

# 濁度成分の量と粒径に着目した流域内の 崩壊監視に関する研究

A STUDY ON THE DETECTION OF SLOPE FAILURE  
IN A MOUNTAINOUS WATERSHED FOCUSING ON QUANTITY  
AND PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF SUSPENDED LOAD

筒井和男<sup>1</sup>・坂口武弘<sup>2</sup>・西岡恒志<sup>2</sup>・福田和寿<sup>3</sup>・島田徹<sup>4</sup>・  
田中健貴<sup>5</sup>・木下篤彦<sup>6</sup>

Kazuo TSUTSUI, Takehiro SAKAGUCHI, Tsuneshi NISHIOKA, Kazuhisa FUKUDA,  
Toru SHIMADA, Yasutaka TANAKA and Atsuhiko KINOSHITA

<sup>1</sup>正会員 理修 和歌山県庁 (〒640-8585 和歌山県和歌山市小松原通1-1)

<sup>2</sup>非会員 和歌山県庁 (〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

<sup>3</sup>非会員 和歌山県庁 (〒640-8585和歌山県和歌山市小松原通1-1)

<sup>4</sup>正会員 農修 国際航業株式会社 (〒183-0057 東京都府中市晴見町2-24-1)

<sup>5</sup>非会員 農修 国土交通省大規模土砂災害対策技術センター  
(〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

<sup>6</sup>正会員 農博 主任研究員 国立開発研究法人土木研究所  
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

It is important to detect the occurrence of slope failure to reduce the damage by sediment disaster. We focused on quantity and particle size distribution of suspended load in river water. During some storm events we collected river water at 3 points in a mountainous watershed Kanayama river where slope failure occurred in 2011, and analyzed suspended load density and particle size distribution. In parallel we observed participation, turbidity and river water level continuously and took photographs by time lapse camera to detect the time of slope failure occurrence.

In result, when relatively large scale slope failure occurred, we found the hysteresis of relationship between suspended load density and river water discharge depicted counterclockwise loop changing from clockwise loop. And we showed possibility to estimate the scale of slope failure from the observation of turbidity of river water.

**Key Words** : *suspended load density, through discharge, hysteresis, turbidity, slope failure, sediment runoff, particle size distribution, ITag grain*

## 1. はじめに

近年、表層崩壊や土石流による被害が多発している。これらの土砂移動現象を下流域で早期に検知できれば、速やかな避難が可能となる。従来より、上流域での土石流発生を検知するため、ワイヤーセンサーもしくは振動センサーと警報機を組み合わせた土石流センサーが用いられてきた。しかし、急峻な山地内での電源設備の設置費用、ワイヤー切断による再設置の必要性、出水による河床変動による検知能力の変化、地盤振動の局所的影響

等の課題がある<sup>1)</sup>。また、降雨量と地形データにより、表層崩壊の発生を予測する技術も開発されている<sup>2)</sup>が、パラメータ設定方法などの課題も多い。さらに、河川の濁りに着目し、崩壊発生を検知しようとする研究も多い。これまで、土砂動態と濁りの変化との関係<sup>3)</sup>、崩壊発生検知のための閾値の設定<sup>4)</sup>、土砂移動の有無<sup>5)</sup>に関する研究などが行われてきた。流域内での粒径分布の違いや、崩壊土砂の直接供給、粒度選択を受けた河道内土砂の移動形態等により、浮遊物濃度や濁りの粒径分布は異なってくると考えられる。したがって、浮遊物濃度や粒

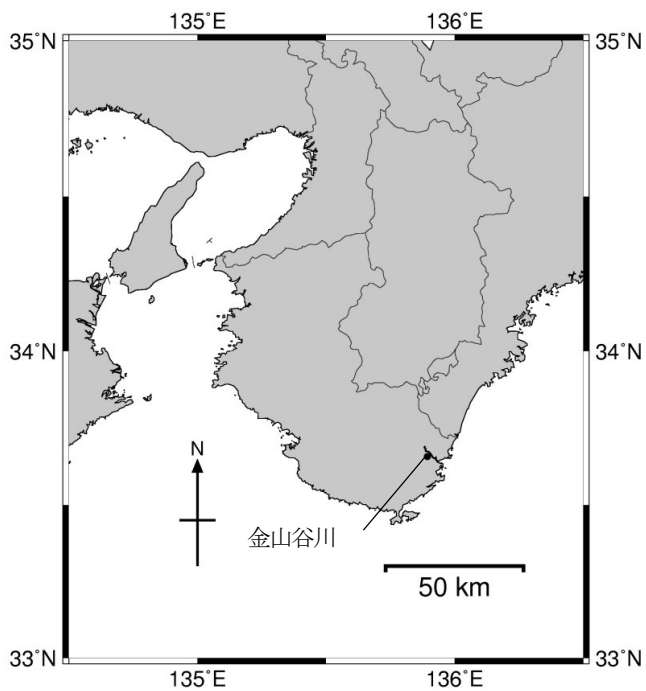


図-1 位置図

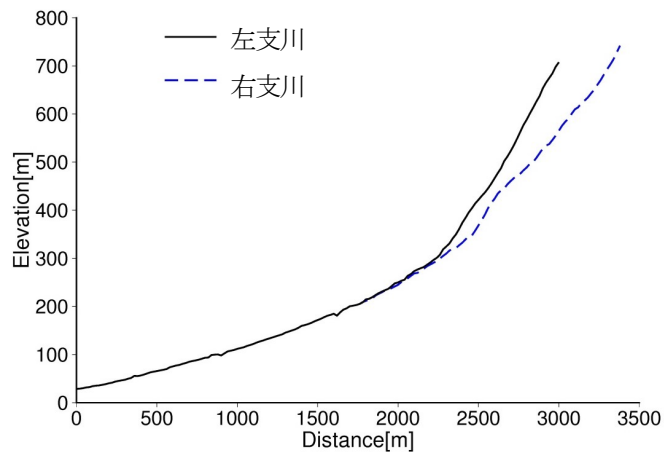


図-3 金山谷川の縦断面

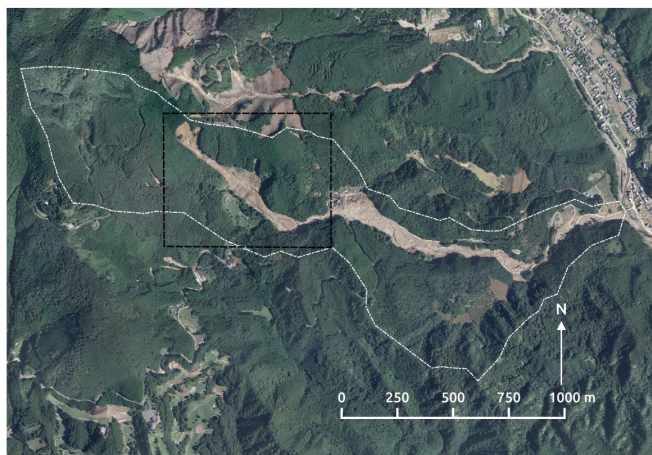


図-2 金山谷川の流域図

白一点破線は流域界，黒破線は図-5の範囲を示す。

径分布から，上流域の土砂移動現象が推定できれば，流域内の崩壊の監視が可能となる。

そこで，本研究は，豪雨時の濁度観測や崩壊土砂量の調査により，濁質成分の量と粒径に着目し，これらの時間変化から，流域内の崩壊監視に関する手法を提案する。

## 2. 調査地の概要

調査地は，紀伊半島南部に位置する那智川の支流である金山谷川流域である。図-1にその位置を示す。流域面積は1.37km<sup>2</sup>(図-2)であり，標高は海拔28mから746mである。流路延長は3.3kmで平均勾配は12.0°である(図-3)。地質は下部が熊野層群と呼ばれる第三紀の堆積岩



図-4 左支川の源頭部

類(砂岩泥岩互層)であり，上部は熊野酸性岩類(花崗斑岩)で構成される。2011年9月台風12号接近時には，最大時間雨量123mm，総雨量872mm(和歌山県市野々観測所)の降雨があった。これにより，調査地を含む一帯で多数の表層崩壊が発生し，土石流が下流の市街地に流れ込み，人的被害が生じた。崩壊に伴う生産土砂量は101,200m<sup>3</sup>とされている<sup>6)</sup>。崩壊は熊野層群と熊野酸性岩類との境界付近で発生している。本研究で対象とした崩壊地においても，地層境界が確認できる(図-4)。

## 3. 調査方法

2012年より観測を開始した。直接採水箇所，観測機器の配置および地形計測範囲を図-5に示す。各観測方法の概要は以下のとおりである。

### (1)崩壊地内の土砂収支の観測

拡大崩壊に伴う発生土砂量を確認するため，地上設置型レーザースキャナー(Topcon社製GLS-1500)に

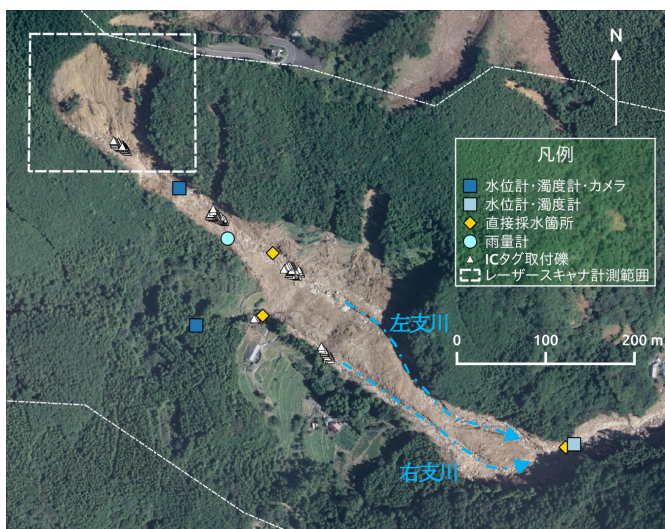


図-5 機器配置図

よる地形計測を実施した。計測は崩壊地全体を包括するように設定し、地形図を作成した。次に、異なる時期に計測した地形図との差分を求め、鉛直方向の地形変化量を計算した。これに基づき、崩壊地内の土砂の収支を求めた。地上設置型レーザー扫描仪による地形計測の実施状況を表-1に示す。

## (2)崩壊発生時刻の検知

崩壊発生時刻を検知するため、タイムラプスカメラ (Brinno 社製 TLC200) により撮影を行った。撮影間隔は 2 分である。撮影した画像は、回収後撮影映像を再生し、崩壊発生や表面浸食、湧水の発生時状況の確認した。また、崩壊地滑落崖上方に崩壊検知センサー (中央開発社製感太郎) を設置した。観測期間中に崩壊、表面浸食といった土砂移動の確認状況を表-2 に示す。なお、2015 年 7 月 10 日にも崩壊の発生を現地調査で確認しているが、その発生時刻は、崩壊斜面に設置していたボーリング孔内の傾斜計の損壊時刻により推定した。

## (3)直接採水による浮遊物濃度、粒度分析

出水時に、3 地点で直接採水を実施した。3 地点は、それぞれ崩壊斜面を源頭部に持つ左支川 (以下、左支川観測点と呼ぶ) と崩壊地がない右支川 (以下、右支川観測点と呼ぶ) と、これら 2 支川の合流点付近 (以下、合流観測点と呼ぶ) とした。採水間隔は 1 時間である。直接採水は 2012 年 6 月より 2015 年 7 月までに計 12 回行った。採水した試料は 2L のペットボトルに移し替え、室内にて浮遊物濃度、濁質成分の粒度分析を行った。

## (4)雨量・濁度・水位観測

2012年6月より、1地点にて、雨量観測の連続観測を実施した。観測間隔は10分である。2015年7月より、濁度計 (Campbell Scientific社製OBS-3+) および水位計 (クリマテック社製CWG-H10-C20) を用いた濁度および水位の連

表-1 地形計測概要

計測年月日	発生土砂量 (m <sup>3</sup> )	堆積土砂量 (m <sup>3</sup> )	流出土砂量 (m <sup>3</sup> )
2013/8/30	1130	600	530
2013/12/13	145	55	90
2014/5/16	350	200	150
2014/8/29	70	30	40
2015/5/27	250	0	250
2015/8/26	160	130	30
2016/6/3			

続観測を行っている。観測間隔は2分である。濁度・水位観測箇所においては、土のうを用いて流路を整え、流路を横断して単管パイプを用いて固定し、計測機器を設置した。流量算出のため、浮子により流速を計測し、水位と流量の関係を回帰曲線式により求めた。また、浮遊物濃度と濁度計の出力値との関係式を、直接採水した試料中の浮遊物濃度と、同時刻に計測した濁度計出力値との関係を回帰直線式により求めた。浮遊物濃度の連続観測により、一出水期間中の流下した浮遊砂量を算出した。

## (5)土砂発生源粒度分布

2014 年 11 月に崩壊地において、斜面中腹の花崗斑岩の風化部および崩壊残土の試料を採取し、粒度分布を分析し、浮遊砂として流下する土砂の割合を求めた。

## (6)埋め込み IC タグによる礫移動の観測

河川水の濁り発生時の土砂移動特性把握のため、2012 年8月に、流域内の礫200個に長さ30mmのICタグ (テキサスインスツルメンツ社製2000リーダーシステム) の埋め込みを行った。ICタグを埋め込んだ礫の平均径の最小値は7.9cm、最大値は125.6cm、平均値は28.7cmである。設置後、2014年6月、2015年1月、2015年3月、2015年8月に読取用アンテナ (テキサスインスツルメンツ社製2000リーダーシステム) を用いて、礫の位置を特定し、トータルステーションを用いて地点の座標を計測した。これにより移動量を算出した。なお、土砂の被覆等により、50cm以上埋没した場合、位置の計測は不可能となる。

## 4. 結果

### (1)崩壊発生の検知と地形計測

2013年8月30日と2013年12月13日との差分により、崩壊土砂量が1,130m<sup>3</sup>、斜面下部への堆積が600m<sup>3</sup>であった (表-1)。流出土砂量は530m<sup>3</sup>であった。2013年10月20

表-2 土砂移動状況

日時	土砂移動状況
2013/6/25 12:58	斜面内での土砂移動・表面浸食
2014/8/5 10:01	湧水による表面浸食
2014/8/9 5:13	斜面内での土砂移動・表面浸食
2014/8/9 6:09	斜面内での土砂移動・表面浸食
2014/8/10 7:57	斜面内での土砂移動・表面浸食
2014/8/10 8:08	斜面内での土砂移動・表面浸食
2014/8/10 8:25	拡大崩壊・河道への土砂流入
2014/8/10 10:36	斜面内での土砂移動
2014/10/10 7:42	湧水による表面浸食
2015/7/10 1:00頃	拡大崩壊 ※時刻は機器破損による推定

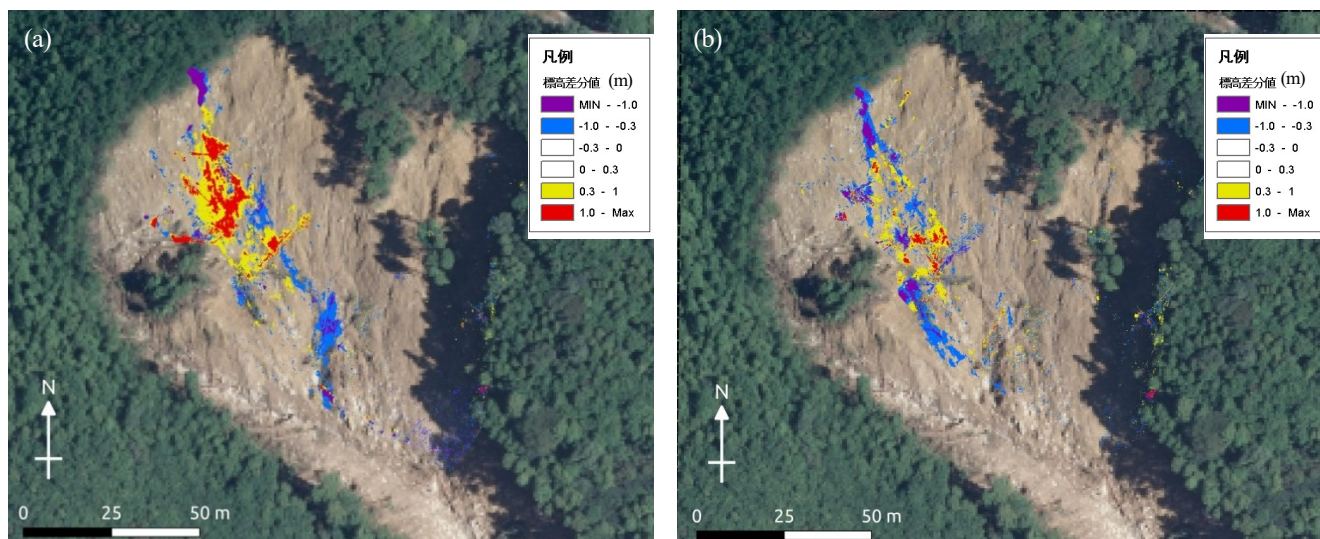


図-6 地形計測の差分図 (a) 2014/5/16と2014/8/29の差分 (b) 2015/5/27と2015/8/26の差分

日7時49分頃に台風27号の接近に伴う降雨により、崩壊の発生と溪流への土砂の流出がカメラ画像により確認できた。計測された崩壊流出土砂の大部分は、この時の崩壊・流出によるものと推察される。また、2014年8月10日8時25分に崩壊の発生が確認された。その前後にも、崩壊土砂の移動や斜面表面浸食の発生が確認されている。地形計測結果は、崩壊土砂量は経年的に減少する傾向を示している。計測毎の地形変化を図-6に示す。主に、崩壊斜面上部にあたる北西部分で拡大崩壊が進行し、その下部に崩壊土砂の一部の堆積し、さらにその下部でガリー浸食が進行していることが確認できる。

## (2) 浮遊物濃度と流量

直接採水した試料より得られた2014年8月9日から10日、2015年7月16日から17日の浮遊物濃度と流量の時系列を図-7に示す。いずれも、上流に崩壊斜面がある左支川観測所で、高い浮遊物濃度を示し、合流観測点では、他2観測点の中間の値を示している。合流観測点での浮遊物濃度のピークは、左支川観測点に比べて遅れて出現している。2014年8月において、9日6時頃と10日8時頃に浮遊物濃度と流量のピークが出現している。前者では浮遊物濃度ピークが流量ピークに先行し、この時刻に、ビデオ撮影により湧水による堆積土の浸食が確認されている。

一方、後者では浮遊物濃度のピークが流量ピークに遅れて出現し、この時刻にビデオ撮影により拡大崩壊の発生が確認されている。

## (3) 濁度成分及び崩壊地土砂の粒径

2014年8月9日から10日に直接採水した試料の濁質成分の粒径のメジアン値時系列を図-8に示す。左溪流観測点および合流観測点のいずれでも、河川に土砂が供給された時刻付近で、メジアン値の急激な減少が確認できる。

2014年7月10日13時と2014年8月10日9時に採水した試料の濁質成分の粒度分布を図-9に示す。前者では崩壊斜面の湧水による表面浸食が、後者では拡大崩壊の発生が、ビデオ撮影により確認されている。粒度分布のモード値が前者は14.2 $\mu$ m、後者は12.33 $\mu$ mとなり、後者において小さい粒径成分が多く含まれていた。

また、崩壊地土砂内のシルト以下の粒径割合は10.6%であった。

## (4) ICタグ埋め込み礫の移動量

埋め込みICタグによる斜面下部の礫の移動量観測結果を図-10に示す。ICタグを埋め込んだ200個のうち、131個で、移動量を計測し、最大の移動量は8.6mであったが土砂移動の特性把握には至らなかった。

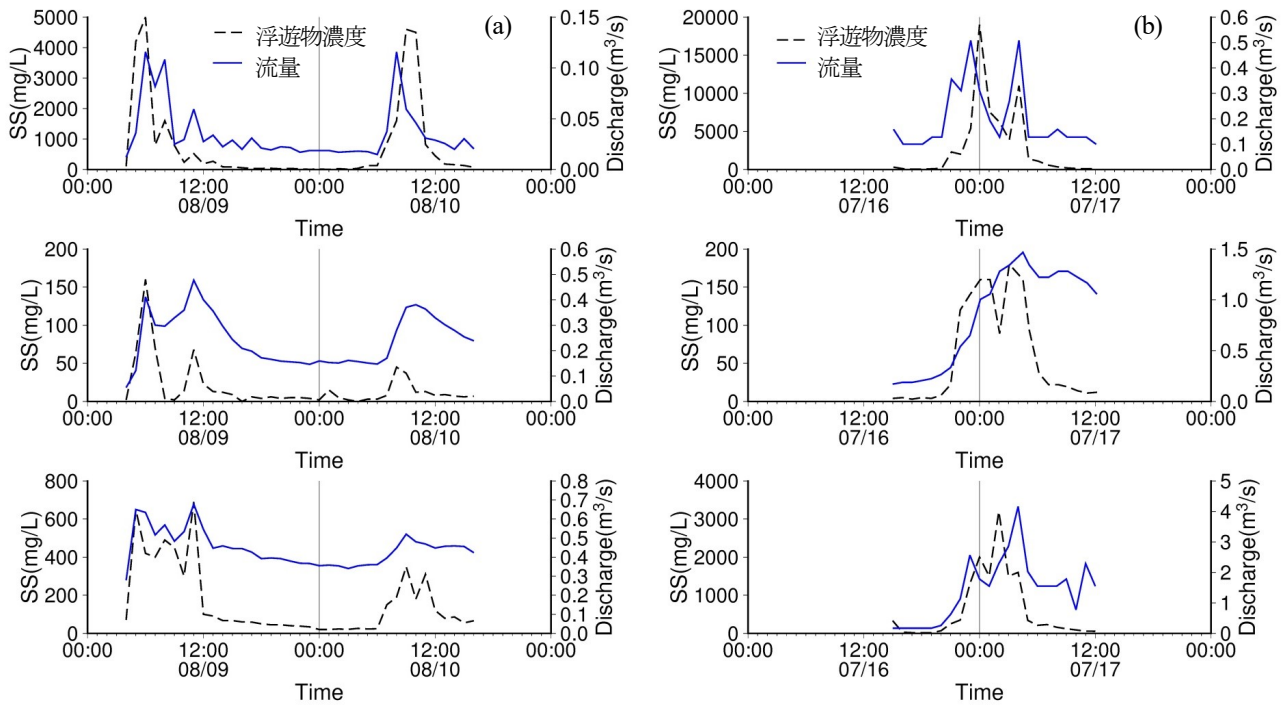


図-7 浮遊物濃度と流量の時系列 (a)2014/8/9-10 (b)2015/7/16-17

上段：左支川，中段：右支川，下段：合流点

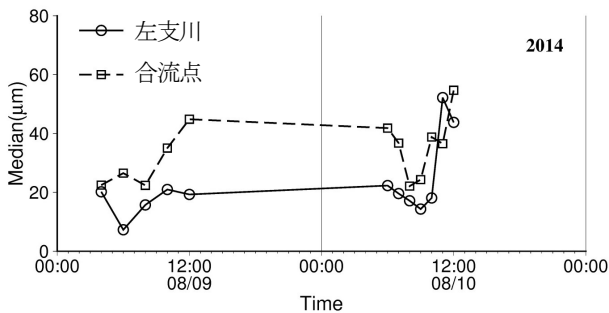


図-8 左支川と合流点の濁質成分の粒径中央値の時系列

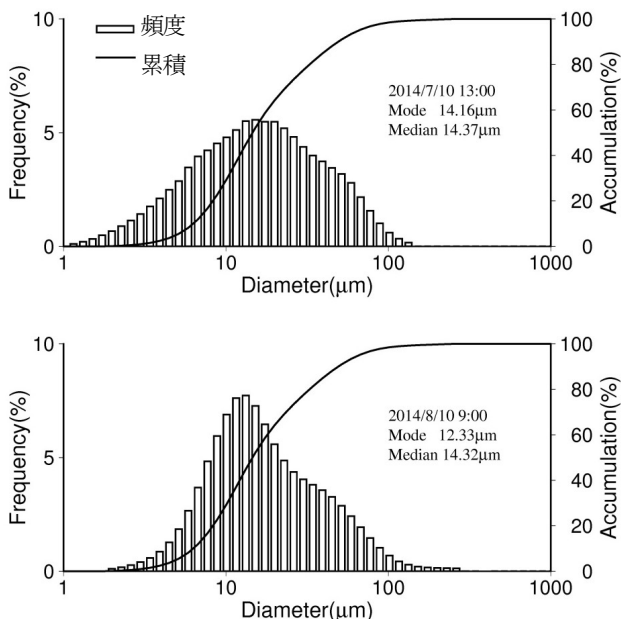


図-9 左支川の濁質成分の粒径分布

上段：2014/7/10 13時 下段：2014/8/10 9時

## 5. 考察

### (1) 濁度観測による斜面崩壊発生時刻の検知

斜面崩壊の発生が確認できた2014年8月9日と10日の流量と浮遊物濃度との関係を図-11に示す。流量と浮遊物濃度との関係は、時間変化において線形関係になく、時間変化ヒステリシス<sup>7, 8)</sup>が存在することが知られている。本研究においても時間変化ヒステリシスが認められる。左支川において、8月9日に右回りのループを描いていたヒステリシスが、崩壊発生後に左回りのループに変化した。また、2015年7月16日と17日の流量と浮遊物濃度との関係を図-12に示す。これにおいても、同様に崩壊が発生しており、左支川において左回りのループを示すヒステリシスを描いている。これらのことから、崩壊発生にともない、流量と浮遊物濃度の関係に着目し、ヒステリシスが左回りのループに変化すると、上流域での斜面崩壊の発生を検知することができると考えられる。ヒステリシスのループが左回りを描くのは、流量のピークに比べ、濁度のピークが遅れて発生したためである。流域内の崩壊発生により浮遊物が供給されたことを示すと考えられる。ただ、合流点では、左回りのヒステリシスが認められるものの、不明瞭である。崩壊非発生な支川からの合流点下流では、検知が困難になることが分かる。崩壊の検知には適正な濁度観測の配置が必要となる。また、流量は水位観測によりH-Q式を用いてリアルタイム観測が可能である。

### (2) 濁質成分粒径による土砂移動形態の推定

濁質成分の粒径分析により、崩壊発生時に濁質成分

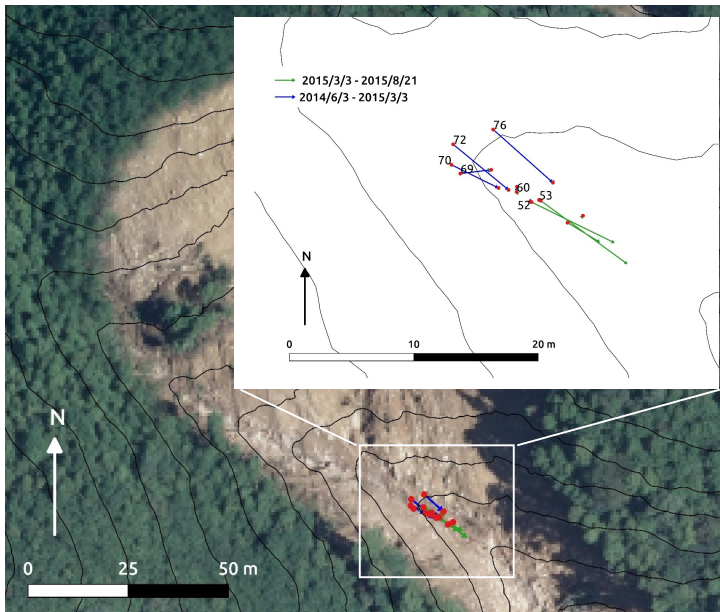


図-10 崩壊地直下のICタグ埋め込み礫の移動状況

の粒径が急激に減少すること。また、土砂の移動形態により、粒径分布に差があることが分かった。これにより河川水中の濁度の粒径を観測することで土砂移動形態を推定しうることが分かった。河川水中の粒子径と粒子数を観測可能なパーティクルカウンターによるリアルタイム観測が有用であると考えられる。

### (3) 濁度観測による崩壊土砂量の推定

2015年7月の台風11号時の出水時に崩壊により地形計測と崩壊地内の土砂の粒度分布とから、細粒分が $26.4\text{m}^3$ が流下したと算出できる。一方、濁度観測により求めた浮遊物濃度から求めた濁質成分量は $37.6\text{m}^3$ であった。両者のオーダーは一致しており、下流での濁度観測により、流域内土砂の粒度を事前調査することにより、崩壊土砂量の推定が可能と考えられる。

## 6. まとめ

大規模な崩壊斜面を含む山地流域での河川中の濁度、流量、土砂移動に関して観測を行った。観測により拡大崩壊とそれに伴う濁り発生が確認された。これらは現地調査およびビデオ撮影の結果、表層崩壊によるもの、表面の浸食によるもの、河床堆積物の二次移動によるもの、のいずれかであることが分かった。この中でも表層崩壊の発生時には、濁質成分の中央値が急激に低下することが分かった。濁質成分の流下量と崩壊土砂量との間には、相関関係があることが分かった。また、流量と浮遊物濃度の関係では、一連の降雨期間中、崩壊発生前後で右方向ループから左方向ループへと変化することが分かった。

以上より、流量と浮遊物濃度の関係が左方向ループに変化すること、濁質成分の粒径が低下することから流域

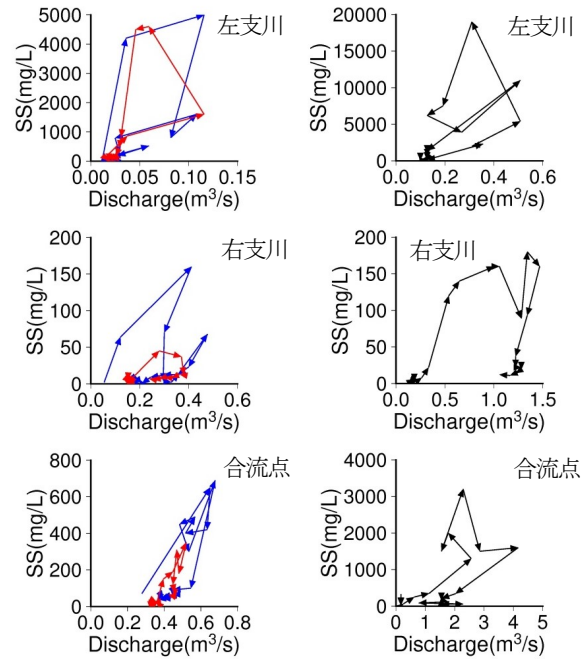


図-11 浮遊物濃度と流量の履歴 青：2014/8/9 赤：2014/8/10

図-12 浮遊物濃度と流量の履歴 2015/7/16-17

内での崩壊発生の検知と、濁質成分量から崩壊規模の推定ができる可能性を示した。しかし、比較的規模の大きい崩壊での観測事例は少なく、崩壊発生とヒステリシスの変化のタイミングの検討も必要であり、今後も観測・調査を継続し知見の蓄積を図りたい。

### 参考文献

- 1) 土木研究所：振動検知式土石流センサー設置マニュアル案, 2005.
- 2) 秋山怜子・木下篤彦・内田太郎・高原晃宙・石塚忠範：簡易な水文モデルを用いた崩壊発生時刻予測手法, 砂防学会誌, Vol. 68, No. 2, p. 3-13, 2015.
- 3) 藤田正治・澤田豊明・水山高久：山地流域における濁度変化と土砂動態, 水工学論文集, 第47巻, p. 739-744, 2003.
- 4) 土砂災害警戒避難に関わる前兆現象情報検討会：土砂災害警戒避難に関わる前兆現象情報の活用の方について, 2006.
- 5) 小山内信智・水野秀明・林真一郎・沖中健起：濁度計を用いた土砂移動緊急監視システムに関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, No. 332, 2006.
- 6) 木下篤彦・神野忠広・久田昭文・森川智・大西誠・吉川卓郎・郡典宏・島田徹・西川友章：平成23年台風12号による那智川流域における土石流災害実態, 平成24年砂防学会概要集, p. 96-97, 2012.
- 7) Williams, G.P. : Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in river, Journal of Hydrology, 111, 89-106, 1989.
- 8) 倉茂好匡：河川の浮遊土砂研究における最近の動向, 北海道大学地球物類学研究報告, No. 59, p. 1-13, 1996.

(2017. 4. 3受付)