

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 13 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23404006

研究課題名(和文) 2009年台風8号による小林村複合土砂災害のメカニズムと警戒避難

研究課題名(英文) Mechanism of multi-modal compound disaster at Shaolin Village caused by typhoon No. 8 in 2009 and warning and evacuation strategy

研究代表者

宮本 邦明 (MIYAMOTO, Kuniaki)

筑波大学・生命環境系・教授

研究者番号：00263492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：小林村の深層崩壊に伴う災害では、崩壊発生10時間前に村外への唯一の避難路である8号橋が流失し、人的災害の発生を決定づけた。8号橋の流失は河床上昇により生じているが、この河床上昇は深層崩壊を発生させた8号台風のみでは生じないことが水文観測、土砂流出・河床変動計算から示され、前年までの豪雨による土砂生産・流出が大きく寄与していることが明らかとなった。したがって、8号台風のような未曾有の降雨に対する警戒避難体制を考えると、深層崩壊や大規模土石流のような直接的な加害現象の予測のみならず、安全な避難経路と避難場所を確保するため、許容する河床高や侵食・堆積による地形変化を知ることが重要である。

研究成果の概要(英文)：The causes of the Shaolin Village disaster are the occurrence of a deep-seated landslide, of cause, and the loss of the No.8 Bridge to connect neighbor safe village at about 10 hours before the occurrence of the landslide. The loss of the bridge was caused by aggradation of riverbed. However, based on the field observation on hydrological characteristics of the basin the No.8 Bridge crossing and numerical simulations of sediment runoff and riverbed evolution in the basin, the rainfall during Typhoon No.8 could not cause the loss of No.8 Bridge and rainfalls before Typhoon No.8 might act important rule for aggradation of the riverbed. These results say that, when we discuss about the warning and evacuation strategy to avoid the disaster like Shaolin Village disaster, it is necessary to take into account not only the occurrence and moving of deep-seated landslide but riverbed evolution in the period of heavy rainfall to assess the allowable bed level and safe evacuation route and site.

研究分野：自然災害科学

キーワード：深層崩壊 土石流 複合災害 飽和鉛直浸透 数値シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

台湾における 2009 年台風 8 号の記録的な豪雨による災害では、ひと降雨の中で地すべり、深層崩壊、土石流、がけ崩れ、洪水氾濫など様々な種類の災害が互いに関連しながら発生した。すなわち、台風 8 号による台湾災害では一連の災害は錯綜して互いに関連しながら生じており、諸現象の順序を評価し各現象間の相互作用を含めた複合的な効果を評価することが重要となり、複合的に生起する現象の順序を数値シミュレーションを用いて評価しなければならないことを示している。しかしながら、その解析法も評価法も十分検討されていない。

小林村災害の発生後、多くの災害調査がなされ、小林村災害の直接的な原因が深層崩壊とそれに引き続いて発生した天然ダムの形成と決壊であることが明らかとなった。その一方で、深層崩壊発生約半日前に小林村と比較的安全な下流側の集落を結ぶ 8 号橋が土石流により流失し小林村が孤立していたこと、この孤立化により深層崩壊による本災害の発生は避けられない状況に陥っていたことが明らかとなった。すなわち、仮に深層崩壊の発生とそれに続く諸現象が予測できたとしても、8 号橋流失の予測ができなければ警戒避難対策などの防災対策は成功しない。したがって、台風 8 号による小林村の災害の趨勢を決していたともいえる 8 号橋の流域で生起した諸現象を明らかにし災害の直接的な原因となった深層崩壊に続く一連の現象との関連性を評価する必要がある。

今後、地球温暖化に伴い台風 8 号の降雨のように強い降雨強度で、長時間、広範囲に降るような雨が生じる頻度が大きくなることが懸念されており、このような複合的な災害が生じる可能性が高くなると考えられる。このような背景の下、台湾で生じた台風 8 号による複合災害の調査研究、とりわけ複合性に着目した調査研究は学術的にも社会的にも重要性・緊急性ともに極めて高い。

## 2. 研究の目的

本研究では、8 号橋流域の現地調査を行い現状と災害発生時の状況について検討するとともに水文観測等を通して流域の水文学的特徴と崩壊・土石流の発生条件について検討し、台風 8 号によりもたらされた諸現象の再現を、数値シミュレーションを用いて行う。また、8 号橋の流失とそれに関わる諸現象の発生時刻と小林村を襲った深層崩壊などの諸現象が生じた時刻を時系列的にならべ評価する。具体的には、以下を解明することを本研究の目的とした。

- (1) 小林村複合災害の概要
- (2) 深層崩壊の特徴と発生メカニズム
- (3) 崩壊土塊の運動と天然ダムの形成・決壊過程
- (4) 角埔溪の水文特性と 8 号橋の流失

## 3. 研究の方法

### (1) 小林村複合災害の概要

台湾成功大や関係機関による災害調査結果に基づき、小林村複合災害の分析を行う。2009 年台風 8 号 (Morakot 台風) の概況と降雨資料ならびに小林村複合災害のタイムラインの整理を行ったうえで、衛星画像や空中レーザー測量の結果から災害前後の地形変化量を求め、それぞれの災害局面での各事象のインパクトを明らかにする。これらの結果は研究全体の基盤情報を明確にする。

### (2) 深層崩壊の特徴と発生メカニズム

小林村災害の直接的な原因となった深層崩壊は勾配が約 25°と緩く、崩壊深さが 50m 以上と厚く、地表面とすべり面がほぼ平行で無限長斜面に近い。また、崩壊発生後、土塊は大きな加速度を得て斜面を下っている。したがって、崩壊のメカニズムを考えると、厚い土層厚の無限長斜面が一気に加速度を得ながら崩壊したことを説明できる必要がある。かつ、この崩壊が、長時間に渡る強い高強度を持った雨によってもたらされたことを同時に説明できなければならない。本研究では、これらの条件を満たす崩壊メカニズムを検討した。

### (3) 崩壊土塊の運動と天然ダムの形成・決壊過程

崩壊の発生メカニズムと合わせて崩壊土塊の運動シミュレーションを実施し、土塊の運動と天然ダムの形成過程の再現を試みる。加えて、計算の条件が崩壊発生条件に矛盾しないか検討する。次いで、天然ダムの形成から決壊までの時間が、流域の流出特性と比較して無理がないか、検討する。

### (4) 角埔溪の水文特性と 8 号橋の流失

対象地となる角埔溪は台湾南部中心を流れる旗山溪の支流である。流域は南北 2 つの支流からなる上流域と、それらの合流点より下流の下流域に区分できる。まず、台湾林務局が作成した角埔溪周辺のオルソ画像を用いて、崩壊地を判読した。次に、角埔溪の南北支流にて水文観測を実施し、得られたデータを再現可能な流出モデルを構築したうえで、11 km 下流に位置する甲仙における雨量データによる長期流量データの作成を行い、河床変動計算の入力データとした。

1 次元河床変動計算を実施し、土砂の供給条件を変化させることで、8 号橋の流出条件の検討を行った

## 4. 研究成果

### (1) 小林村複合災害の概要

台風 8 号台湾への接近・上陸に伴い、2009 年 8 月 6 日から約 4 日間での総降水量は多いところで 2,000~3,000mm にもおよんだ。台湾南部の南北に走る山岳地帯にそって主に雨がもたらされ、特徴として、長時間のみなら

ず、広域、高降雨強度であったことがあげられる。南北に走る山脈に沿う長い流域では、中流から下流にかけては洪水氾濫や堤防の決壊、橋梁の流失が数多く発生した。中流から上流にかけては崩壊や土石流などによる土砂災害や、道路や橋梁の流失が多発し、加えて側岸侵食による耕作地や家屋の流失が多数生じた。さらに、深層崩壊も数多く発生し、河道を一時的にせき止めた。

台風8号による災害の中でも最も注目されたのが小林村における災害である。小林村では深層崩壊によって村民のほぼ総数の約500人の人命が失われた。深層崩壊土塊は斜面を滑り落ち、本川（旗山溪; Chishan River）に入って天然ダムを形成し河道を塞ぎ止めた。この際、崩壊土塊の一部は小林村に到達し中心部をほぼ全壊させている。形成された天然ダムは約1時間後に越流により決壊し、小林村全体に氾濫し、さらに下流域に大きな影響を与えた。

図.1-1 に小林村から約10km下流に位置する甲仙で観測されたハイエトグラフと小林村で生じた諸現象の対応を示す。

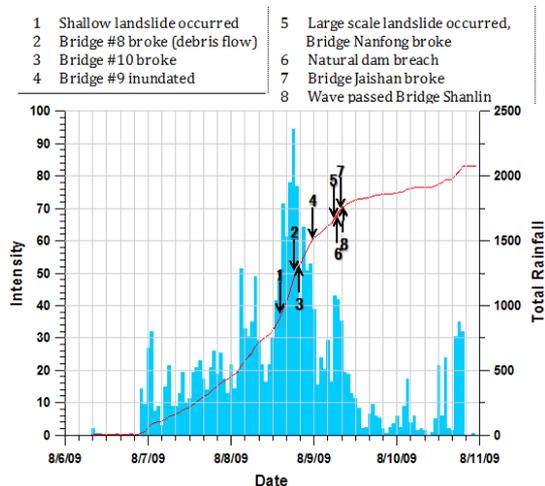


図.1-1 甲仙におけるハイエトグラフと小林村での諸現象の発生時刻

図.1-2 に小林村災害前後の衛星画像を示す。図.1-2 から小林村災害により小林村が壊滅したことが、その原因が主に背後の山腹斜面の深層崩壊によること、深層崩壊により河道閉塞（天然ダム）が生じたであろうこと、さらに河道閉塞が生じたであろうと考えられる箇所を境にその上下流で河道幅が大きく異なることが分かる。

表.1-1 に小林村複合災害の主なイベント時系列を示す。また、図.1-3 に関連する小林村周辺のランドマークの位置を図示する。

表.1-1 中の Event number は、図.1-2 中の数字に対応している。また、8号橋(#8 Bridge)は角埔溪に、10号橋は十号橋野溪に掛かっている。Nanfong 橋には水位計が取り付けられていた。この水位計のデータは深層崩壊の発生とほぼ時を同じくして途絶えている。Nanfong 橋はほぼ天然ダムが形成された地点

に本川を渡るようにつけられていたことから、水位計は Nanfong 橋の被災にともない破壊したものと推察される。



(a) 災害前の小林村



(b) 災害後の小林村

図.1-2 災害前後の小林村

表.1-1 小林村災害の主なイベントの時系列

Date	Time	Event	Event number	Rainfall depth (mm)	Water level (m)
2009/8/6	08:30	Typhoon warning was issued.	1	1	368.9
2009/8/7	17:00	Yellow debris flow warning was issued.	2	360	371.0
	23:00	Red debris flow warning was issued.	3	507	371.4
2009/8/8		Area around Bridge #10 was flooded.			
	19:00	Northward road was interrupted. Bridge #8 collapsed. Southward road was interrupted.	4	1529	374.0
	23:00	South area of the northern village was inundated. The inundated depth was about 60 cm.	5	1761.5	375.5
2009/8/9	05:20	South area of the northern village was inundated and the inundated depth was raised from about 60 cm to about 200 cm.	6	1992	375.7
	06:20	43 inhabitants moved to a hut.	7	1992	375.6
	06:20	The landslide occurred. The landslide dam formed. Nanfong bridge collapsed.	8	2023	-
2009/8/10	07:00	Landslide dam broke.	9	2060.5	-
2009/8/10	05:30	The warning for typhoon was lifted.	10	2515.5	-
2009/8/11	-	43 survivors were evacuated by helicopters.	11	2808	-

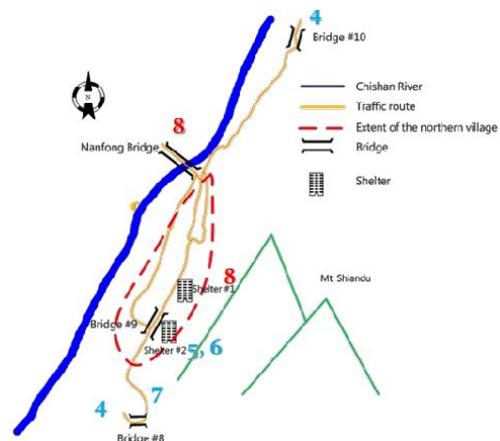


図.1-2 小林村の模式図と災害イベントの発生場所

一連のイベントの中で、8月9日午前6時20分の深層崩壊発生をさかのぼること12時間ほど前の午後7時ころに角埔溪と十番橋野溪に架かっていた橋が氾濫・流失したこと、天然ダム形成からわずか1時間足らずで決壊したことが、深層崩壊に伴う被害をより深刻化させた要因である。

#### (2) 深層崩壊の特徴と発生メカニズム

小林村で生じた深層崩壊を無限長斜面上の鉛直浸透過程で説明することを試み、長時間にわたる強い降雨強度を持つ雨による飽和に近い鉛直浸透が急激な安全率の低下を生じさせたであろうこと、勾配が25°であることにより、安全率が1以上から不連続的に1を割り、1との差により加速度が生じたであろうことが示された。

#### (3) 崩壊土塊の運動と天然ダムの形成・決壊過程

崩壊発生の際に安全率が1を下回り、加速度を得て滑動を始めたこと、滑動に伴い土塊の中の微細土砂が泥水化し、より加速度を得て本川に突入し、天然ダムを形成したことがシミュレーションから明らかとなった。また、天然ダム形成地点より上流の流域における流出解析から、ダムの形成から決壊までの時間がその時間内にその地点に流入する流入流量が天然ダムの貯水容量にほぼ等しいことが示され、下流における水位変化とどう傾向にあることが示された。

#### (4) 角埔溪の水文特性と8号橋の流失

##### 各時期の崩壊分布と崩壊土砂量

各時期の崩壊地の分布を図4-1に示す。2008年、2009年ともに南支流に巨大な崩壊1つずつが発生している。2007年以前には顕著な崩壊は確認できなかった。図4-1の崩壊に対して、Guzzetti et al. (2009)の方法を用いて崩壊土量を推定した。2006年以前には対象地にはほとんど崩壊地が存在せず、溪流にも不安定土砂が存在しなかったことが、空中写真や既存報告から明らかになっているので、河床変動計算の結果は土砂収支の観点から崩壊土砂量と対応する必要がある。

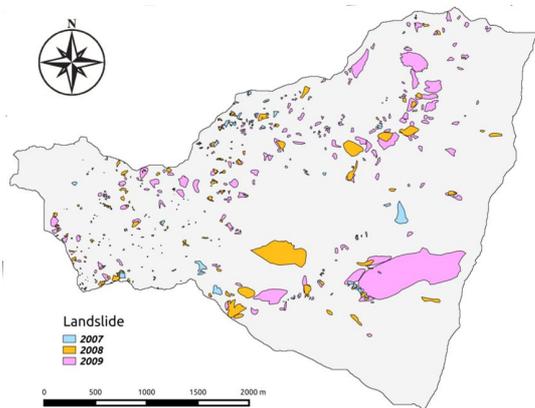


図4-1 角埔溪における崩壊分布の変化

#### 角埔溪における水文観測と流量データの作成

流量観測の結果から Manning の粗度係数を求めた。流量規模が小さい場合には粗度係数はばらつきを見せるが、流量規模が大きい場合には南北支流とも0.2程度で安定しており、河床変動を生じさせる出水イベントでは粗度係数は0.2程度とみなせる。

図4-2は、得られた粗度係数と観測された水位データから推定された降雨イベント時のハイドログラフの例である。図4-2に示された降雨イベントは日雨量が100mmを超える比較的大規模なものであったが、直接流出率は0.86程度であり、降雨イベント中から直後にかけて大部分の出水が生じていた。このような高い直接流出率は、角埔溪周辺流域における地下水位上昇メカニズムと密接に関係しており、角埔溪の隣接流域で小林村深層崩壊が発生していることと合わせて重要な情報を含むデータである。

角埔溪を対象とした kinematic wave モデルを構築したうえで、複数の降雨イベントにおけるハイドログラフとのフィッティングを行い、モデルの最適化を実施した。そのうえで、甲仙における降雨データを入力データとし、2007年以降の河床変動に關与する56の比較的大規模の大きな降雨データから連続流量データを作成した。このデータを用いて河床変動計算を実施した。

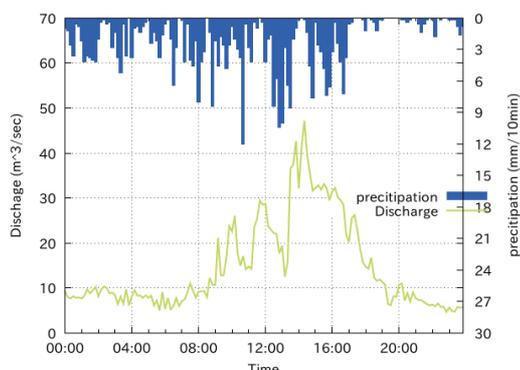


図4-2 推定されたハイドログラフの例

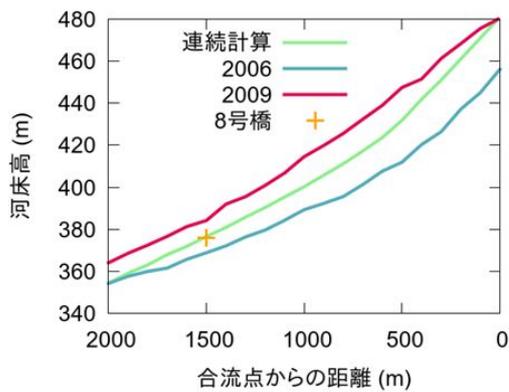
#### 角埔溪における河床上昇

角埔溪では、2006年から2007年の間に、合流点（計算上流端）で24.4mの河床上昇が生じていた。8号橋付近では15.3mの河床上昇が生じており、橋の流失が河床上昇によって引き起こされたことが分かる。下流端（旗山溪流中央）でも9.8mの河床上昇が見られるが、この河床上昇は小林村深層崩壊による天然ダムの形成とその決壊によって生じたものである。これらの事象は8号橋の流失後に生じたものであり、8号橋の流失に關与せず、河床変動計算での再現も行わない。河床変動計算に際しては、上流端からの供給土砂量と計算期間に關して、以下のように3つのシナリオを設定した。

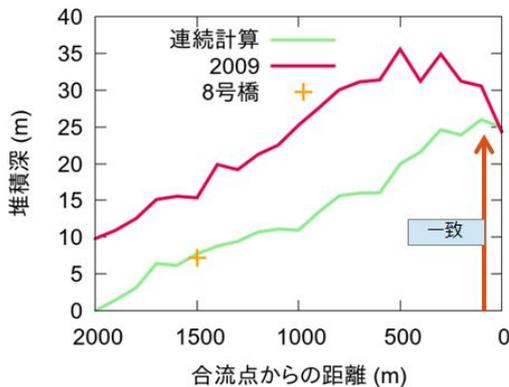
平衡土砂量を上流から供給して、2007年以降の全期間を対象として河床変動計算を实

施したところ（シナリオ 1）8号橋地点で、橋の流失を生じさせ得る程度の河床上昇は生じたものの、河床変動は十分に再現できなかった。計算開始地点では、Morakot 台風後に 2006 年の河床位から 24m の河床上昇が見られたが、平衡土砂量を与えた場合には当然ながら河床上昇は生じず、その影響が計算区間全体にわたって現れたと考えられる。

計算区間上流端での河床上昇が実測値に一致する供給土砂量を求めたところ、平衡土砂量の 1.04 倍であった。その値を供給土砂量として河床変動計算を実施した結果を図.4-3 に示す（シナリオ 2）。全体として河床変動の再現性は低い。その要因として旗山溪での河床上昇を考慮していないことが挙げられるが、旗山溪の河床上昇は主として Morakot 台風時に形成された天然ダムによって生じたため、計算への反映は難しい。また、上流端では河床変動が一致しているにも関わらず、その直下では計算の再現性が良くない。中流部において計算と実績の河床位がほぼ平行と見なせる状況であることを考慮すれば、比較的勾配の大きい合流点付近では、集合流動による土砂の流入と堆積が生じていた可能性がある。本研究では掃流砂のみを計算対象としているため、そのような事象が生じた場合には十分な再現性を有さない。いずれにしても、8号橋付近に着目すれば、やはり河床上昇によって橋の流失が生じ得る状況であったことが分かる。



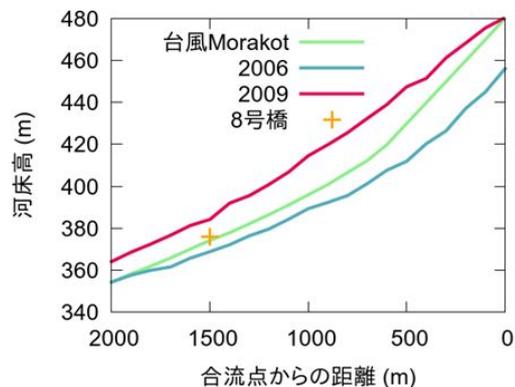
(a) 縦断面図



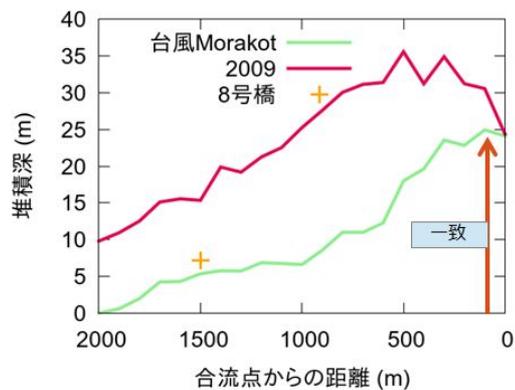
(b) 差分

図.4-3 計算による河床変動（シナリオ 2）

次に、Morakot 台風の雨量だけを用いた計算結果を図.4-4 に示す（シナリオ 3）。供給した土砂量は平衡土砂量の 1.08 倍とし、上流端での河床上昇を一致させた。Morakot 台風のみを対象とした河床変動計算では、合流点での河床上昇の影響は下流まで伝搬せず、8号橋付近での河床上昇は小さい。さらに、本計算では Morakot 台風の全雨量を使用して計算したが、8号橋が降雨途中に流出したことで、下流域での河床上昇に時間を要することを考慮すると、台風 Morakot の影響だけで 8号橋が流出したとは考えにくい。したがって、8号橋の流出を引き起こすような河床上昇は、Morakot 台風単独では生じず、過去の崩壊による流域での不安定土砂の生産と、その後の降雨イベントに伴う継続的な河床上昇によって引き起こされたと考えられる。



(a) 縦断面図



(b) 差分

図.4-4 計算による河床変動（シナリオ 3）

#### 角埔溪での土砂収支

各時期の崩壊土砂量の推定結果と、計算区間での実測の堆積土砂量、計算における供給土砂量および堆積土砂量との比較を行った結果を表.4-1 に示す。Kalmaegi 台風による堆積土砂量は、2008 年 9 月の空中写真を基に、GIS 上で河床幅を読み取ったうえで DEM と重ね、河道を複数区間に分割したうえで、それぞれの区間の堆積土砂量を求めることで得た。表.4-2 の結果から、崩壊土砂量は計算での供給土砂量より常に大きく、河床変動計

算を行う上で供給した土砂量が実際にあり得る値の範囲に収まっていた。また、Morakot後に多くの不安定土砂が上流に残っていた。

表.4-1 角埔溪での土砂収支

時期	2007年1月	2008年8月	2009年8月	計	
生産土砂量 ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ )	17	170	804	991	
時期	2007年	Kalmaegir台風	2008年9月 ~2009年7月	Morakot台風	
実績堆積土砂量 ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ )	0	68	239	307	
計算堆積土砂量 ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ )	-	15	81	56	152
計算供給土砂量 ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ )	-	27	161	129	317

### 結論

小林村の深層崩壊に伴う災害では、崩壊発生10時間前に村外への唯一の避難路である8号橋が流失し、人的災害の発生を決定づけた。8号橋の流失は河床上昇により生じているが、この河床上昇は深層崩壊を発生させた8号台風のみでは生じないことが水文観測、土砂流出・河床変動計算から示され、前年までの豪雨による土砂生産・流出が大きく寄与していることが明らかとなった。したがって、8号台風のような未曾有の降雨に対する警戒避難体制を考えると、深層崩壊や大規模土石流のような直接的な加害現象の予測のみならず、安全な避難経路と避難場所を確保するため、許容する河床高や侵食・堆積による地形変化を知ることが重要である。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計8件)

Imaizumi, F. and K. Miyamoto, 2014, Pore water pressure in two-dimensional slopes with multi-layer soil structure, Proc. Int. WS on Multimodal Sediment Disaster, 5, 9-17, 査読有

Mizumoto, T. and Y. Gonda, 2014, The effect of calculation conditions on the results of the two-dimensional lahar simulation, J. Taiwan Disaster Prevention Society, 7, 43-50, 査読有

Mizumoto, T. and Y. Gonda, 2014, The effect of initial condition on the results of the two-dimensional lahar simulation, Proc. Int. Debris-Flow WS 2014, TO5, 査読有

Chen, C.Y. and M. Fujita, 2014, A warning and evacuation system by means of multi sediment hazards simulation model on a basin scale, Proc. Int. Debris-Flow WS 2014, TO7, 査読有

Chen, C.Y. and M. Fujita, 2014, A multi-modal sediment disaster simulation on a basin scale, Proc. INTERPREVENT 2014, P-39, 査読有

Kuo, Y.S., Y.J. Tsai, Y.S. Chen, C.L. Shieh, K. Miyamoto and T. Itoh, 2013, Movement of deep-seated rainfall-induced landslide at

Hsiaolin Village during Typhoon Morakot, Landslide, 10, 191-202, 査読有, DOI: 10.1007/s10346-012-0315-y

今泉文寿, 宮本邦明, 2013, 多層構造を有する地層を鉛直浸透する場での間隙水圧と有効応力の分布, 砂防学会誌, 65(5), 3-10 [学会発表](計5件)

Fujita, M., 2014, Large-scale sediment disaster due to Typhoon Talas in 2011, Int. WS on Prevention and Mitigation of Large-scale Landslide Disasters, National Cheng Kung University, Tainan, 2014年10月1日

Chen C.Y. and M. Fujita, 2014, A prediction model of landslide occurrence and its scale using numerical-regression equations, 砂防学会研究発表会, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター, 新潟市, 平成26年5月29日  
山野井一輝, 藤田正治, 堤大三, 2013, GISベース土砂生産・土砂流出統合モデルの開発と足洗谷流域における適用, 砂防学会研究発表会, 平成25年5月30日

久保友春, 堀田紀文, 今泉文寿, 宮本邦明, 蔡原融, 李心平, 謝正倫, 2013, 各埔溪流域での崩壊履歴が台風 Morakot による災害に与えた影響, 砂防学会研究発表会, 平成25年5月30日

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

宮本 邦明 (MIYAMOTO, KUNIAKI)  
筑波大学・生命環境系・教授  
研究者番号: 00263492

#### (2) 研究分担者

権田 豊 (GONDA, YUTAKA)  
新潟大学・自然科学系・准教授  
研究者番号: 10303116  
堤 大三 (TSUTSUMI, DAIZO)  
京都大学・防災研究所・准教授  
研究者番号: 40372552  
藤田 正治 (FUJITA, MASAHARU)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号: 60181369

#### (3) 連携研究者

堀田 紀文 (HOTTA, NORIFUMI)  
筑波大学・生命環境系・准教授  
研究者番号: 00323478  
今泉 文寿 (IMAIZUMI, FUMITOSHI)  
静岡大学・農学部・准教授  
研究者番号: 80378918

#### (4) 研究協力者

謝 正倫 (SHIEH, CHJENG-LUN)  
台湾国立成功大学・教授  
李 心平 (LEE, SHIN-PING)  
台湾国立成功大学・防災研究センター  
陳 俞旭 (CHEN, YU-SHIU)  
台湾国立成功大学・防災研究センター  
蔡 元融 (TSAI, YUAN-JUNG)  
台湾国立成功大学・防災研究センター