度流動化して土石流となり、斜面領域下部においてピーク波形をもつような挙動を示すことが解析されている。この土石流流量変化を下流での土石流氾濫・堆積挙動を解析する手法に対して、土石流供給波形として提供することができ、降雨浸透・表層崩壊・土石流流下・氾濫・堆積の土石災害に関わる一連の挙動を解析することが可能となった。

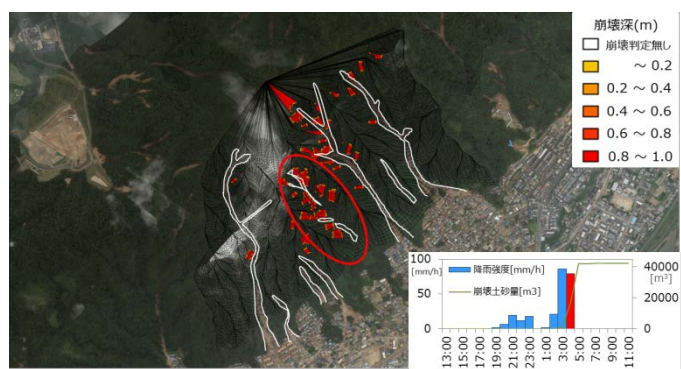


図 2.5 広島災害解析結果 (表層崩壊)

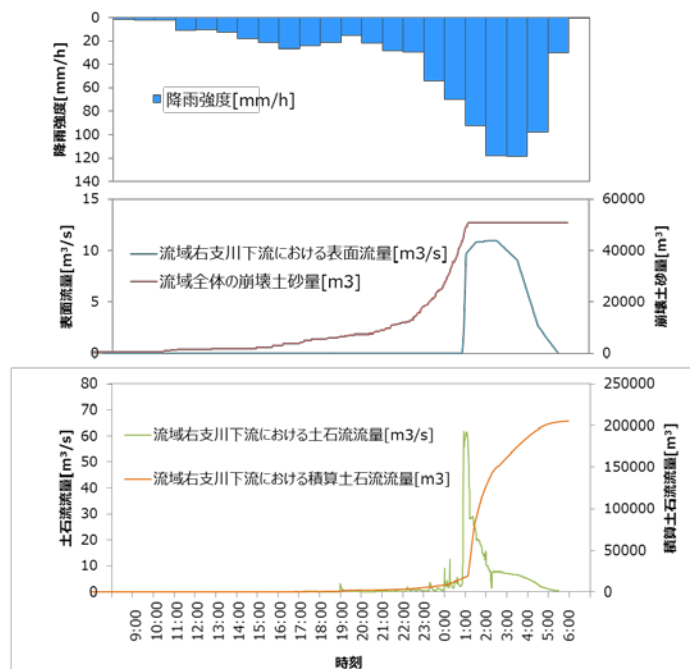


図 2.6 伊豆大島災害の表層崩壊解析結果から土石流流量への連続解析結果 (上図: ハイエトグラフ, 中図: 崩壊土砂積算量と表面流流量, 下図: 土石流流量)

⑥研究成果（つづき）

（3）崩壊危険度評価法と危険斜面の抽出法（江頭 G）

（3-1）崩壊発生危険度評価法

本年度の研究成果は、分布型崩壊概念モデル（以後は **DLCM** と称する）による崩壊発生危険度評価法（成果①）と、降雨確率に対応した崩壊危険斜面の抽出法（成果②）の2つである。成果①は、豪雨の崩壊発生危険度評価に関し、分布型崩壊概念モデル（以後は **DLCM** と称する）からの出力指標による評価の有効性および既往指標に対する優位性について、土壌雨量指数との比較によって検討したものである。成果②は、ハード対策等における外力設定、土砂災害発生時の降雨外力の評価等について一般に確率降雨が用いられていることを踏まえて検討したものであり、成果①をベースとしている。対象範囲は過去に2度の豪雨（1958年狩野川台風、2013年台風26号）により土砂災害が発生した東京都伊豆大島の西側区域（面積約10.1km²）に設定した。

検討対象豪雨として大島観測所の降雨データ（1950年から2015年までの期間）を対象に、各降雨イベントの中から、1, 2, 3時間最大雨量、土壌雨量指数最大値のいずれかが上位10位に入るものを抽出した。結果として、過去に災害が記録されている2013年台風26号および1958年狩野川台風の2イベントを含む22イベントを抽出した。**DLCM**は窪田らによって提案された分布型ブロック集合モデルに準拠する。本モデルは対象空間範囲に対し一定の大きさに分割された矩形セルを基本要素とし、地下水計算過程および無限長斜面安定解析による崩壊判定過程の2過程から構成される。計算手順は基本要素の平均飽和度に対して地形勾配に応じた側方流動とセル底面からの鉛直浸透流を発生させ、次の時間ステップにおいて水収支の連続条件より計算される飽和度から地下水位を計算する手順をとる。

DLCM 出力指標による崩壊発生危険度評価法（成果①）：対象豪雨の入力に対しモデル出力は崩壊発生危険斜面数の時間変化として算出される。崩壊危険斜面の最大値（**MNUC**）を崩壊発生危険度評価指標とし、**MNUC**出現時刻における土壌雨量指数（**SWI_{max}**）と比較した結果を図3.1に示す。図3.1にて決定係数が0.91であり、**DLCM**の出力値と極めて高い正の相関関係を示している事実は**MNUC**の有効性が**SWI**の有効性と同等に担保されていることを示す。また**SWI_{max}**、**MNUC**の両指標値の最上位2つが災害発生降雨イベントと対応しているが、**SWI_{max}**は**DLCM**から導出された指標であり、**SWI**単独のみでは本結果を得ることが出来ないことを確認している。このことは、**DLCM**出力値のみの単一指標による危険度評価の可能性を示唆し、**DLCM**の指標値による評価手法の優位性をある程度まで支持する。

降雨確率に対応した崩壊危険斜面の抽出法（成果②）：2つの災害発生降雨を対象に実降雨波形を**DLCM**に入力した場合の**MNUC**の空間分布と実際の崩壊・土砂流出範囲が明確となっている台風26号の表層崩壊・土砂流出範囲を比較することで検証した。結果を図3.2に示す。本図より大規模な土砂災害が発生した台風26号の崩壊危険斜面の範囲と実際の崩壊・土砂流出範囲が概ね対応していること、また台風26号による崩壊の特徴として、狩野川台風では見られなかった大金沢の上部山腹斜面に位置する平滑斜面において大規模表層崩壊が発生したことがあげられるが、これについてもある程度まで再現している。以上の結果は、**DLCM**による空間分布評価の妥当性を支持するものである。

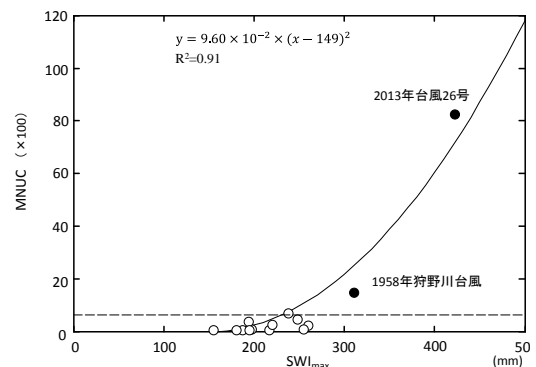


図 3.1 **SWI_{max}** と **MNUC** の関係

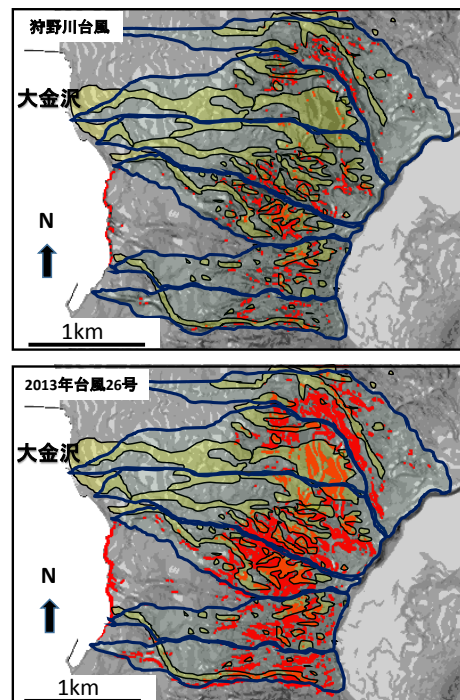


図 3.2 両台風による崩壊危険斜面【赤】と台風26号の崩壊・土砂流出範囲【黄】

⑥研究成果 (つづき)

(3-2) 崩壊率に着目した崩壊危険斜面の抽出法

山崎らは(2016a, 2016b) 豪雨に伴う山腹崩壊や土石流の時空間分布を予測し、それに伴うハザードを評価するための土砂災害シミュレーターの構築に努めている。シミュレーターのエンジンは、地形モデル、降雨流出モデル、及び崩壊・土石流の発生・非発生モデルから構成されている。ここで、地形モデルは、標高に関する5メートル×5メートルメッシュあるいは10メートル×10メートルメッシュの数値データを用いて再現され、地形表層は崩壊を引き起こす表土層とその下層から構成されている。降雨流出は、浸透流および表面流から構成され、これらの流れは、平面2次元座標を用いて記述され、浸透流はダルシー則に従い、表面流は拡散波近似に従うものとされている。さらに、崩壊の発生・非発生は、無限長斜面の力のつり合い条件を用いて判定される。

上述のモデルを用いて豪雨時の山腹崩壊の時空間分布を予測するためには、地形表面を構成する表土層の水文・土質パラメーターを設定する必要がある。しかし、対象流域において、表土層の厚さ、浸透能、透水係数、内部摩擦角および粘着力を適切に定める必要があるが、表土層の厚さ以外のパラメーターについては、実験等によってこれらを定めることは容易ではないし、それは、これまでの経験から判断すると合理的でもない。そこで、2013年伊豆大島豪雨災害、2014年広島豪雨災害及び2016年岩手県小本川豪雨災害において、小流域を抽出し、それぞれの小流域において一定の値を用いて実際の現象をどの程度表現できるかを調べた。一例として、小本川の例を示す。

図3.3は、2016年小本川豪雨災害を対象としてシミュレートした山腹崩壊である。図の上段には降雨分布が示されている。空中写真には崩壊土砂の移動痕跡も示されている。予測された崩壊は、移動痕跡の源頭部近傍にあって、この流域においても崩壊は的確に予測されている。

上述の解析は、1平方キロメートル程度あるいはそれ以下の小流域を対象として行われている。これらの結果によれば、表土層の厚さや透水係数、摩擦角、粘着力などの水文・土質パラメーターを一定とした取り扱いにかかわらず、山腹崩壊や土石流の発生分布はほぼ適切に予測できることが示されている。このことは、これらのパラメーター以外に崩壊を支配するパラメーターとして、斜面勾配とその地点の流域面積が考えられ、この二つのパラメーターによって、崩壊の起こり易さが表現できることを示唆している。そこで、2014年広島豪雨災害を対象として、各メッシュの流域面積と勾配に着目して、所定の降雨に対する各メッシュの崩壊率を調べてみる。ここでは、降雨に対する各メッシュの抵抗力の強弱を調べるのが目的であるから、一定強度の降雨を考えておけば十分であり、ここでは雨量強度80mm/hの降雨を崩壊数がそれ以上増加しなくなるまで与えて、崩壊の発生を調べた。図3.4は、この結果を各メッシュの勾配と流域面積の平面上において調べたものである。これによれば、崩壊は勾配と流域面積に支配されており、勾配が急なほど、また、流域面積は大きいほど崩壊に対する抵抗力は小さくなることが分かる。以上より、各メッシュの斜面勾配と流域面積に着目すれば、地盤標高に関する数値データを用いて崩壊危険斜面の抽出が容易にできるものと推察される。

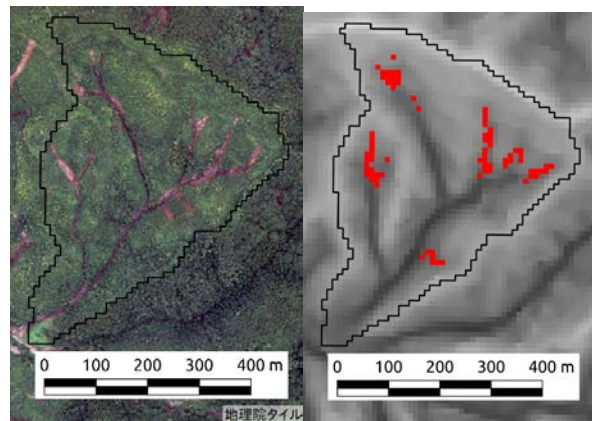


図3.3 小本川小溪流の崩壊分布予測 (2016年8月)

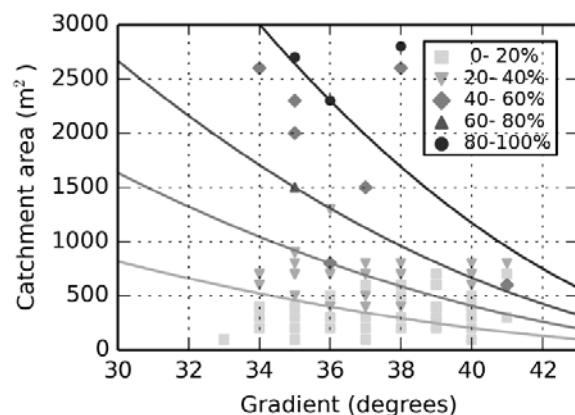


図3.4 各メッシュの勾配と流域面積の平面上における各メッシュの崩壊率 (2014年広島豪雨災害、県営緑ヶ丘住宅に流入する小流域)

⑥研究成果 (つづき)

(4) 崩壊発生の限界降雨条件 (江頭 G)

(4-1) 崩壊発生の限界降雨条件

本年度は、有珠山、阿蘇山などで土層構造の調査を実施した。調査には土壌水分計付貫入抵抗試験機 (CPMP) を用いた。調査地点では土層の断面構造も記録した。また、各層の不攪乱土壌サンプルを採土円筒により採取し、持ち帰り分析し、土壌水分、および飽和透水係数を求めた。

有珠山火口縁南側斜面 (図省略) と、阿蘇山箱石峠付近 (図4.1) における土層構造、CPMPによる測定と透水試験の結果の比較から、土層構造に対応した貫入抵抗値と体積含水率、飽和透水係数の深度分布が見られた。貫入試験の結果は、有珠山南斜面では、軽石を多く含む層で貫入抵抗値が大きくなるが、阿蘇山では層序に応じて変化するが、レスやテフラの組成との対応関係は明確ではなかった。一方で、体積含水率についてはレス層で高いという結果は共通した。飽和透水係数はレス層で高かった。

体積含水率と飽和透水係数について全データを比較し、場所によらず同一曲線上にプロットされた (図4.2)。ただし、場所によってプロットが存在する範囲は異なった。これらの結果は次の2つの点で意味をもつ。まず、CPMPで得られる体積含水率の鉛直分布に基づき、崩壊発生の限界降雨条件に関わる透水係数に関して、おおまかな土層構造を推定することが可能だと考えられる点である。もちろん土壌水分は降雨などに伴い時間的に変動する。しかしながら、伊豆大島における長期的な観測結果から分かるように、特に根系による吸水の影響が小さい深度 (伊豆大島、有珠山、阿蘇山では数十cm以深) では、保水性 (透水性) に応じて降雨停止後に体積含水率は急激に低下する一方で、以降の無降雨期間の減少は緩やかであることが図4.2の結果になる。次に、崩壊発生の際にすべり面となるレス層の透水性は地域によって異なると考えられる点である。レス層 (風成層) は基本的には風で運ばれた微細な土砂の堆積によって構成される層なので、地域によらず同様な組成を取る可能性もあったが、図4.2から、レス層に関しても実際には地域ごとに異なる組成を呈すると考えられる。したがって、崩壊発生の危険雨量を評価するためには、すべり面となるレス層の透水係数を火山地域ごとに調査する必要がある。

昨年度までの研究成果より、伊豆大島のように基岩が明確に存在しない火山地域では、豪雨時に相対的な難透水面となるレス層上に一時的な地下水位が形成されることで斜面崩壊が発生すると考えられた。地下水位形成への側方流の影響が小さいため、鉛直浸透プロセスと (無限長) 斜面安定解析の組み合わせで崩壊発生の限界降雨条件を得ることが可能となる。本年度の成果より、伊豆大島以外の火山地域でも同様の取り扱いができる可能性と、崩壊発生の限界降雨条件を簡易に明らかにするためにCPMPによる調査が有効であることが示唆された。

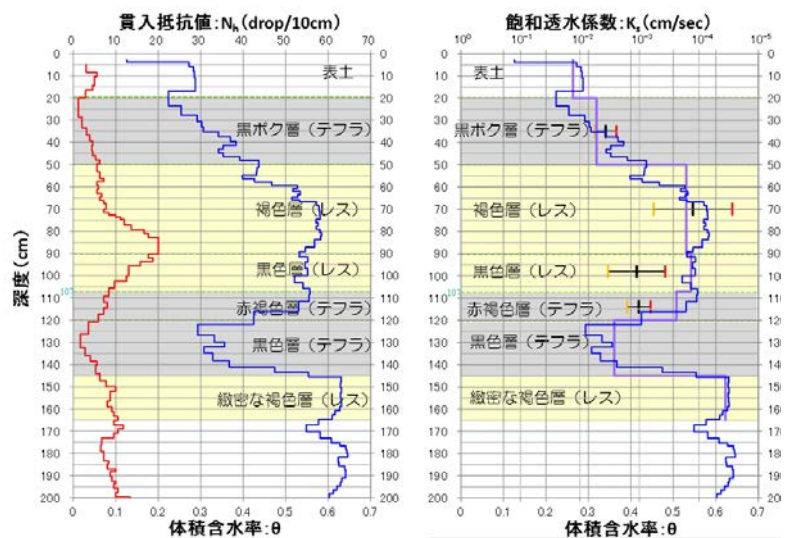


図4.1 阿蘇山 (箱石峠) における土層調査結果

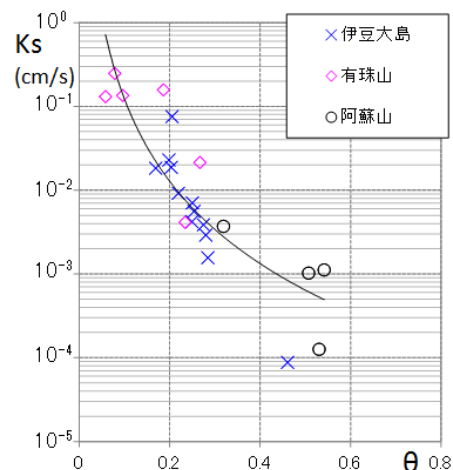


図4.2 体積含水率と飽和透水係数の関係

⑥研究成果 (つづき)

(4-2) 土砂災害発生の限界降雨条件

現在、豪雨に伴う土砂災害危険度情報は、所定の正方メッシュに3段タンクモデルを適用して降雨流出計算を行い、それから求められる土壌雨量指数に基づいて配信されている。この情報は、5キロメートル四方あるいは1キロメートル四方の領域において、これまでに雨水がどの程度貯留されているかを示したものであって、災害発生の危険度を定性的に知るためには有効である。ただし、この情報は、土壌雨量指数と一時間雨量の平面上において、災害の発生と非発生を議論するものであって、そのために収集された資料に対応した地域の災害情報であり、個々のメッシュに対応した情報ではないことに留意する必要がある。

土砂移動等のハザードに着目すれば、災害の地域性は、地形特性および水文・土質特性の違いに依存するものと思われる。さらに、小流域に着目すれば、透水係数、表土の摩擦角および粘着力を一定とした扱いによって崩壊・土石流の発生がかなり精度よく予測できることも分かっている。そこで、連続雨量と一時間雨量の平面上における崩壊の発生数に着目して土砂災害発生の限界降雨条件を検討する。

図4.3は、伊豆大島大金沢において、一定の雨量強度、例えば、30mm/h、60mm/h、90mm/h・・・を持つ降雨を長時間与えて、小流域においてそれぞれ、200、300、400、・・・及び700箇所の崩壊を生じる降雨条件を連続雨量と一時間雨量の平面上で求めた曲線群である。図には、過去の大雨がスネーク曲線で示されている。これらの大雨のうち、土砂災害があったのは、1958年狩野川台風の時の雨と2013年の雨である。1981年と1982年にもかなり激しい雨はあったが、それらによる土砂災害の報告は見られない。1958年と2013年の雨が曲線を横切りそれ以外の雨は曲線を越えていないところの曲線を捜すと、崩壊数500を生じる曲線がそれに該当する。このようにして見いだされた曲線は、土砂災害発生の限界降雨条件を表すものと推察される。

図4.4は、図4.3で求めた限界降雨条件および2013年伊豆大島災害をもたらした降雨をスネーク曲線で表現したものである。上述したように、図の曲線は大金沢流域における土砂災害発生の限界降雨条件に相当するものである。

上述の方法によれば、所定の崩壊数を生じる降雨条件が、連続雨量と一時間雨量の平面上において曲線群として求められ、過去の災害データが一つでもあれば、曲線群の中の一つの曲線が指定される。指定された曲線は、土砂災害発生の限界降雨条件に相当することから、複数の災害データがなくても、限界降雨条件の設定ができる。

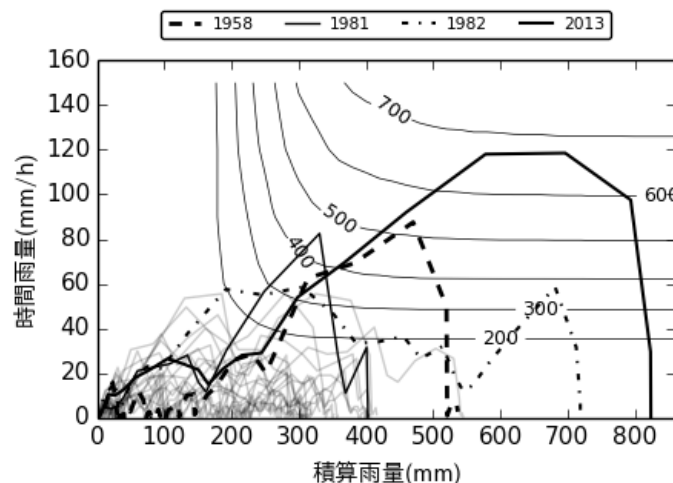


図 4.3 流域において所定の崩壊数を生ずる降雨条件（大金沢，伊豆大島）

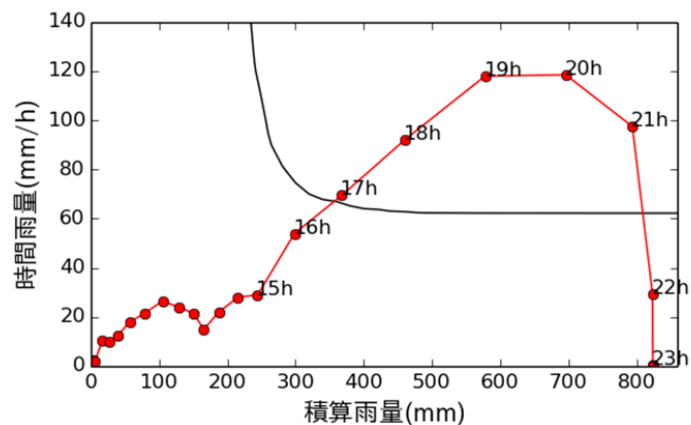


図 4.4 伊豆大島大金沢における土砂災害発生の限界降雨条件

⑥研究成果（つづき）

（５）泥流の流動機構および泥流による危険領域の推定法（江頭G）

（5-1）泥流・土石流の規模の決定機構

微細土砂の相変化現象の特性が泥流の流動特性に与える影響などを検討するため、粒径の小さい土砂を主材料とした土石流（泥流）を対象とし、斜面崩壊起源の土石流（泥流）の数値シミュレーションを実施した。対象とした土石流（泥流）は、2014年に発生した広島市安佐北区可部東地区の土石流（泥流）である。対象とした土石流（泥流）は、伊豆大島で2013年に泥流発生した地域と同様に粒径の小さい土砂を主材料としている。計算対象地域は広島市安佐北区可部東地区の南側の斜面であり、平均斜面勾配が約22度で斜面の下には家屋が存在する。家屋の下には、南西に面した約8度の緩やかな斜面が存在する。斜面から流出してきた土砂は非常に細かい。解析では、細粒土砂の相変化を考慮している。つまり、静止状態の土砂が流動化することにより、土砂の中の細粒土砂が水と混合して流体化すると考えている。なお、粒径の大きい土砂はそのまま固体として振る舞う。

図5.1に数値シミュレーションにより得られた相変化を無視した場合の流動深の時間的な変化を示す。また、図5.2に同一の条件で、相変化を考慮した場合の流動深の時間的な変化を示す。相変化を無視すると、土石流（泥流）は急勾配斜面下端で静止し、さらに下流には流れていない。しかし、相変化を考慮すると、平均斜面勾配8度の下流の緩勾配区間まで土石流（泥流）が流れていることがわかる。つまり、細粒土砂の相変化により、土石流（泥流）の流動性が高まることがわかる。土石流（泥流）は急勾配斜面下端の家屋よりもさらに下流に流れ、細粒土砂が多い2014年に発生した広島市安佐北区可部東地区の土石流（泥流）でも、伊豆大島の泥流と同様に細粒土砂の相変化が発生していると考えられる。

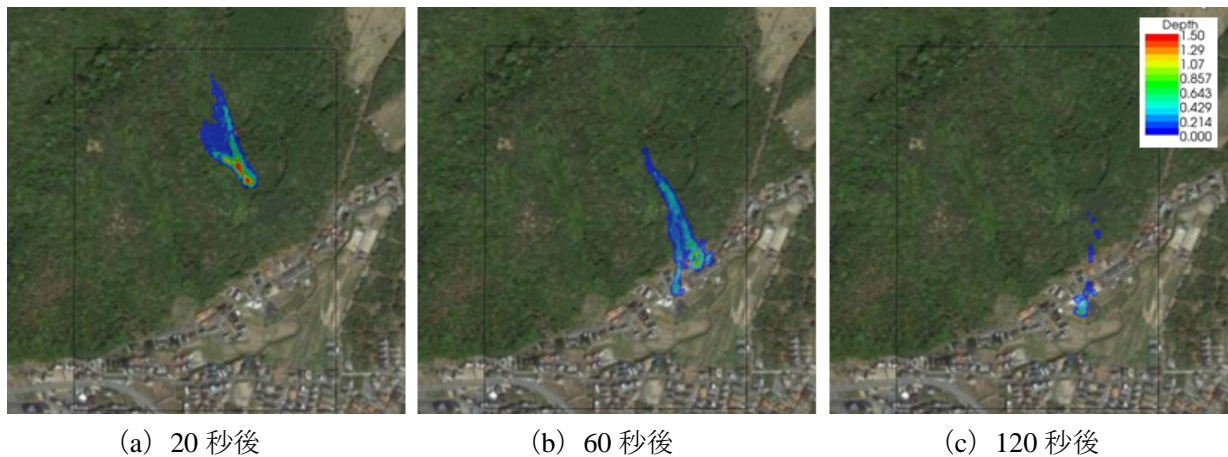


図 5.1 流動深の時間変化（相変化無視）

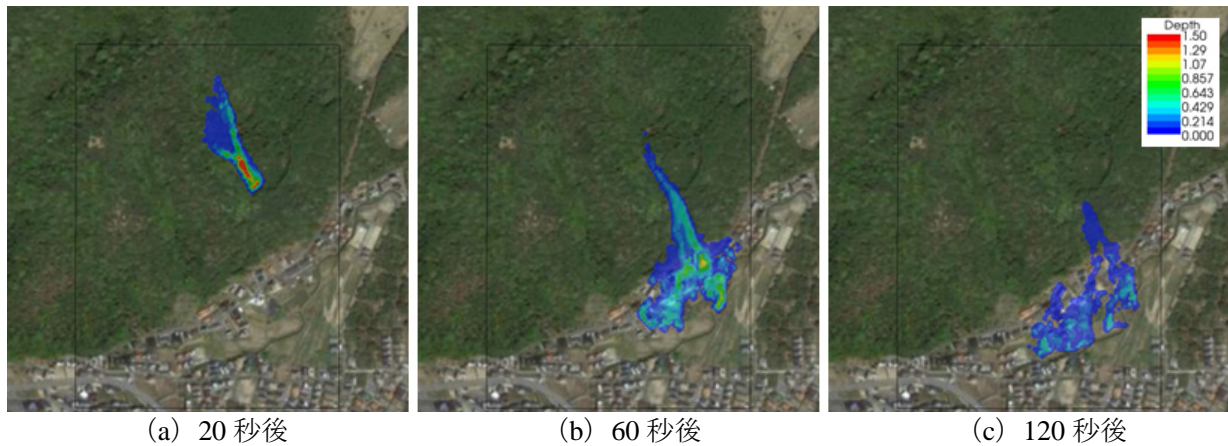


図 5.2 流動深の時間変化（相変化考慮）

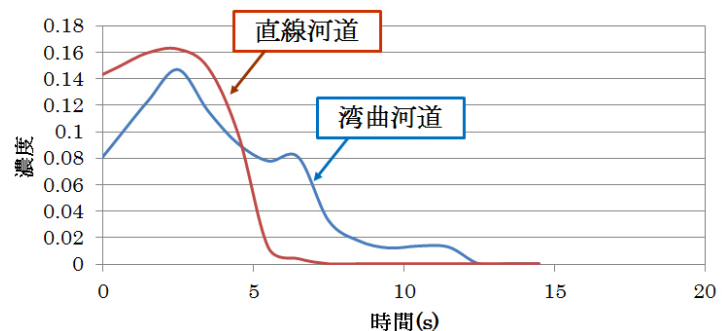
⑥研究成果 (つづき)

(5-2) 蛇行河道における泥流の流動特性

既存の土石流の研究は直線水路を対象としたものがほとんどであるが、実溪流の多くは湾曲部を有しており、土石流の流動特性に大きな影響を与えていると考えられる。そこで、本実験は、直線河道と湾曲河道の2種類の水路形状で実験を行った(図5.3)。これより、直線河道であれば、水路下流端での濃度はピークを一つだけ有し、土石流先端部の濃度が非常に高い。一方、湾曲河道では、湾曲部で一時的に土砂が堆積し、それらが後続流で再浸食される現象が発生するため、濃度のピークが複数現れるとともに、土石流先端部の濃度が直線部よりも低下する一方、土石流の後続流の土砂濃度が高いことがわかる。



(a) 実験水路



(b) 水路下流端での濃度の時間変化

図5.3 実験水路と水路下流端での濃度の時間変化

(6) 流木の生産・流出・捕捉機構と氾濫に対する影響評価法 (江頭 G)

(6-1) 橋梁部における流木捕捉状況と洪水氾濫への影響

<シミュレーションによる検討>

橋梁部における流木捕捉状況とそれが洪水氾濫に及ぼす影響を調べるために、山形県・吉野川を対象とした流木捕捉・洪水氾濫調査のデータ解析を行うとともに、洪水氾濫シミュレーションを実施した。対象洪水イベントは2014年7月の台風12号接近時である。この時には、図6.1(b)に示すように、大量の流木が橋梁部に捕捉されており、2013年台風26号時の伊豆大島元町地区と同じく、洪水氾濫が発生した。



(a)



(b)



(c)

図6.1 伊豆大島 (a) と山形県最上川水系吉野川(b), (c)における流木捕捉状況

そこで、このような流木捕捉が洪水氾濫に及ぼす影響を調べるために、1D-2Dカップリングモデルによる洪水氾濫シミュレーションを実施した。ここでは、河道部には1Dモデル、氾濫域には2Dモデルをそれぞれ適用する。橋梁部における流木捕捉の効果としては、マンシングの粗度係数を増加させることで数値シミュレーションに取り込んだ。この粗度係数は、実測の痕跡水位と合うように河道部の流下方向に変化させる形でチューニングされた。その結果、本数値モデルは、痕跡水位の観測値や水位観測所の水位時系列データを概ね再現できた。また、図6.2に示すように流木捕捉の有無による越流量を算出し

⑥研究成果 (つづき)

た結果、流木捕捉の有無により越流量が大きく変化することが示された。

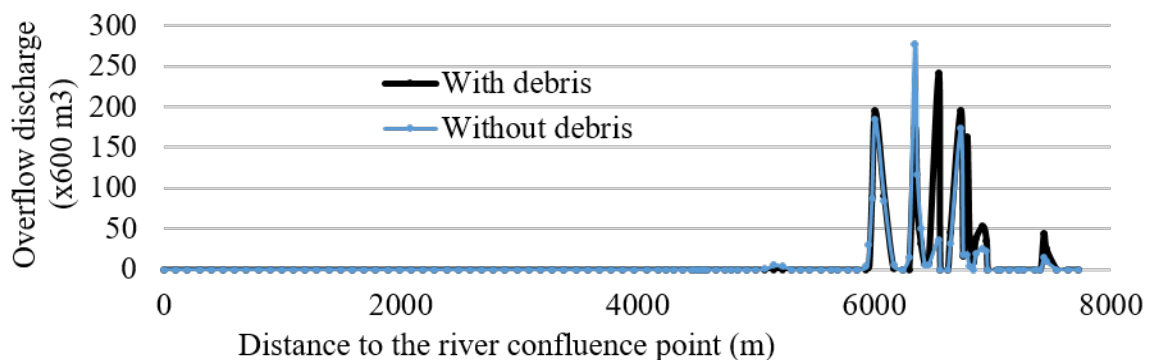


図 6.2 越流量の縦断分布

＜実験による検討＞

実験水路の勾配は4/100とし、定常流条件の水深は7cm、流速は1.19m/s、フルード数は約1.4と設定し実験を行った。上流（ゲート急開装置の位置）から1.8 mの位置に木製の橋桁モデル（厚さ2.4cm）を設置した。橋桁モデルの下端は底面から7cmとした。図6.3(a)に実験ケースの概要を示す。流木の橋桁部への閉塞状況を評価するために、集積率(%)を用いた。流木モデルは、直径0.3cm、長さ18cm、流木の比重は生木の比重(0.9-1.0程度)と同様の値になるよう、実験開始前に約1時間水つけて調整した。実験には100、150、200本の流木を使用した。根鉢モデルは直径2cmで柔軟性を有するココヤシ繊維を使用した。「流木モデルのみ」と「流木モデルと根鉢モデル」について実験を行った。

根鉢ありの流木集積率は根鉢なしの場合と比べて増えた。定常流実験では流れが安定しているため、根鉢なしの場合では流木モデルが整列した状態のまま流下する様子が見られた。しかし、非定常の場合、根鉢ありの場合においては流木モデルおよび根鉢モデルが絡み合い、塊のような状態で流れることで橋桁モデルにおける捕捉効果が高くなり、集積率の増大に繋がった(図6.3(b))。

落差工と橋桁の距離が流木長さの1.5倍のケースでは、投下した流木のほとんどが集積せずにそのまま橋桁部を通過した。これに対して、落差工と橋桁間の距離が流木モデルの長さと同様である場合には、根鉢の有無にかかわらず、定常・非定常条件下において高い集積率を示した(図6.3(c))。橋桁モデル直前に落差工がある場合、流木モデルが慣性力で橋桁方向に飛び出しやすくなることに加え、流木モデルに流下方向に対して縦の回転運動が加わり、橋桁に衝突・集積しやすくなったと考えられる。落差工が橋桁直前、特に流木の長さと同程度の位置にある場合は流木の集積率を大きく増大させるが、橋桁直下および流木の長さの0.5倍程度に位置する落差工は乗り越し防止装置と同じような特徴を示し、水面形および流木の挙動と集積率に影響を与えると考える。本研究により、橋桁上流側にある落差工は橋桁までの距離が流木サイズと類似した値の場合に、集積率に影響を与えることが明らかとなった。

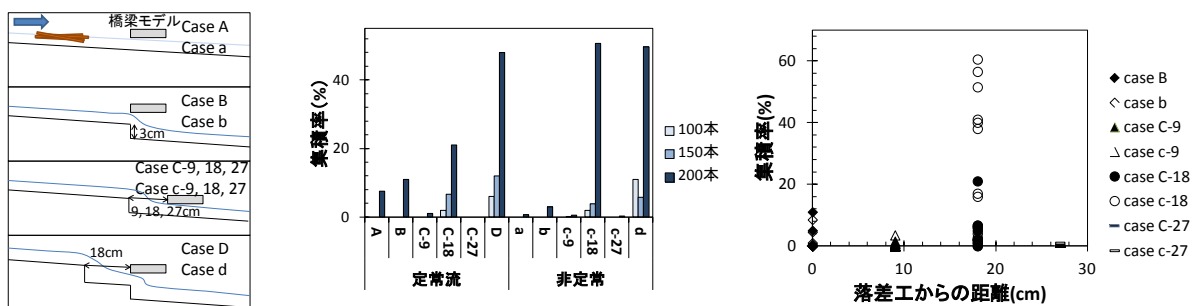


図6.3 流木捕捉実験 (a)実験概要、(b)根鉢ありの場合の集積率、(c)落差工との距離の関係（流木モデルは18cm）

⑥研究成果 (つづき)

(6-2) 流木の衝突および捕捉に関する基礎実験

前年度までに幹をモデル化した流木モデルの衝突時間・衝突力の知見を得たので、本年度は根鉢の影響を考慮した実験を、特に付加質量力の変化に注目して行なった。

全長6.5m、幅0.5m、高さ1.5mの矩形断面を有する循環式開水路（定常流実験）と、空圧式造波ゲートの急開により段波を発生させて非定常実験を行った。空圧式造波ゲートから下流1mの位置に木製の家屋モデルを配置した。家屋モデルには分力計を取り付け、水路中央に設置し、流体力・衝突力・流木衝突後の波形の立ち上がり時間を計測した。定常流実験のフルード数は約0.8。非定常実験では家屋設置位置における入射波の最大水深4cm、入射波先端の流速は0.9m/s、最大フルード数は約1.2-1.4と設定した。

流木は互いに絡み合うことで、一つの塊(流木群)となって、構造物に衝突する。それらの現象を再現するため、流木モデルの中央を紐で連結し流木群モデルを作成した。樹冠・根鉢つき単体流木モデルには、木モデルの幹部は直径0.4cm、長さ12.5cmとした。根鉢部分では材質の差を見るため、ヘチマロン（空隙があり堅い）とココヤシ繊維（空隙があり柔らかい）の2種類を使用し、流木モデルの幹部と接着した。ケース名については、流木モデルが家屋モデルと衝突する面を前面、それに対して反対側を後面とした(N：根鉢なし，Y：ココヤシ繊維，H：ヘチマロンとする)。

単体モデルの根鉢直径と流木モデルの衝突時間については、根鉢モデルの直径が大きくなるにつれて、衝突時間も長くなる傾向がみられた。これは流木モデルが家屋モデルと衝突する際にココヤシ繊維がクッションのような働きをしたことによるものであると考えられる。

単体モデルの根鉢直径と流木モデルの衝突力の関係からcase NYやcase YY, case HY, case YHのようにココヤシ繊維が関係しているケースにおいて高い衝突力を示した。特に、case NN（根鉢なしのケース）と比較して衝突力が最大で約3倍程度まで大きくなった。ココヤシ繊維を用いているケースにおいては衝突時間も大きな値を示し衝突力を減少させる効果があるため、衝突力の増大は別の効果によるものと考えられる。すなわち、根鉢モデル内部および周囲において水を拘束したことによる影響、すなわち、付加質量力の影響が大きいと考える。ココヤシ繊維はヘチマロンと比較してある程度密な素材であることから、衝突時に根鉢モデル前後および内部においてより多くの水を拘束したと考えられる。

図6.4に単体モデルおよび群モデルにおける力積 Fdt （流木の衝突力×流木の衝突時間）と運動量 MV （流木の質量×流木の速度）の関係を示す。同図(a)より、単体モデルにおいてそれぞれの根鉢モデル直径に対して付加質量係数を求めると、根鉢直径1, 2, 4cmにおいてそれぞれ1.38, 1.44, 1.83程度となった。同様に、同図(b)よりの群モデルでは、根鉢なし、根鉢直径1cm, 2cmについて定常流で0.86, 1.47, 1.75程度となった。また非定常では0.82, 1.67, 1.78程度となった。根鉢なしの場合に1を下回っていることより、流木群の場合は内部摩擦などによって消費されるエネルギーの影響も大きいことが推定される。群モデルの根鉢なしでの係数は、内部摩擦影響も含む係数であるので、根鉢がついた際の付加質量係数による影響は実際には2倍程度となると推定される。本研究により、流木群に定める根鉢の影響をモデル化することの重要性と、付加質量係数の知見を得た。

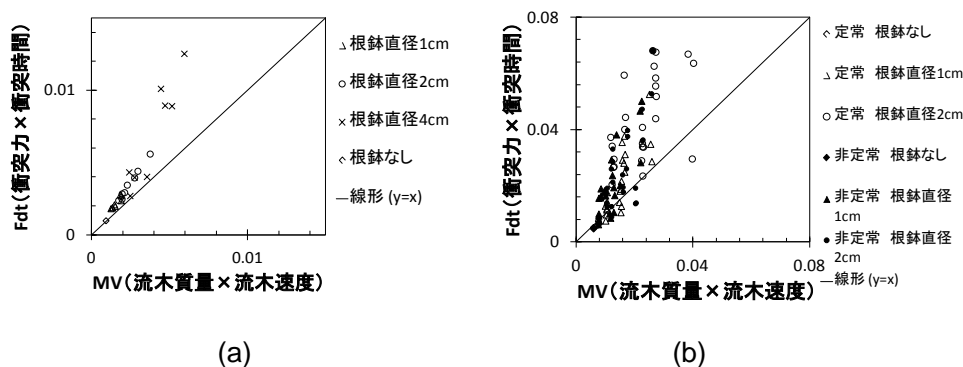


図6.4 流木衝突実験 (a) 単体モデル実験結果, (b) 群モデル実験結果

⑥研究成果（つづき）

（6-3）湾曲流路における流木群の流動と集積過程

鈴木・渡邊の研究が沙流川での流木集積調査から指摘したように、内岸砂州やその上に繁茂する樹林帯に残存した流木が多く見られている。ここでは、こうした状況を想定し、**図6.5**に樹木群を伴う内岸砂州を取り込んで橋脚周辺の流木集積状況を時系列的に示した。**図6.6**には、流木集積による縦断水位の変化を示した。ここでは、最終的に流木が多く集積した第4橋脚と内岸の間における水位縦断を示している。これより、上流側内岸寄りに流れてきた流木群は湾曲中心で外岸に向かい、内岸寄りの流木数は少なく、樹林化した中州がない場合はほとんど通過してしまう。また、樹木のない中州で、中州上での冠水深が流木径に比べて十分大きい場合でも同様である。しかし、計算結果が示すように、樹林化した中州の先端では流木塊の集積が生まれ、こうした傾向は現地観測でもよく指摘されている。特に、こうした状況が樹林地の破壊の引き金になることが報告されている。

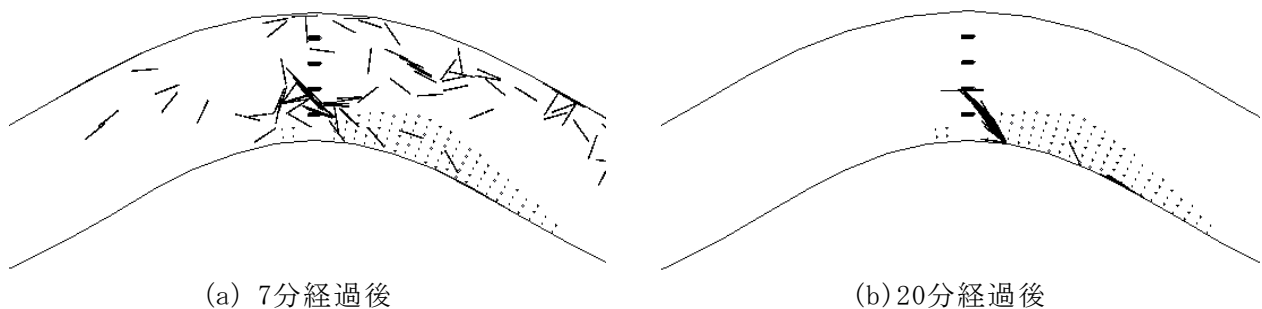


図6.5 樹木群を有する内岸砂州と橋脚での流木流動の数値シミュレーション結果

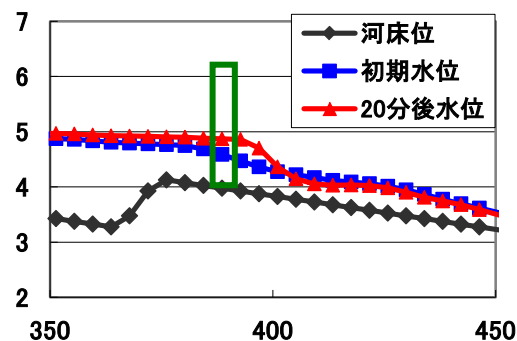


図6.6 橋脚による流木集積の水位増分（縦軸：水深 m, 横軸：流下距離 m）

（7）火山地域の土砂・流木流出機構の解明・予測技術の開発（里深G）

流木の流出機構を解明するために、すなわち暗渠や橋脚への流木の閉塞過程を解析するための一流体モデルと3D-DEMの提案を実施した。2次元浅水流方程式と3次元個別要素法を組み合わせた数値モデルにより大金沢流路工をまたぐ道路橋の閉塞過程を計算した（**図7.1**）。その結果、流れの表面が道路橋と同程度の標高に到達したため、流木が道路橋に引っかかったと推測できた（**図7.2**, **図7.3**, **図7.4**）。大金沢流路工の周辺に存在した株立ちし枝分かれした立ち木が流路工に流れ込んだことも、閉塞の一因と推察された。

⑥研究成果 (つづき)

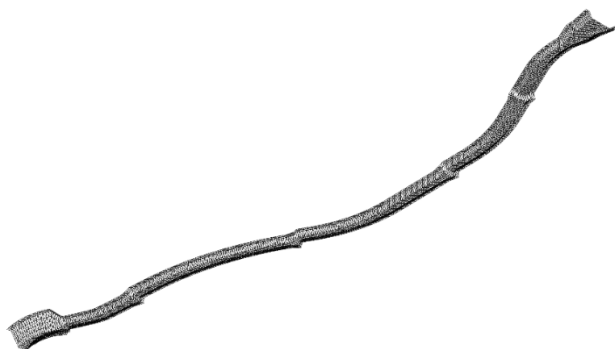


図7.1 大金沢流路工TINモデル

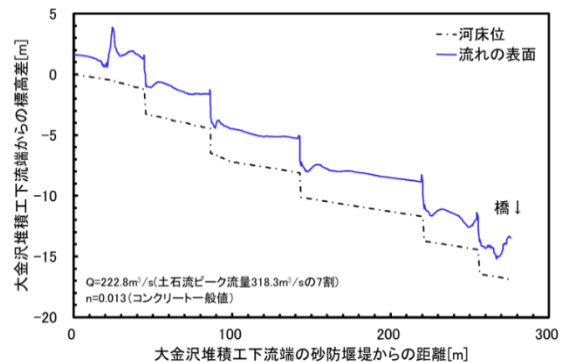


図7.2 大金沢流路工における水面形(縦断)

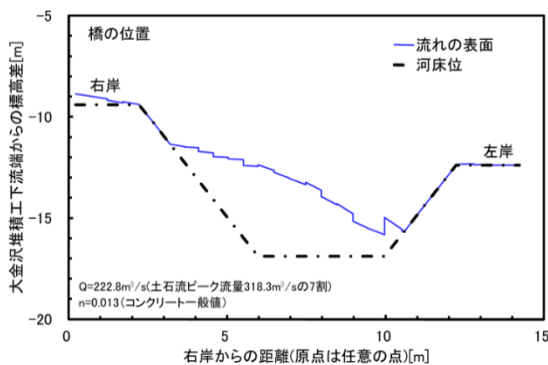


図7.3 大金沢流路工における水面形(横断)

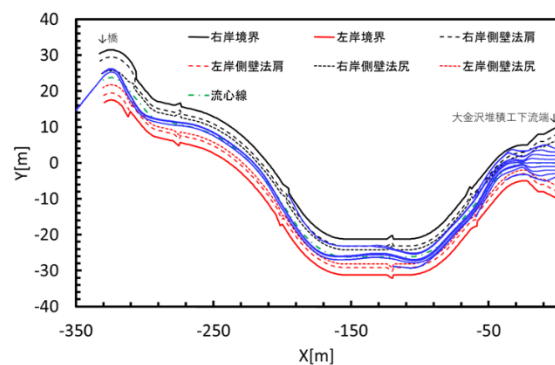


図7.4 流木の軌跡の計算事例

先述の手法は、詳細に流木の運動を追跡するが、計算に時間・コストを要する。土石流の到達範囲の把握を目的とした計算では、流木による橋脚閉塞の発生の有無が最も結果に影響する。そこで、流木の橋梁への閉塞に関する水理実験を実施した(図7.5)。山地河川を対象とした射流領域で、伊豆大島災害で見られた橋脚のない橋梁モデルを採用した。実験結果から流木濃度が大きくなるほど、また流木長/余裕高が小さくなるほど閉塞が起りやすくなることを確認した(図7.6左)。また、実験結果から閉塞が発生する境界を検討して、以下の近似式を得た。

$$y = 0.2354x^{-0.66}$$

ここで、 y :流木濃度、 x :流木長/余裕高を示す(図7.6右)。すなわち、近似式より上の領域は閉塞して、下の領域では閉塞しないと考えられる。

平成26-27年度に改良したモデルや得られた知見を活用して、入力が煩雑でなく且つ計算負荷が少ない方法を採用して、火山地域の細粒分を多く含む大規模土石流の挙動、砂防施設の効果、下流における暗渠・橋の閉塞、道路・家屋の影響を考慮した数値シミュレーション手法を構築し、GUIを実装してGISと連携したシステムを用いたシミュレーション手法を提案した。

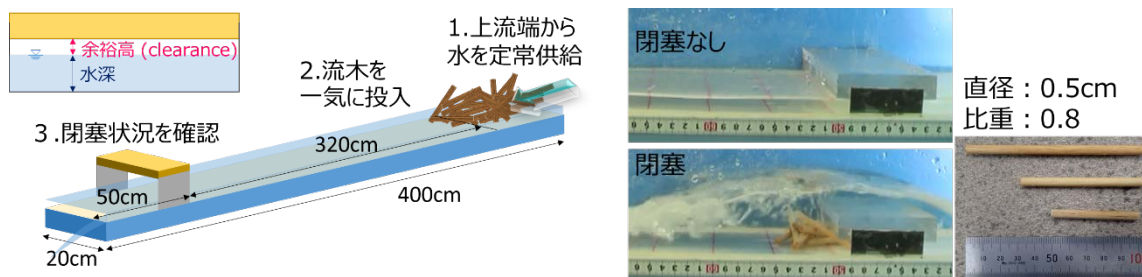


図7.5 水理実験の概要(左)と橋梁モデル・流木モデル(右)

⑥研究成果 (つづき)

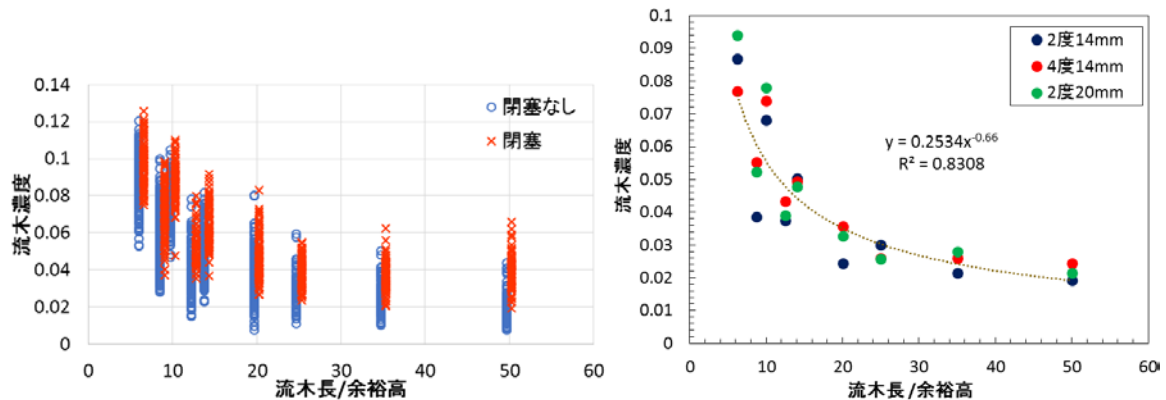


図7.6 実験結果 (左) と閉塞発生境界 (右)

(8) 災害対応策 (江頭G)

(8-1) 構造物対策

伊豆大島のように火山地域には地形の開析が進行せず、起伏の小さな尾根を有する流域では、土石流が流路から尾根を越えて流下する恐れがある。特に、火山地域ではこの危険性を踏まえた砂防堰堤の施設や、尾根を越える地点もしくはその下流での導流堤の配置という施設計画立案が必要となる。ここでは、既往の火山地域での対策や、土石流が尾根を乗り越えて流下する恐れのある溪流に有効な対策の考え方を示す。なお、本報告においては個別の火山における整備計画を提案するものではないため個別の名称を提示せず、実在する火山の地形状況等を踏まえたケーススタディとして検討を行う。

<既往の火山地域での土石流対策>

全国で火山砂防事業を実施している火山のうち、火山山麓周辺での土石流対策が進んでいる火山を選定し、試行的に施設の整備状況をレビューした。選定した火山の流路沿いの起伏量と砂防堰堤の施設配置を考える (図省略)。火口に近いエリアで比較的开析が進み7 - 12 m以上の起伏を示す流路がある。山麓の流路は比較的开析が進んでいないと考えられる3.0 m未満の起伏量を示す流路が分布しており、概ね起伏量は下流に向かうにつれて小さくなるよう遷移している。砂防堰堤は流路周辺起伏量が3.0 - 7.0 m以上の比較的高い谷形状を呈していると想定される流路区間に分布し、流路沿いの起伏が小さく、土石流が乗り越えていく恐れが高いと考えられる区間よりも上流で対策が行われている。一方で、山体北部に位置する沢では、砂防堰堤が整備されているものの、その上流の山麓中腹に起伏量が3.0 m未満となる流路の区間がある。しかしながら、それらの上流には土石流を堰堤に導流するための導流堤が整備されており、ある程度、谷地形が十分に発達していないと想定される地域では対策が行われているものと考えられる。山麓周辺を概観すると、砂防堰堤等の整備が行われていない溪流の中には、起伏が小さく、大きく湾曲した区間もある。この溪流では、土石流が尾根を乗り越える恐れについてのリスク評価を行い、必要に応じ、湾曲地点よりも上流での対策、そのような対策が困難な場合はA沢のように砂防堰堤への導流といった対策の検討を行う必要がある。

<開析が進んでいない溪流の土石流対策>

比較的开析が進んでいない溪流を有する火山を対象にケーススタディとして試行的な検討を行った。山麓周辺の流域内には、細かい水系網が分布し、従前の調査で設定された流域の中腹から流域外に流路が伸びている場合がある。本検討においては、土石流が尾根を越えて流下するおそれのある溪流のほか、このような流域内の流路が直接流域外に伸びる箇所を含め、B沢、C沢を対象とした (図8.1)。

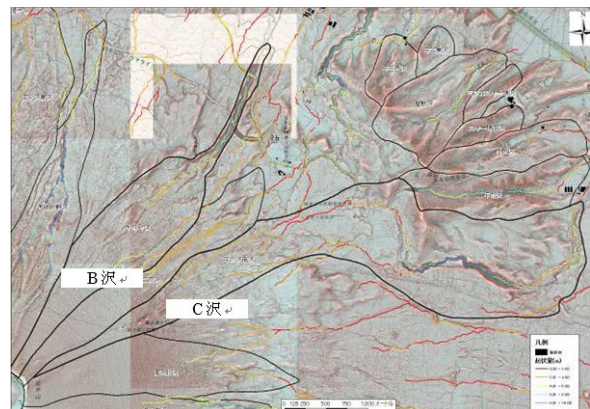


図8.1 B沢とC沢

⑥研究成果 (つづき)

B沢では、流域の中腹から流域外に伸びた流路を有しており、この流路から土石流が発生した場合、氾濫範囲が拡大するおそれがある。対策手法として、**図8.2**に示すように、案1：砂防堰堤や遊砂地といった土砂を捕捉する施設による対策と案2：導流堤といった土石流を溪流内流路へ導流する対策が考えられる。案1の土砂を捕捉する対策の場合、当該領域の流路深さは1~2 m程度しかなく、通常の砂防堰堤の整備は袖の陥入等を考慮すると困難である。このため、代替工法として遊砂地が考えられるが、地盤が緊密な溶岩であるため掘削は困難であり、この場合は築堤による遊砂地として土砂を貯留することが有利と考えられる。この場合、当該地点で想定される土砂量を捕捉するためには高さ2 m、延長650 mの築堤が必要となる。一方で、案2の場合、土石流が施設を越えない高さは、施設に土石流が衝突する前後の水頭比較により堤高1.5 mとして導流堤を整備するものと考えた。B沢本川までに、深さ1~2 m程度の溶岩皺を2本またぐため、導流堤は延長100 mと200 mの2基が必要となる。これらの比較検討からは、山麓の地形や地質特性に起因する施工性や経済性を考慮すると、案2のような導流による対策が有効と考えられる。

次にC沢で検討を行った。当該溪流は溶岩上で土石流が拡散して隣接するD沢方向に流下し、県道に到達した段階でさらに氾濫が広がり観光施設に影響を及ぼす可能性がある。これに対して、土石流の分岐を上流で抑制するために溶岩上で導流堤を整備する案1と、溶岩下の観光施設直近で建築物を保全する導流堤を整備する案2を検討した(**図8.3**)。計画施設の規模は同等である。案1は有効な手法になりうるが国立公園特別保護地区内であり施工には制約条件となる。一方で、保全対象直近で対応する案2は土石流を隣接するD沢の流路に導流することになる。D沢の下流では、砂防施設が計画されており、土石流は下流で捕捉されることが期待される。上流の施工に制約条件がある場合は、隣接する溪流に安全に流下させ、その下流で計画されている砂防施設により土石流を捕捉することも検討する必要がある。

対策の方法としては、土石流が尾根を乗り越えて流下する可能性のある地点より上流で、安全に流下可能な流路まで導流する方法が最も効率的と考えられる。しかしながら、C沢のように、対策箇所の施工に制約条件がある場合などは、隣接溪流に安全に導流して、その下流で土石流を捕捉することが有効な場合もあるので施設配置の計画においては留意する必要がある。

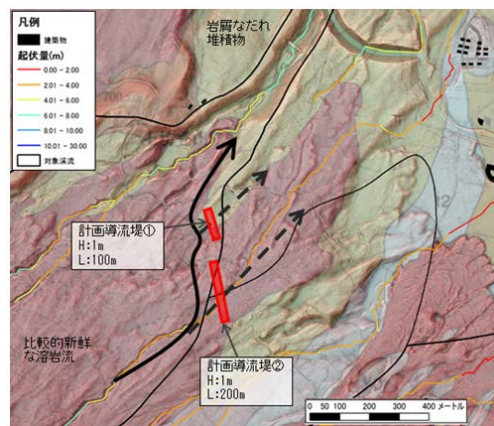
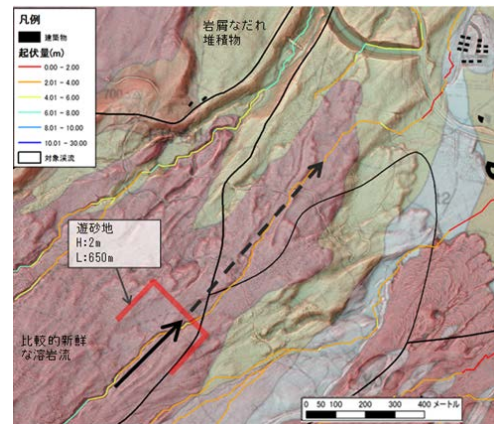


図 8.2 B 沢の対策案 1 (上), 案 2 (下)

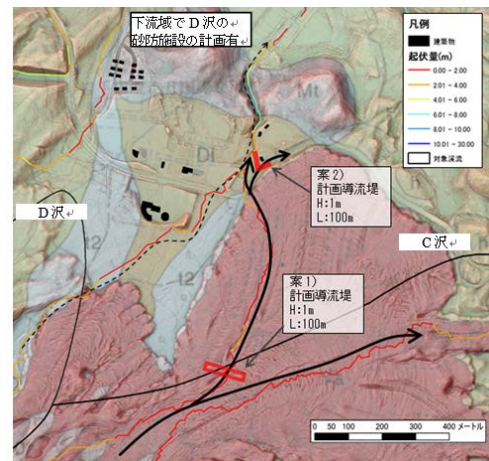


図 8.3 C 沢の対策案 1, 2

⑥研究成果 (つづき)

(8-2) 泥流が小流域界を越える条件

伊豆大島の被災した地域では、地形の開析が進んでいない。そのため、泥流が流域界を越えることやリッジを超えるようなことが起こった。このような地域のハザードを評価するためには、泥流や土石流が流域界を越えることを想定したマッピングが必要である。本節では、泥流が流域界を越えるかどうかを容易に評価する方法を開発した（詳細は様式C-12を参照）。

図 8.4 は、リッジのモデルである。リッジの上り斜面を図のようにモデル化する。この斜面における泥流の停止距離 x'_s が斜面長 x'_c よりも長い場合には泥流はリッジを超え、短い場合には斜面の途中で停止するものとするれば、泥流がリッジを超えるか否かを容易に判定できる。図 8.5 は、開発モデルから求められる停止距離であって、上流側斜面の勾配をパラメータとして停止距離を示している。リッジの斜面長が図の原点側にあれば、泥流はリッジを超えることを示している。

この方法は、泥流が流域界、あるいはリッジを超えるかどうかの判定を大量にしかも迅速にする必要がある場合には有効である。しかし、これはあくまで近似的な方法であるので、詳細な判定が必要な場合には、数値シミュレーションとの併用が望ましい。

泥流の発生から流下経路、および氾濫域は、災害危険領域である。災害危険領域は泥流の規模に依存し、災害危険領域内の災害危険度は、一様ではなく、日常生活空間として利用できるところから利用を著しく制限しなければならないところまで、多様である。

泥流による災害危険度は、一般の洪水災害危険度指標にみられるような氾濫水深、氾濫水の運動量や運動エネルギーに相当する物理量等の指標と泥流の規模の発生確率を用いて評価できるものと思われる。たとえば、次のようである。

泥流の規模： M_1, M_2, \dots, M_n ($M_{n-1} < M_n$)

危険度指標

流動深： $h_1 \sim h_i$ ($h_{i-1} < h_i$)

堆積深： $d_1 \sim d_i$ ($d_{i-1} < d_i$)

運動量： $m_1 \sim m_i$ ($m_{i-1} < m_i$) $m = \rho \bar{v} h$

ここに、 m は単位面積当たりの運動量である。

図 8.6 は、泥流の氾濫・堆積領域における危険度分布の模式図である。これに示すように、氾濫危険領域における危険度の平面分布を示し、危険度に応じた土地利用を実施することが重要である。

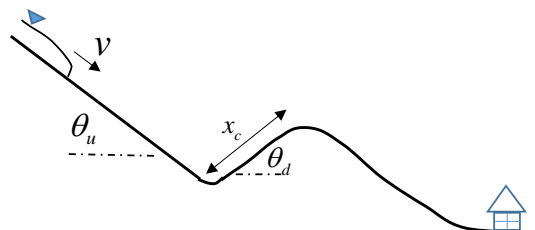


図 8.4 リッジの模式図

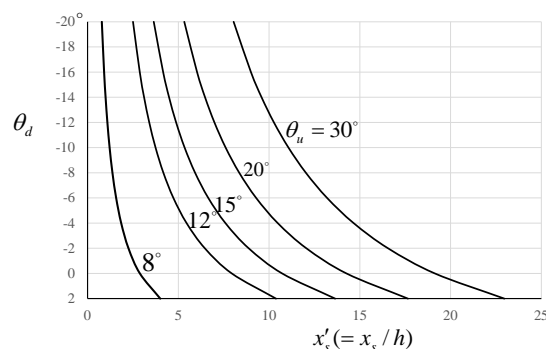
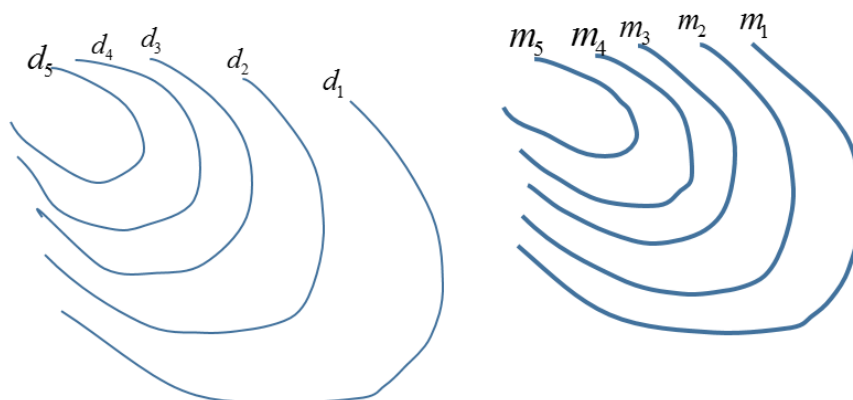


図 8.5 泥流の到達距離



(a) 堆積深の分布

(b) 運動量の分布

図 8.6 規模 M_i の泥流氾濫に伴う災害危険度の分布

⑥研究成果（つづき）

（8-3）土砂災害後の復旧期に求められる災害リスク情報に関する考察

＜大島町における住民アンケートの分析＞

2015年7月12日から15日に、元町地区を中心としてアンケート調査を実施した。調査方法は主として留め置き調査であり、一部郵送調査を併用した。有効回答数は176であり、回収率は約56%である。この分析結果から、避難勧告により全住民が避難することは無く、他の直接的な促進情報や避難先を知っている、守るべき家族がいるなどの複雑な要因により避難行動に移ることがわかった。どのような住民が存在するか解明を行うことで、全住民の避難行動を促し、迅速な避難になると考え、行政による避難勧告と近隣住民による避難呼びかけに着目し、その傾向をみた。図8.7に避難のきっかけにおける行政情報と近所情報でのクロス集計を示す。肯定の意を表す、そう思う、思うと答えた回答者を避難するとし、それ以外の回答を避難しないとした。行政情報と近所情報を合わせることで、約7割の回答者避難する傾向にある。両方とも反応しない人は他の避難きっかけで避難すると答えているが、8人だけはどの情報にも反応しない結果となった。災害に対して恐怖を抱いているか、行政を信頼しているか、避難所等の確認・非常持出品の準備をしているか、確認・準備により避難効率性や安全性が向上すると思っているかについても分析を行い、肯定の意を示す人ほど避難勧告で避難する傾向にあることが分かった。以上から、避難を促す情報は行政から防災行政無線等を通じて伝達されるだけでなく、Face to Faceでの呼びかけも重要であること、平時から防災活動を行う人々は行政の情報に反応しやすく、他者への伝達の価値もあることから、これらをうまく機能させた情報伝達が避難を促すためには有効である。

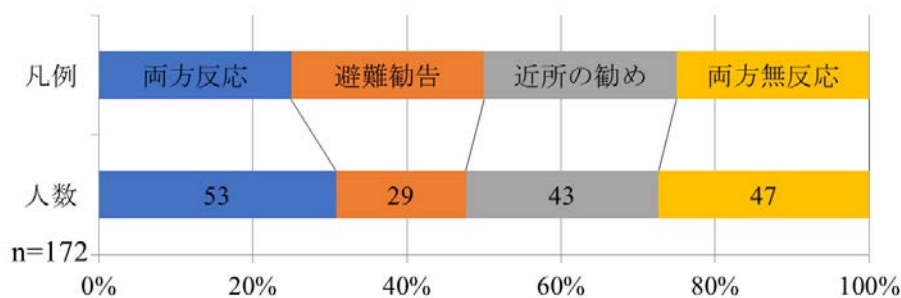


図8.7 避難勧告，近所の呼びかけで避難する人

＜災害後の暫定版ハザードマップの作製・公開の課題＞

2015年度の分析では、被災後に発行された暫定ハザードマップの有効性と、平成25年台風26号被害時に作成された暫定版ハザードマップの問題点について考察した。この考察では、住民目線での要求分析の必要性、つまり、土砂災害で滑りきらず残った土砂はどこにあり、それらがもし滑った際に、どのような流れでどこに吸収されるかということについての情報提示の必要性を示した。本年度は、このような試みを、誰がどのように実現していくかについて、阿蘇地域の事例をもとに考察した。熊本大学では、この梅雨時期の出水を懸念して、土砂災害による2次災害予測危険個所マップを作成し、周知をおこなった。この事例は、豪雨による土砂災害に起因するものではないが、暫定ハザードマップの作製や周知の手法に対して大きな示唆を与えていると考える。そこで、以下の考察を行った。

(a)暫定ハザードマップは誰が作るべきか：伊豆大島では、東京都が暫定版を作成した。行政から発信する情報は、責任が付きまとうため、科学的な根拠に基づいたものであり、曖昧な要素を含んだものは取り扱いにくい。それゆえ、多くの住民にとってはすでに分かり切った情報が記載されると考えられる。これに対して、阿蘇の事例では、熊本大学が2次災害予測危険個所マップを作成した。作成に当たっては、現地を熟知する研究者が、地震後にも何度も足を運び、そのうえで住民の目線を入れて、危険領域を設定している。大学が作成することで、利用者は、このマップ個人の判断で解釈する必要があることを意識することとなる点がこの方式のメリットであると考えられる。逆にこの方式のデメリットは、作成者への信頼がなければ作成されたマップを利用する人がいなくなる。しかしながら、熊本大学は阿蘇地域での土砂災害に対して、行政、地域と連携して取り組んできた歴史があり、南阿蘇村の住民からも信頼される関係を、災害前から築いていたことで、この問題は回避することができた。この事例から、行政以外でも信頼できる期間が暫定ハザードマップを作成することが、より現実的な対応となる。

⑥研究成果 (つづき)

(b)暫定ハザードマップはどのように住民に周知すべきか:不確定であるが緊急を要する情報が掲載された暫定ハザードマップは、利用者目線で作成できたとしても、利用者に周知できなければ、価値が発揮できない。大島の事例では、暫定版ハザードマップは、全戸配布を行った上でインターネット上にも公開していたが、住民へのヒアリング調査では、「そういえばそんなマップが配られていた。」という反応が多く十分な説明がなされていたとは言い難い状態であった。取り扱いの難しいマップであるからこそ、その理解に関しては粘り強い説明が必要であることを示した例となっている。これに対して、阿蘇の事例では、インターネット上への公開は行わず、熊本大学主催で住民避難説明会を4回実施し対応していた。これには熊本大学の平常時からの取り組みが関係している。熊本大学では、水害・土砂災害に備えたソフト対策を推進するプロジェクトを継続的に行っており、住民・行政を交えた予防的避難(就寝時間帯に災害の危険性が高まることが予測される際の就寝時間前の自主的避難)を推進するワークショップを南阿蘇村で行っていた。このワークショップ参加者を中心にして説明会を行ったことで、危険地域居住者への周知を行うことができたと考えられる。このことから、対象地域の居住者への周知ためには、配布やインターネットへの公開だけでは不十分であり、説明会は必須である。さらに説明会は全員が参加できるようなアレンジ(複数回開催や個別訪問など)が必要であろう。阿蘇の事例は、熊本大学が作成し、熊本大学が平常時の社会貢献を兼ねた研究活動の流れから説明会を開催しており、理想的な進め方であった。しかしながら、全国のすべての土砂災害危険区域でこのような体制を組むことは難しく、稀有な成功事例であったと考えるべきであろう。このような体制を組めない場合には、外部の専門家(被災地域に関して精力的な調査・分析を行っている人が望ましい)を巻き込み、平常時の地域防災活動の延長として説明会を開催することで、周知に努めることが現実的であろう。

(9) 地球温暖化による降雨特性値の変化と災害外力に対するその影響 (江頭 G)

土砂災害につながりうるような降雨特性の変化を推定する事を目的として、本年度は降雨の時空間特性の予測モデルを選定し、50年、100年後の降雨特性値を評価した。平成27年度は、伊豆大島に焦点を置いて台風の接近と大雨に関する解析を行ったが、平成28年度は解析対象を全国に拡大し、日本の10地点を対象として台風の接近と大雨との関係を解析した。なお、以下の内容は武川ら(2017)を一部引用している。

台風の接近と大雨との関係の分析は、伊豆大島の大雨と台風の関係について平成27年度に行った分析と同様に以下の手順で行った。気象庁が提供する台風のベストトラックデータから、1951年～2014年の台風経路情報をまず抽出する。これらの経路情報を、自己組織化マップ(クラスター分析手法の一つ)に入力し、過去の台風の経路パターンを20通り抽出する。更に、各経路パターンに対応する台風が、対象とする観測地点に接近(対象地点と台風中心との距離<500km)した日の日降水量を、各台風パターン毎に調べる。なお本稿では、北海道、本州、九州の計4地点(札幌、伊豆大島、彦根、大分)について調べた結果を述べる。

また、平成28年度は、MPI(Max-Planck-Institute)の全球気候モデルから抽出した台風物理特性値の将来期間と現在期間との差分を、台風の統計モデル(楠原ら、2012)に与えて、現在及び将来期間それぞれに対して大量の台風を統計的に発生させ、各パターンの台風発生数の将来化を調べた(将来シナリオはA1Bで、将来期間は2081～2100年とした)。本年度は全球気候モデルとしてMPIに加えてCCCMA(Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis)を利用して各パターンの台風発生数の将来変化を調べた。

図9.1には、ベストトラックから抽出した20通りの台風経路パターンを示す。図9.1より、フィリピン海で発生した台風や日本を縦断する台風など、様々な経路の台風がSOMで抽出されている事が分かる。

図9.2には、1951年～2009年における年最大日降水量を、浜松、彦根について示す。また、年最大日降水量が観測された日に台風の接近があった場合は、該当する台風パターンの番号を示している。これら各台風パターンの接近と各観測地点の年最大日降水量の関係を調べた。この図より、彦根・大分においてもパターン11の台風は極端な大雨との関係が強いが、彦根ではパターン14の台風、大分ではパターン8やパターン4の台風によっても大雨がもたらされていることが分かる。また、札幌はパターン8とパターン11の台風による降水量が多く、特にパターン8の台風の場合に極端な大雨となっていた。一方伊豆大島の大雨はパターン11の台風の接近と関連が強く、伊豆大島で400mm以上の年最大日降水量が現れた日は全て、パターン11の台風の接近と対応していた。

⑥研究成果 (つづき)

図9.3には、MPIおよびCCCMAから得た台風物理量の将来変化確率台風モデルに与えて、各台風パターン発生数の将来変化を調べた結果を示す。ノード2, 3, 6, 17といった台風パターンは将来減少傾向にあるように見える。また、伊豆大島を初めとした複数の地点の大雨との関係が強いノード11の台風は、MPI・CCCMAのどちらでも僅かに減少という予測結果になっている。

本年度の解析では、将来の台風変化を抽出する対象とする全球気候モデルとして、MPIにCCCMAを加えた解析を行ったが、気候モデルの相違による将来変化の不確実性を考慮するために、更に多くの全球気候モデルを利用して分析することも重要である。また、将来シナリオにはA1Bを用いたが、RCP(Representative Concentration Pathways)等のより新しい将来シナリオを使った分析を行う事も今後の課題である。

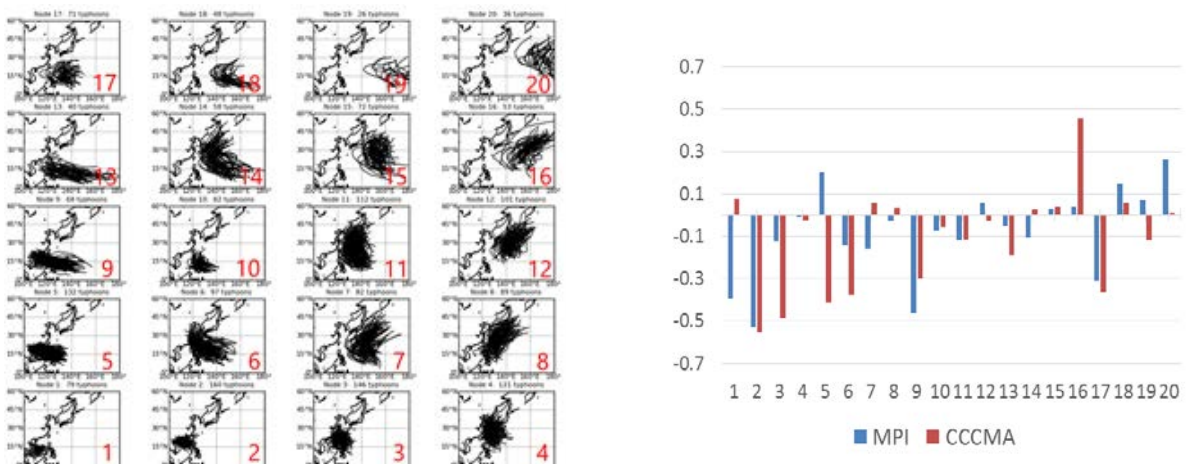


図9.1 ベストトラックから抽出した20通りの台風経路パターン。各パターンに対応するノード番号を赤で示す。*武川ら(2017)の図を一部改変したもの。

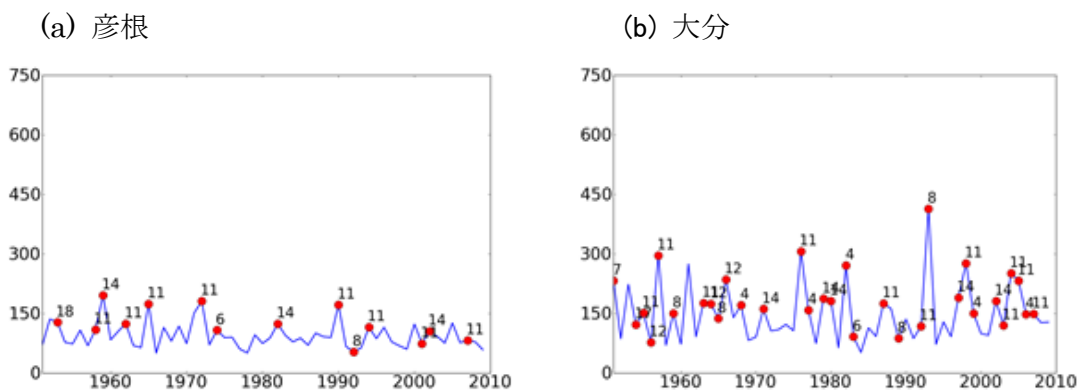


図9.2 1951年～2009年における彦根および大分の年最大日降水量。年最大日降水量が観測された日に台風が対象地点に接近していた場合は、そのノード番号を示している。

⑥研究成果（つづき）

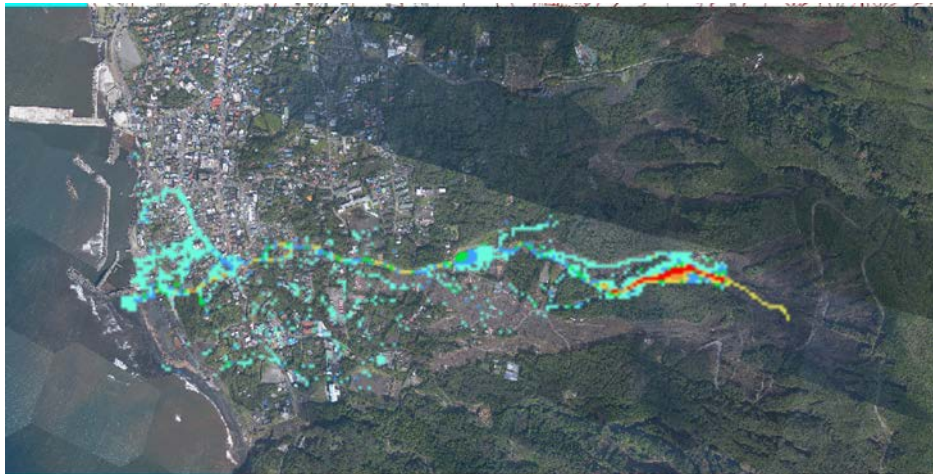
(10) 土砂災害防止事業検討のための統合システムの提案（里深G）

火山地域における降雨流出や斜面崩壊の発生に関して得られた知見は、土砂流出予測の上流側境界条件として用いることができる。すなわち、降雨流出および斜面崩壊予測の高度化は土砂流出予測の精度向上に直結する。また、火山流域においては細粒土砂が高い割合で存在することが多いため、流れの解析において細粒土砂の果たす役割を無視することはできない。本研究ではこういった事象に対して高度な検討を行い、その結果得られた予測手法を火山地域の土石流の発生事例に適用してその妥当性を確かめた。

効果的かつ効率的な砂防施設の規模・配置を特定するシステムを構築するために、入出力部にGUIを実装しGISと連携した土石流シミュレーションが可能なシステムであるHyper KANAKOをベースとして、上記の研究で提案された方法や計算モデルを導入した。この新たなシステムによるシミュレーションを実際の流域や災害事例に適用して、実務上有効な検討が可能なことを確認した。

統合システムによる解析の一例として、図10.1に伊豆大島大金沢流域における表層崩壊と土石流の連続解析結果を示す。この様に、表層崩壊による崩土量の供給がより現実に即した現象を再現できることで、実務上有効な解析結果が得られることが分かる。

a)



b)

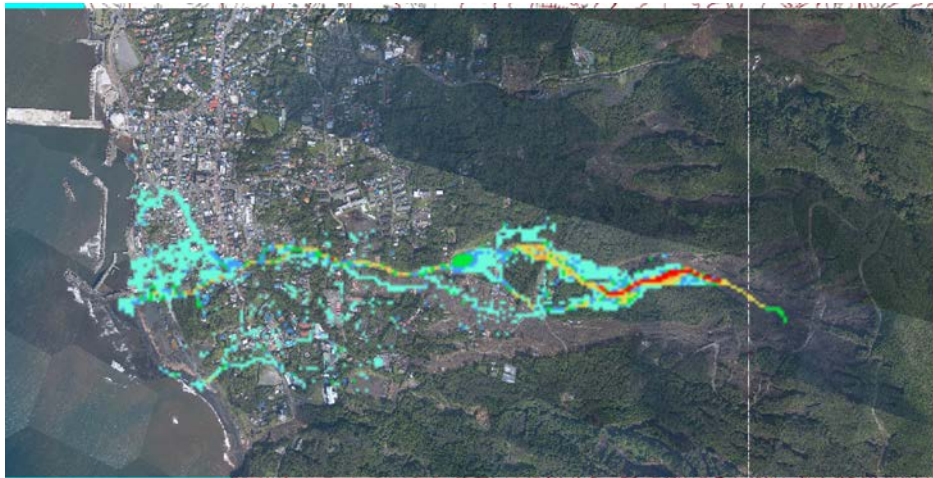


図 10.1 表層崩壊-土石流統合システムにて解析された土石流流動深（水深+堆積厚）の最大痕跡
(a: $C = 0.44$, b: $C = 0.30$)

⑦研究成果の発表状況

・これまでに発表した代表的な論文

Gonda, Y., Legono, D., Sukatja, B., Santosa, U., B. (2014) Debris flows and flash floods in the Putih River after the 2010 eruption of Mt. Merapi, Indonesia, International Journal of Erosion Control Engineering Vol. 7, No. 2, 63-68

Imaizumi, F., Miyamoto, K. (2014) Pore water pressure in two-dimensional slopes with multi-layer soil structure, In Proceedings of 5th International Workshop on Multimodal Sediment Disasters, 9-17.

Vu The Truong, Tsuchiya S., Imaizumi F., Ohsaka O. (2015) Estimation of groundwater level rising in the western site of Mt. Mihara caused by typhoon Wipha (Oct.2013) in Izu-Oshima island, Chubu Forest Research.

山川陽祐, 堀田紀文, 経隆悠 (2015) 南アルプス破砕帯流域における水・土砂流出特性の解析 -大井川水系・東河内沢流域における観測事例-, 中部森林研究.

古谷智彦, 中谷加奈, 小杉賢一朗, 長谷川祐治, 里深好文, 水山高久: 火山地域の大規模土砂移動による被害範囲の推定手法の検討, 平成28年度(公社)砂防学会研究発表会概要集, 2016.

堀田紀文, 後藤優弥, 山川陽祐, 経隆悠, 正岡直也, 今泉文寿. 2016. 2013年台風26号によって伊豆大島で生じた表層崩壊の発生機構について. 第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 7-11.

堀田紀文, 後藤優弥, 山川陽祐, 経隆悠, 正岡直也, 今泉文寿. 2016. 2013年台風26号による伊豆大島での表層崩壊発生プロセス. 平成28年砂防学会研究発表会概要集 B, 108-109.

宮原海, 田中規夫, 急勾配水路における落差工が流木の橋桁部への集積状況に与える影響に関する基礎実験, 土木学会論文集B1(水工学) Vol. 73, No. 4, 2017.

武川晋也, 井芹慶彦, 鼎信次郎: 日本における豪雨と台風の経路パターンとの関係の分析, 土木学会論文集 B1 (水工学), 2017.

山崎祐介, 江頭進治, 岩見洋一: 避難予警報のための土砂災害シミュレーターに関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), vol. 72, pp. I_1327-I_1332, 2016.

Yamazaki Y., Egashira S., and Iwami Y., Method to Develop Critical Rainfall Conditions for Occurrences of Sediment-Induced Disasters and to Identify Areas Prone to Landslides, JDR Vol.11 No.6, pp. 1103-1111 2016

Egashira, S., Takebayashi, H., Sekine, M. and Osanai, N. (2016): Sediment runoff processes and possibility of sediment control structures in the 2013 event at Izu-Oshima, International Journal of Erosion Control Engineering, Vol. 9, No. 4, pp.155-164.

江頭進治・宮本邦明・竹林洋史 (2016): 崩壊に伴う土石流・泥流の形成と規模の決定機構、砂防学会誌、Vol. 68, No. 5, pp.38-42.

・国際会議、学会等における発表状況

Gonda, Y., Miyata, S., Numamoto, S., Hotta, N., Yamada, T., Legono, D., Sukatja, B., Santosa, U., B. (2014) Temporal change of characteristics of debris flows and flash floods in the Putih River after the eruptions of Mt. Merapi, Indonesia, Cities on Volcanoes 8 Living in Harmony with Volcano: Bridging the will of nature to society September 9-13.

Nakatani, K., Imaizumi, F., Satofuka, Y., Mizuyama, T.: Characteristics of debris flows on volcanic island Izu Oshima, Tokyo, Japan, caused by Typhoon No. 26 in October 2013, Cities on Volcanoes 8, Yogyakarta, Indonesia, 2014.

Hasegawa, Y., Uchida, T., Nakatani, K., Hotta, N.: Experimental study on fine sediment sheet flowing and deposition, 5th International Workshop on Multimodal Sediment Disasters, Tainan, Taiwan, 2014.

Tsutsumi, D. (2015) Shallow landslide analysis method consisting of contour line based method and slope stability model with critical slip surface, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2015

正岡直也・小杉賢一朗・小松正弥, 蒸発法に基づく実験装置を用いた土壌の不飽和水分特性ならびに表面流発生の計測, H28年度砂防学会研究発表会, 富山県民会館, 2016.5.18-19

正岡直也・小杉賢一朗・糸数 哲, 蒸発法を用いた火山性土壌の不飽和水分特性の計測, H27年度砂防学会研究発表会, 栃木県総合文化センター, 2015/5/20-21

堤大三・藤田正治・森井大貴・山野井一輝, トポチューブを用いた地形分割と臨界すべり面解析による表層崩壊評価手法の検討, H27年度砂防学会研究発表会, 栃木県総合文化センター, 2015/5/20-21

孝子 綸図・山野井一輝・堤 大三・藤田 正治・和田 孝志, TOPOTUBEによる地形分割を用いた表層崩壊予測と崩壊土砂の流下モデル, H28年度砂防学会研究発表会, 富山県民会館, 2016.5.18-19

宮原海, 田中規夫, 急勾配水路における落差工と橋桁の位置関係が流木の集積状況に与える影響, 土木学会関東支部発表会Ⅱ (CD-ROM), 2017. 3.

宮原海, 伏見健吾, 山崎直樹, 田中規夫, 樹冠・根鉢つき流木が家屋に衝突する際の流体力に関する付加質量力について, 土木学会関東支部発表会Ⅱ (CD-ROM), 2017. 3.

Hatayama, M.: “Disaster Risk Information for Land Slide -New Challenge with IT Area-”, The 6th Conference of the International Society for Integrated Disaster Risk Management (IDRiM 2015) (New Delhi, India) (発表年月日: 2016年10月29日).

畑山満則; “スマートフォンを用いた斜面災害検知ネットワークシステムの設計”, 情報処理学会第78回全国大会 (横浜市港北区), 7E-02 (発表日2016年3月12日)

桜庭拓也・二瓶泰雄: 橋梁部の流木捕捉状況と水面形変化に関する小型開水路実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集第2部, Vol.71, pp.285-286, 2016.

執印康裕・長谷川航太・堀田紀文: 降雨強度指標と分布型応答モデルによる表層崩壊危険度評価手法について—伊豆大島尾大金沢を対象として—, 平成27年度砂防学会研究発表会, 栃木県総合文化センター, 2015年5月20-21日

執印康裕・堀田紀文: 長期降雨データを用いた山腹崩壊危険度評価について—伊豆大島を対象として—, 平成28年度砂防学会研究発表会, 富山県民会館, 2016年5月18-19日

比留間翔剛・執印康裕: 崩壊および降雨履歴を考慮した土砂災害警戒情報発表基準の検討, 平成28年度砂防学会研究発表会, 富山県民会館, 2016年5月18-19日

執印康裕: 火山地域を対象とした豪雨と表層崩壊の関係について—伊豆大島を事例として—, 第128回日本森林学会大会, 鹿児島大学, 2017年3月26-28日 (発表予定)

・学術誌へ投稿中の論文 (掲載が決定しているものに限る)

執印康裕・堀田紀文: 実効雨量の概念を用いた分布型崩壊概念モデルによる降雨指標と表層崩壊の関係について—東京都伊豆大島を事例として—, 砂防学会誌 Vol. 69 No. 6 (印刷中)

Tanaka, N., Ogino, T., Comparison of reduction of tsunami fluid force and additional force due to impact and accumulating after collision of tsunami-produced driftwood from a coastal forest with houses during the Great East Japan tsunami, Landscape and Ecological Engineering (in press), 2017.

⑧研究成果の社会への情報発信

<竹林>

2016/2/28 テレビ朝日, 災害列島, 2014年に広島で発生した土石流の数値シミュレーション結果の紹介・今後の土砂災害対策についてコメント.

2016/4/18 朝日新聞朝刊, 熊本地震による土砂災害の特長についてコメント.

2016/4/19 TBSテレビ, Nスタ, 熊本地震による土砂災害の特長と今後の降雨によるさらなる土砂災害についてコメント.

2016/4/20 TBSテレビ, ひるおび, 熊本地震による土砂災害の特長と今後の降雨によるさらなる土砂災害についてコメント.

2016/8/19 テレビ新広島, TSSみんなのテレビSP〜広島土砂災害から2年・今私たちにできること〜, 土石流の数値シミュレーションモデルの紹介・今後の土砂災害対策についてコメント.

2016/11/7-8 2016 NCDR, DPRI Workshop 40名参加

2016/11/17 豪雨による土砂災害研究会 40名参加

2016/11/29-12/2 Joint Workshop of 2016 International Debris Flow workshop and Multimodal Sediment Disaster Network 105名参加

<畑山, 神谷>

滋賀県 土砂災害防止月間講演会: 土砂災害における住民行動と行政対応, 滋賀県庁, 2014年6月4日

沖縄県 中城村防災講演: 伊豆大島の事例の紹介, 2016年3月11日

<二瓶>

2016/12/7 豪雨による土砂災害研究会

⑨表彰，受領歴

特になし.

⑩研究の今後の課題・展望等

2013年伊豆大島のような火山地域にて予想される大規模土砂災害に対する防災・減災対策立案のための科学的知見を蓄積するために，合計10の研究テーマに関する推進した．その結果，降雨浸透・流出機構の解明，深層・表層崩壊発生機構や危険度評価法の開発，火山地域の土砂（泥流）・流木流出機構の解明・予測技術の開発，災害対応のためのハード・ソフト対策の検討などに関して，これまでに蓄積されてきた研究成果，現地観測・調査，理論解析及び数値シミュレーションに基づいて実施した．ここでは，これらの多岐にわたる項目を，メンバー間のやり取りを密にして研究を進めてきたが，本研究の更なる発展や質向上のためには，ハード・ソフトの災害対応策を具現化する上で，降雨浸透や崩壊発生メカニズムなどの素過程の知見をより有機的に結び付けていく必要がある．また，限られた年数で行っているため，事例的な研究にとどまっているところが散見されることから，本研究で得られた技術や知見を，より多くの火山地域に適用できるかどうかの検討が必要となる．

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

本研究は，火山地域に発生恐れのある豪雨に伴う土砂災害を対象として，多角的な研究を推進してきた．具体的には，降雨浸透・流出機構や深層・表層崩壊発生機構の解明・予測技術の開発，崩壊危険度評価法及び崩壊発生限界降雨条件の検討，泥流による危険領域の推定法，流木の生産・流出・捕捉機構と氾濫に対する影響評価法，地球温暖化による災害外力変化の影響評価，を行うと共に，それらに基づいて，ハード面・ソフト面災害対応対策技術の検討を行った．さらに，これらの技術を統合することによって，火山地域の土砂流出に対する予警報システムと効果的かつ効率的な砂防施設の設計・配置を支援するシステムを提案した．それらの研究成果や予測技術は，火山地域における土砂災害防止・軽減策をハード及びソフトの両面から推進するための重要な知見となり，これらを通じて河川砂防行政に貢献することが期待できる．