

1. はじめに

平成14年7月17日に三重県西之貝戸川で発生した土石流（水野、2002）や、平成16年10月23日の新潟県中越地震に伴う崩壊・河道閉塞（国土交通省国土技術政策総合研究所、2005）等の事例のように、流域内に大量の不安定土砂が河道とその周辺に供給された場合、その後の降雨に伴う土石流や天然ダムの決壊・侵食等の形態で土砂が下流に流出しやすくなるため、下流域における土砂災害リスクは高まる。このような場合、土砂移動を検知し、警戒避難などを実施することにより、土砂災害リスクを低減させる必要がある。

土石流の発生原因は1) 溪床堆積物が侵食されて土石流となる場合、2) 崩壊土塊が水と混合して土石流となる場合、3) 天然ダムが決壊して土石流となる場合に大きく分類できる（高橋、2004）。いずれの場合においても、時間的な差はあるにしても、土石流が発生する前に、土砂が下流に流されることになる。写真-1は河道閉塞によって下流に流れ出す濁水の一例で、平成18年5月13日に岐阜県揖斐川において発生したものである。写真-1から河道に堆積した土砂の一部が侵食され、濁水となって下流に流されていることが分かる。このような濁水、つまり、土砂容積濃度を検知することができれば、崩壊や土石流といった土砂移動現象の発生を推定することが可能となる。

そこで、本研究は土砂容積濃度に着目して、土砂災害を引き起こす土砂移動の有無を検知する手法を開発することを目的とする。本研究を実施するに当たり、崩壊や土石流といった土砂移動の発生時と非発生時の土砂容積濃度の違いを把握するために、三重県いなべ市にある西之貝戸川で観測を行なった。その観測結果と、著者らの所属する砂防研究室が新潟県長岡市と魚沼市を流れる芋川において観測している結果を整理して、土砂移動の発生時と非発生時の土砂容積濃度の時間変化を整理した。その結果に基づいて、対象とする土砂移動の有無を判断する方法を検討した。ここではそれらの結果を報告する。なお、河道やその周辺に大量の不安定土砂が供給された後に

緊急的に土砂移動を監視する場合を対象としている。

なお、ここで報告する観測結果のうち芋川のものは既往文献（小山内ら、2006）と一部重複する。



写真一 1 河道が閉塞した事例（岐阜県揖斐川、平成18年5月13日撮影）

2. 濁度計を用いた監視システム

2. 1 監視システムの概要

流水の鉛直方向の加速度が無視できるほど小さいと仮定すれば、土砂容積濃度を鉛直方向で平均した値（断面平均土砂容積濃度）はスカラー量であるため、流れの速度と等しく下流に伝播される。そのため、上流域で土砂が移動を開始した場合、土砂容積濃度が急激に上昇することが予想されるので、その変化を検知できれば、崩壊や土石流といった土砂移動現象の発生確率が高まったと判断できる。

図－1は監視システムの概念図で、基本形を示したものである。監視システムは、土砂移動モニタリングで浮遊砂の観測に用いられることの多い濁度計、それを流水中に固定する装置、及び、濁度計からの出力値を記録するデータロガーで構成される。本観測では濁度計からの出力値をデータロガーに蓄積しているが、実際に監視システムとして配備する際には、警戒避難システムに接続できるように改良する必要がある。また、流水中に固定する装置は現場の条件に応じて適宜修正する必要がある。

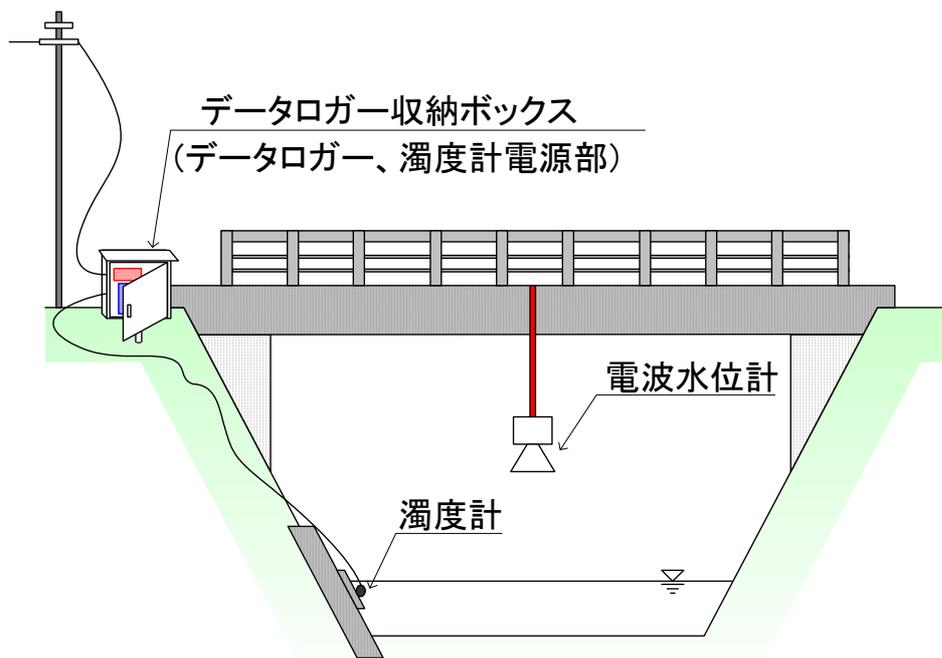


図-1 監視システムの概念図



図-2 濁度計を設置した流域の位置

2. 2 濁度計による検知の可能性

砂防研究室が三重県にある西之貝戸川と新潟県にある芋川の2地点(図-2)に設置した濁度計の観測データに基づいて、河道を閉塞した土砂(天然ダム)や河床に堆積している不安定な土砂の移動により生じる濁水の土砂容積濃度の時間変化を検知する可能性を検討した。

2. 2. 1 西之貝戸川

西之貝戸川は三重県いなべ市を流れる溪流で、員弁川水系真名川流域に属する。流域面積は1.22km²である。1998年から2002年までに土石流が6回発生しており(水野、2002、沼本ら、2004)、西之貝戸川は土石流の発生頻度が高い土石流危険溪流である。写真-2は2002年7月17日に発生した土石流が砂防えん堤によって捕捉された様子、写真-3は砂防えん堤の上流で土石流の流下区間の様子である。流下痕跡から少なくとも3波の土石流が生じたことが報告されている(水野、2002)。また、西之貝戸川では、土石流の発生原因は溪床に堆積していた土砂の移動と溪岸の崩壊であることが報告されている(沼本ら、2004)。

図-3は西之貝戸川の流域図で、図中に濁度計を設置した地点を示した。写真-4は観測装置の全景で、写真の左手が上流側である。土石流に流されないように、写真の左下側(右岸側)にデータロガーを設置した。写真の左側に見えるパーシャルフリームの左岸側に、土砂が流出してきた際に目安となる木杭を設置した。また、右岸側にはビデオカメラを設置した。写真-5は濁度計を設置した箇所近景である。濁度計はD&A Instrument社製OBS-3で、計測値を0~+5Vの電圧で出力する。その電圧値は分解能12bitのA/Dコンバータを内蔵したデータロガー(東京計測社製)に記録した。フロート式水位計による水位の観測値が所定の深さに達した場合、データロガーは1分間隔で10秒間濁度計の出力値を計測し記録するように設定した。土砂容積

濃度と濁度計の出力値との関係式を予め室内試験により把握し、2003年7月2日から7月24日までの期間は式(1)、2003年11月5日から2004年6月21日までは式(2)に基づいて土砂容積濃度を算出した。室内試験の方法は小山内ら(2005)と同様で、巻末資料に詳しく記載したのでそちらを参考にしていきたい。

$$y = 7.915 \times 10^{-5} \cdot x^2 + 6.266 \times 10^{-4} \cdot x \quad \dots (1)$$

$$y = 4.452 \times 10^{-5} \cdot x^2 + 3.342 \times 10^{-4} \cdot x \quad \dots (2)$$

ここで、 x ：濁度計からの出力値(V)、 y ：土砂容積濃度である。濁度計は2003年7月2日から稼働し、同年7月24日までデータを蓄積した。その後、同年8月10日に、土石流が発生したため、濁度計が流出した。同年11月5日に再度濁度計を設置し、2004年6月まで観測を継続した。写真-6は2004年2月12日に撮影したもので、濁度計を再度設置した状況である。

図-4(a)、(b)は2003年7月20日~21日と2004年6月21日の観測結果で、それぞれ濁度計の出力値から算出した土砂容積濃度と藤原岳雨量観測所における時間雨量の関係を示したものである。2003年7月20日~21日の気象状況は最大時間雨量32mm/hr. (20日13時から14時)、最大10分雨量9mm/10min. (20日13時20分から30分)であり、2004年6月21日の気象状況は最大時間雨量34mm/hrs. (21日14時から15時)、最大10分雨量12mm/10min. (21日14時10分から20分)であった。2003年7月20日~21日の観測では、土砂容積濃度が0.0004% (20日午後3時20分)から0.0053% (20日午後3時50分)へと13倍程度急激に上昇した。その後、濁度計の出力値が計測範囲を超えたため、土砂容積濃度の最大値は不明であった。2004年6月21日の観測では、土砂容積濃度が0.0001% (午前10時50分)から0.0029% (午後2時10分)へと29倍程度急激に上昇した。その後、濁度計の出力値が午後2時20分まで計測範囲を超えたため、土砂容積濃度の最大値は不明であった。2004年6月21日の観測時に濁度計の設置地点を撮影したビデオ映像を解析したところ、目印として設置していた木杭が流出したことが分かった。また、同年6月23日に実施した現地踏査で、濁度計は写真-7に示すように直径10cm程度の砂礫で埋まっていた。以上

のように、これらの2つの観測時における降雨強度が近い値で、濁度計の出力値がオーバーレンジしていたこと、さらに2004年6月21日の観測後濁度計が砂礫で埋まっていたことから、砂、シルト、粘土といった細かい土砂だけでなく礫といった粒径の大きい土砂の移動が生じたと推測される。なお、図-4(a)と(b)で土砂容積濃度のオーバーレンジに差が生じているが、これは観測に用いた濁度計が異なったのである。

図-5(a)、(b)は2003年7月3日~4日、同月13日~14日の観測結果で、それぞれ濁度計の出力値から算出した土砂容積濃度と藤原岳雨量観測所における時間雨量の関係を示したものである。2003年7月3日~4日の気象状況は最大時間雨量10mm/hr. (3日22時から23時)、最大10分雨量4mm/10min. (3日22時50分から23時00分)であり、土砂容積濃度の最大値は0.002%であった。同月13日~14日の気象状況は最大時間雨量15mm/hr. (13日18時から19時)、最大10分雨量5mm/10min. (13日17時50分から18時00分と同日18時10分から18時20分)であり、土砂容積濃度は0.001%であった。2003年7月3日~4日、同月13日~14日の観測時の降雨強度及び土砂容積濃度の最大値が2003年7月20日~21日と2004年6月21日の観測時に比べて小さかったことから、前者の観測時には、濁水のように主に砂、シルト、粘土といった細かい土砂が流水中を浮遊して流れる状況が卓越するような土砂移動が生じていたと推測される。

礫の移動が生じていたと推測される観測結果(図-4)と生じていなかったと推測される観測結果(図-5)を比較すると、礫の移動がある場合、土砂容積濃度が7倍以上に急激に増加するという傾向が見られた。

なお、図-4(a)(b)と図-5(a)(b)で示した観測期間中における濁度計の出力値、土砂容積濃度の換算値は巻末資料に示した。



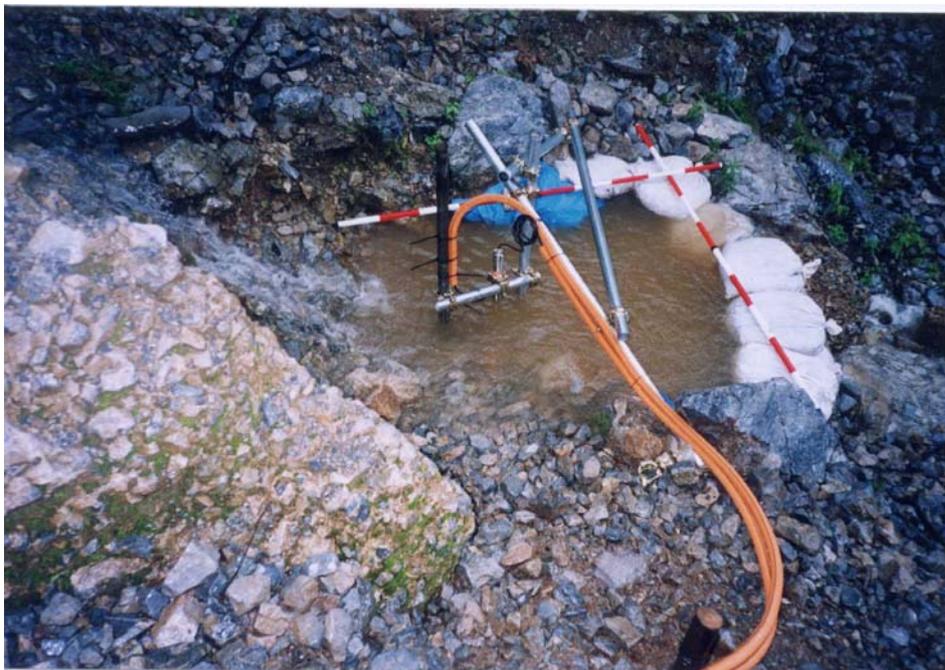
写真－2 西之貝戸川での土石流の流下状況（2002年7月18日撮影）



写真－3 西之貝戸川での土石流の捕捉状況（2002年7月17日撮影）



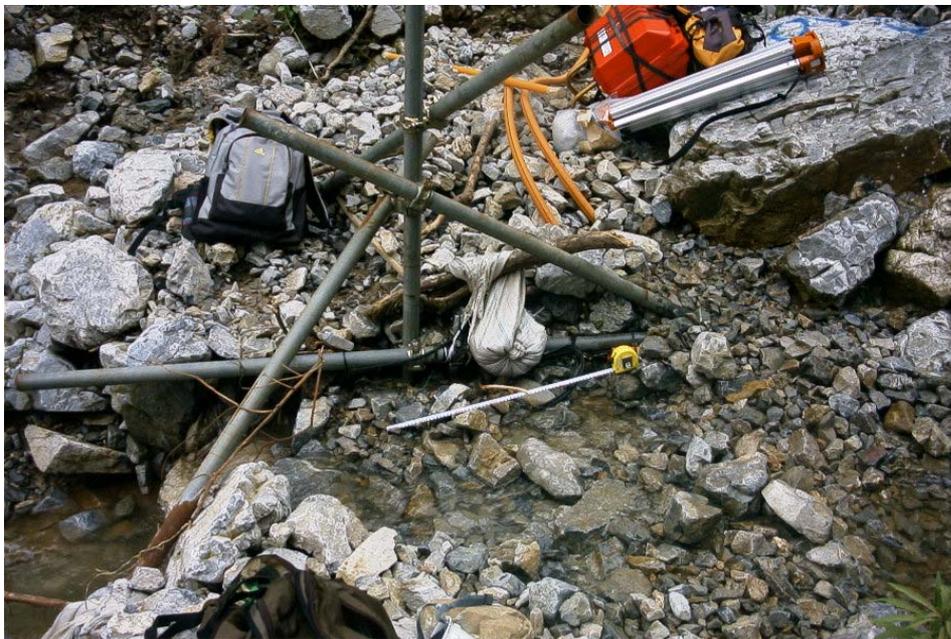
写真－4 濁度計の全景（2003年6月24日撮影）



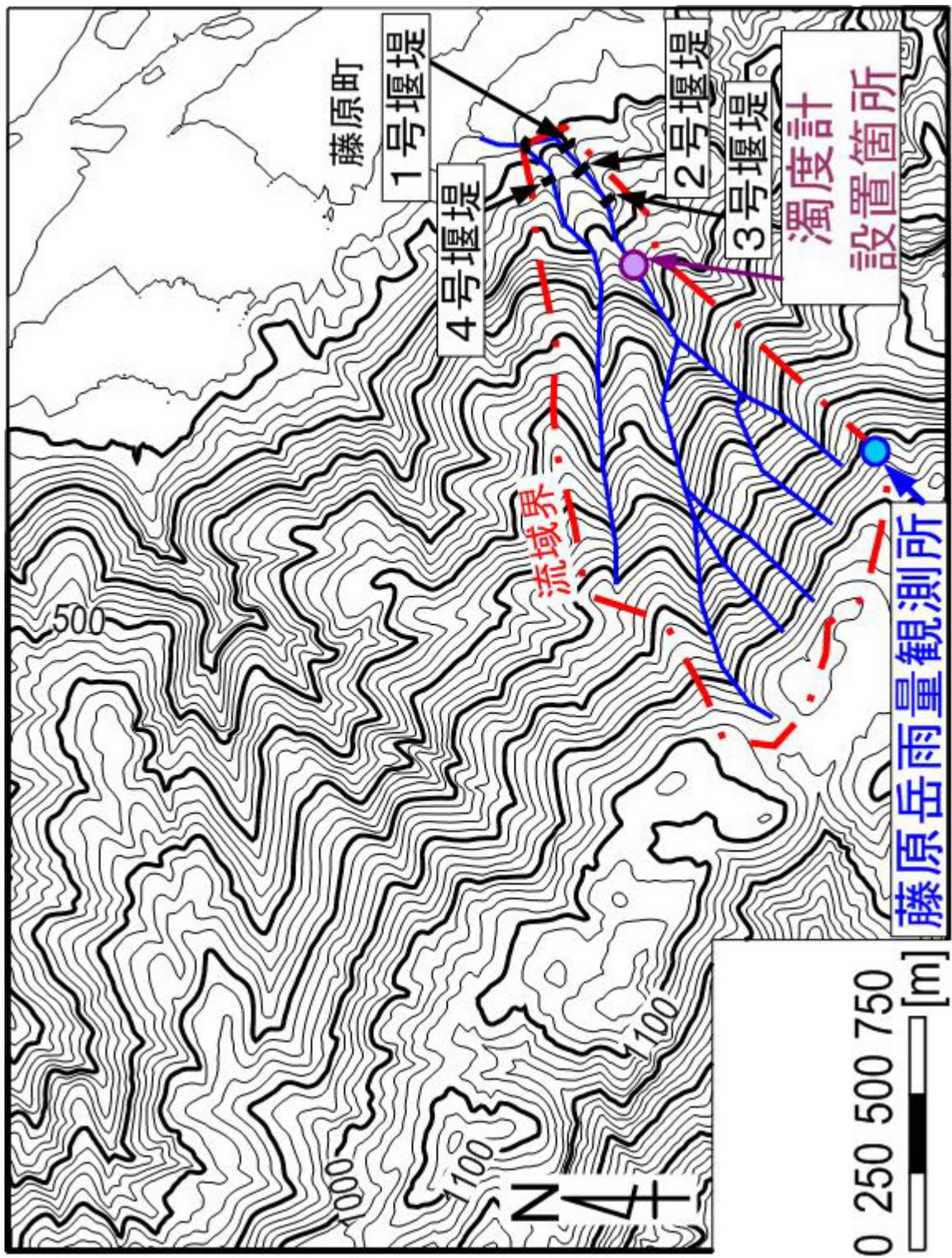
写真－5 濁度計の近景（2003年6月24日撮影）



写真－6 濁度計の再設置状況（2004年2月12日撮影）



写真－7 再設置した濁度計の状況（2004年6月23日撮影）



図一3 濁度計の設置箇所（西之貝戸川）

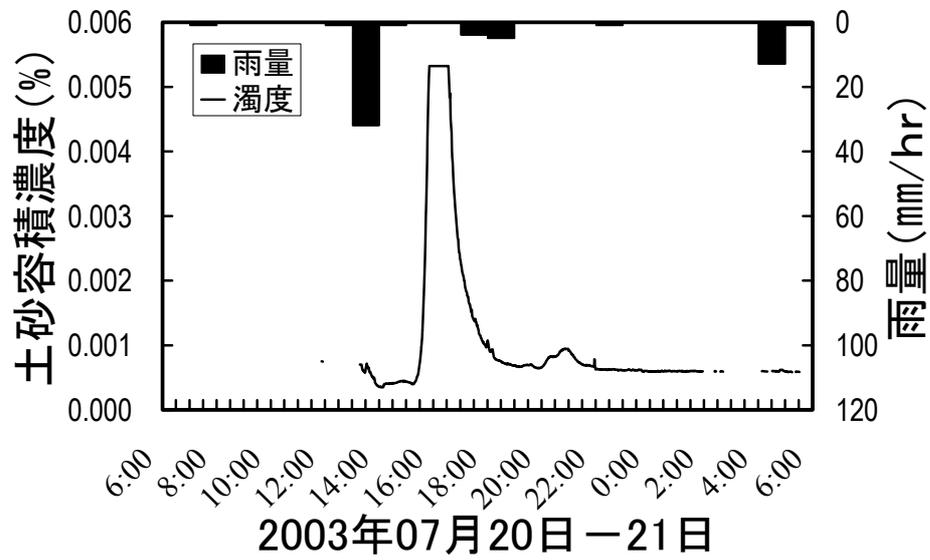


図-4 (a) 濁度計の観測結果 (西之貝戸川)

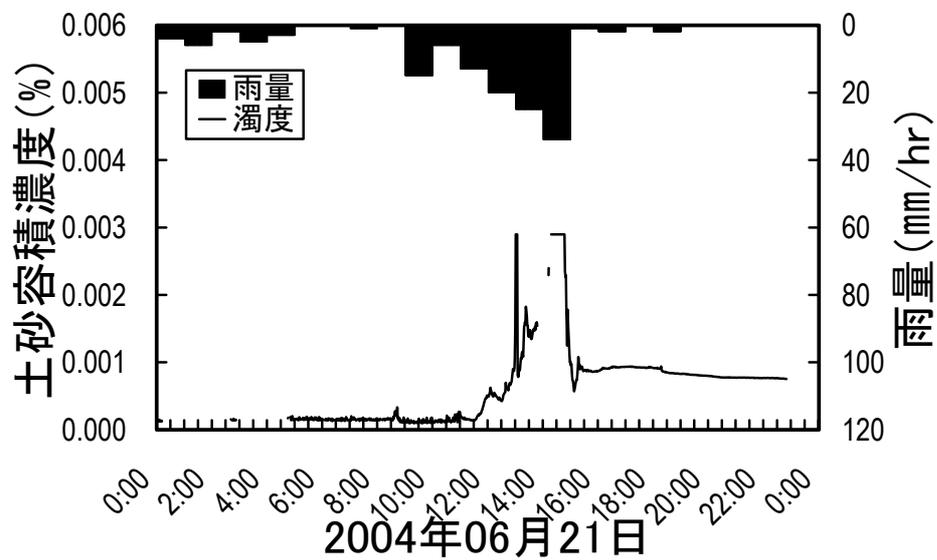


図-4 (b) 濁度計の観測結果 (西之貝戸川)

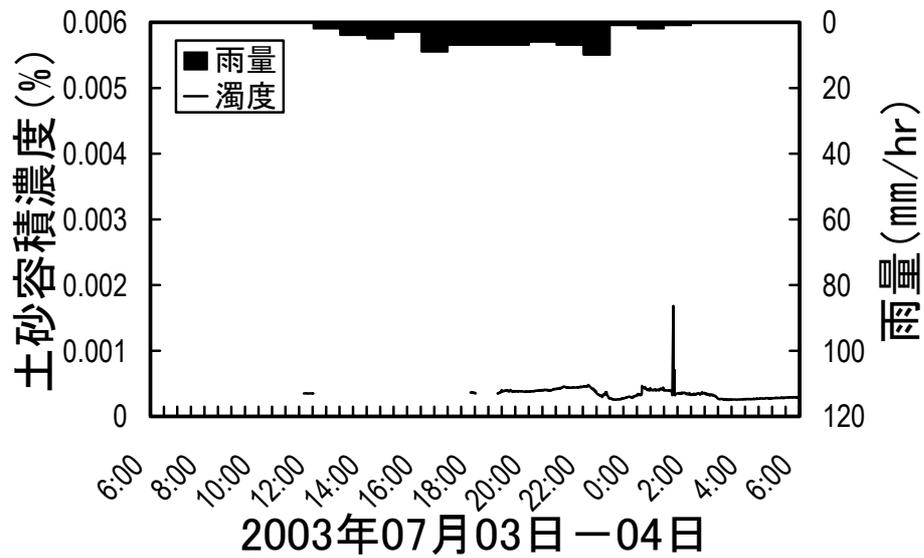


図-5 (a) 濁度計の観測結果 (西之貝戸川)

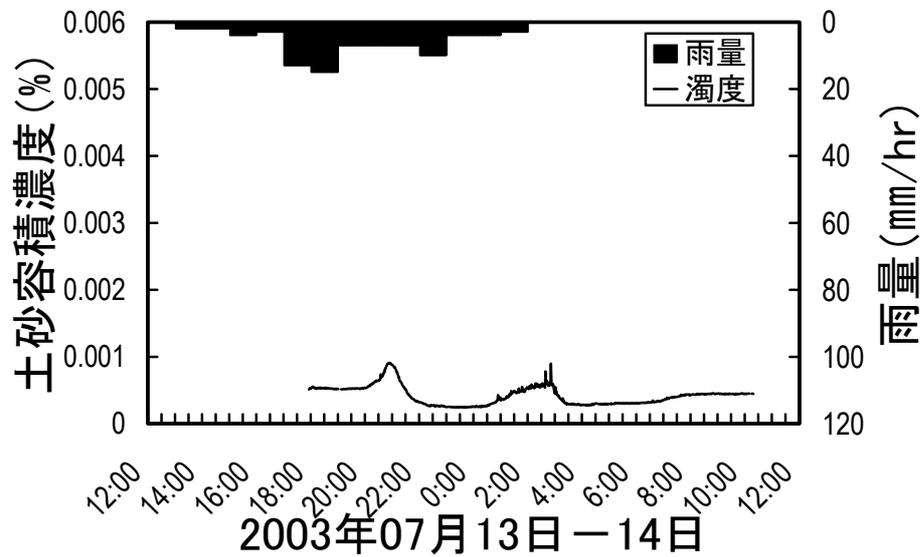


図-5 (b) 濁度計の観測結果 (西之貝戸川)

2. 2. 2 芋川

芋川は新潟県内を流れる河川で、流域面積 38.4km²、流路延長 17.2km であり、信濃川水系に属する（図－6）。流域内には、西願寺川、冷子沢川、東川、前沢川、神沢川、芋川沢、多間多川、塩谷川、小芋川の主な 9 つの小流域が存在する。平成 16 年新潟県中越地震の際には、芋川本川、冷子沢川、東川、前沢川、神沢川、芋川沢、塩谷川で河道閉塞が発生した。特に、芋川本川では、主に寺野地区、南平地区、楯木地区、東竹沢地区、十二平地区において河道閉塞（天然ダム）が形成された²⁾。写真－8 は寺野地区で生じた河道閉塞を上流側から撮影したもので、河道閉塞と濁水の状況が良く分かる。このように芋川には平成 16 年新潟県中越地震に伴って地すべりや崩壊が発生したため、大量の土砂が供給された。

濁度計は図－6 に示す観測地点に設置した。なお、観測地点は小芋川大橋である。写真－9 は芋川に設置した濁度観測システムを右岸側から撮影したものである。鋼製で H 型鋼（写真中央の茶色いもの）上を移動して任意の水位に固定できる装置に濁度計を固定した。濁度計とデータロガーは西之貝戸川で用いたメーカーのものと同じで、それぞれ D&A Instrument 社製 OBS-3 東京計測社製データロガーである。但し、西之貝戸川と異なり、芋川ではデータロガーは 10 分間隔で 10 秒間計測し出力値を保存した。なお、メモリーカードは約 40 日に一度交換した。濁度計からの出力値は式（3）（小山内ら、2006）を用いて土砂容積濃度に換算した。式（3）を求めた方法は巻末資料に示したので、そちらを参考にしていきたい。

$$y = 1.247 \times 10^{-3} \cdot x^2 + 7.693 \times 10^{-2} \cdot x \quad \dots (3)$$

ここで、式（3）の記号は式（1）、（2）と同じである。写真の左側に写っている 2 本の線はワイヤセンサーである。この観測システムは 2005 年 2 月 23 日から稼働している。ここでは、2 つの出水時における観測事例を紹介するが、その他の観測事例は参考文献（小山内ら、2006）に取りまとめたので、そちらを参考にしていきたい。

図－7 は 2005 年 6 月 27 日から 28 日にかけての観測結果で、大きな土砂流出が生

じていたと推測される場合である。2006年6月27日～28日の気象状況は最大時間雨量23mm/hr.（28日10時から11時）であった。この出水では、小芋川大橋に設置されていたワイヤセンサーが切断されており、また、濁度計を固定したH型鋼に流木が引っかかっていたことから、大量の土砂・水と流木が流出したと推測される。土砂容積濃度は28日の午前2時以前で0.0039%程度の値であったが、午前2時50分の時点で0.4289%の値に到達した。その後、濁度計が計測可能な範囲を超えたため、土砂容積濃度は0.4289%のままで推移した。このように土砂容積濃度が50分程度の短時間で100倍以上大きくなったことが分かった。なお、午前11時40分ごろ濁度計の出力値が一時計測範囲内に入ったため、土砂容積濃度が低下した。これは濁度計とデータロガーを接続するケーブルが切断された影響がでたためと考えられるが、詳細な原因は不明である。

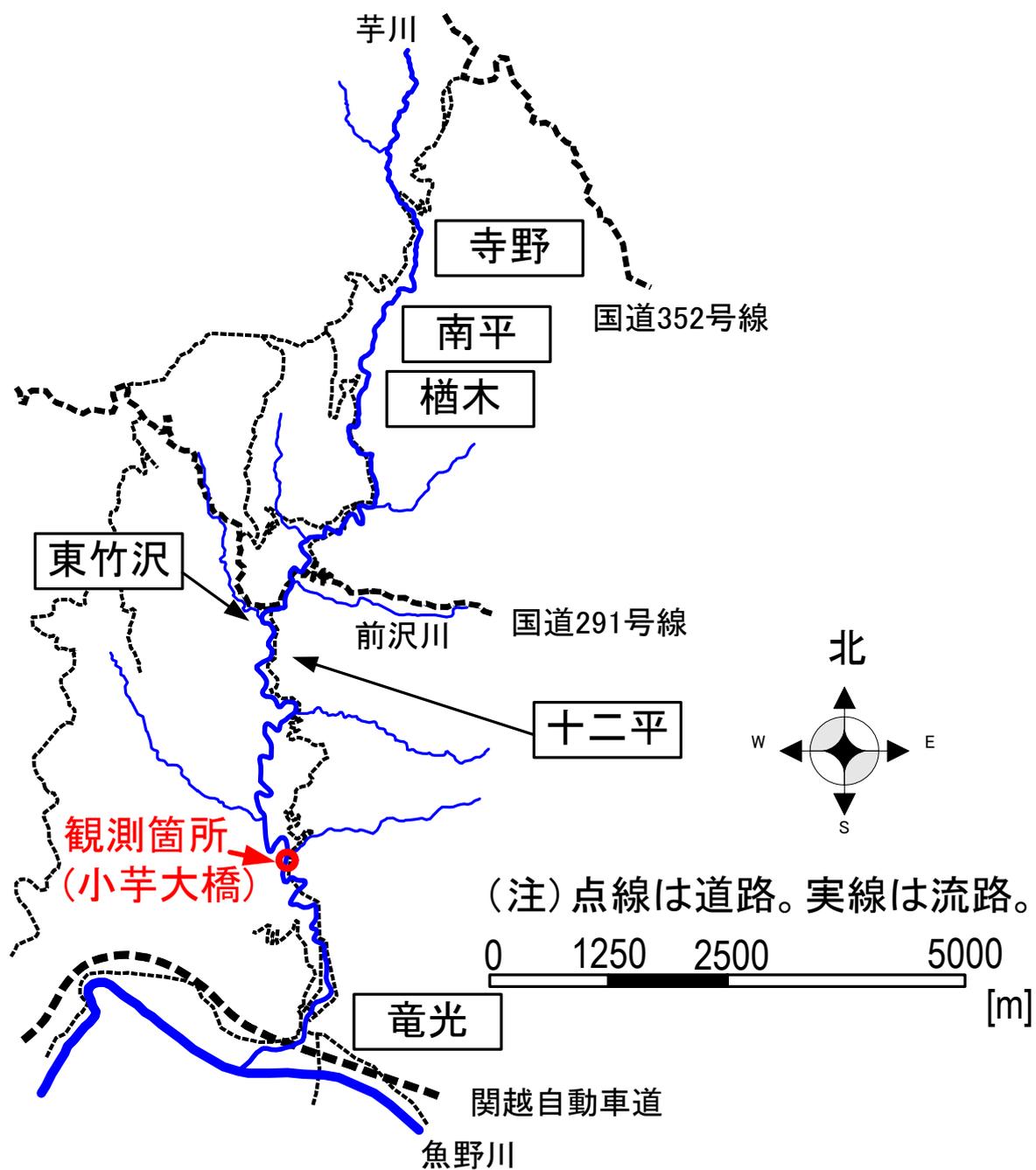
図-8は2005年3月23日から24日にかけての観測結果で、大きな土砂流出が生じていなかった場合である。2006年3月23日～24日の気象状況は最大時間雨量5mm/hr.（23日17時から18時）であった。この出水ではワイヤセンサーは切断されなかったことから、大量の土砂・水と流木が流出しなかったと推測される。土砂容積濃度は23日の午前10時以前で0.0225%程度の値であったが、午後10時30分の時点で0.1126%の値となり、23日の午後11時40分までゆっくりと変化した。その後、土砂容積濃度は午後11時40分の0.0828%から上昇し、24日の午前0時10分頃に0.3136%（最大値）を示した。このように、土砂容積濃度は一時30分間で4倍程度上昇したものの、2005年6月27日から28日の観測結果と比べると、全体的にゆっくりと変化した。



写真－8 芋川の河道閉塞状況(寺野)



写真－9 濁度計設置箇所の様子



(注意) 図中の四角書きの箇所は平成16年新潟県中越地震に伴って生じた主な国道閉塞箇所である。

図-6 芋川流域

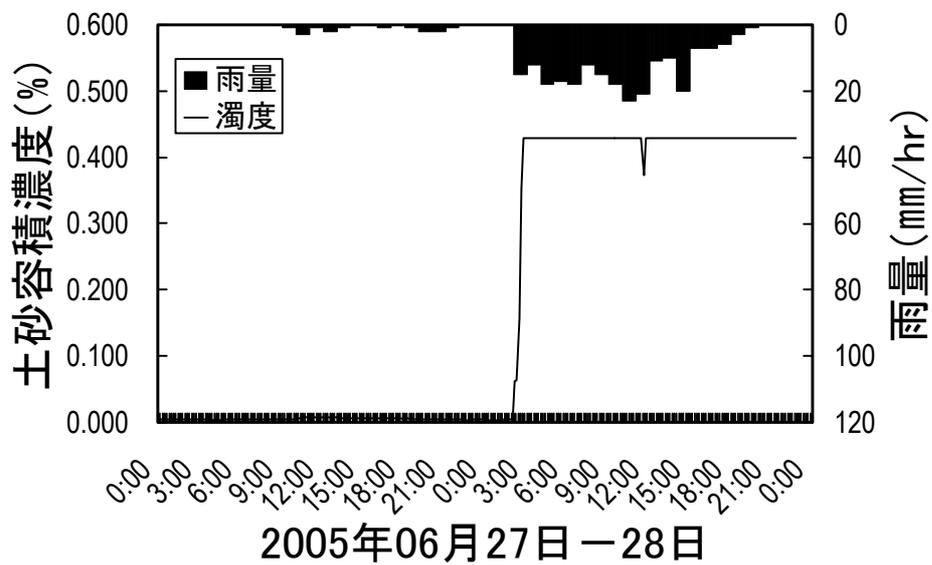


図-7 濁度計の観測結果 (芋川)

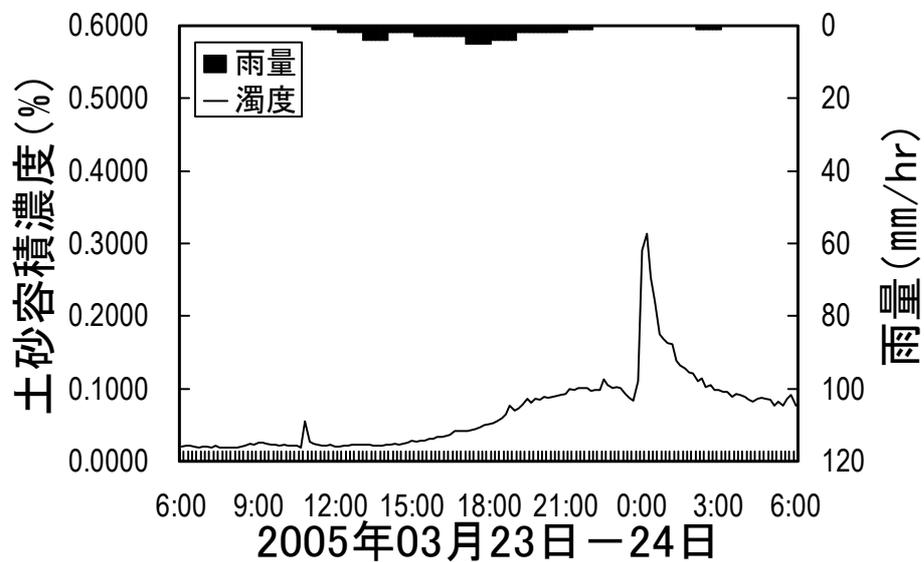


図-8 濁度計の観測結果 (芋川)

3. 考察

本研究で対象とした土砂移動現象は土石流等といった土砂災害を引き起こす可能性のあるものである。そのような土砂移動が生じる前には、溪床の不安定土砂が移動し始めたり、あるいは、河道が土砂で閉塞されたりするため、土砂容積濃度が平常時あるいは出水時の値から急激に上昇することが想定される。そこで、土砂容積濃度を監視しておけば、対象とする土砂移動の有無を判断できると考えられる。問題はどのように判断するかである。流水中を浮遊して運搬される土砂量（浮遊砂と wash load）は流量の2乗に比例するという関係が観測結果から得られており（土木学会、1999）、一般的に土砂容積濃度は流量に応じて大きくなる。そのため、平常時あるいは出水時における土砂容積濃度の値は降雨量といった水文的な条件だけでなく観測地点より上流の流域面積や河床勾配といった地形的な条件等によって大きな値であったり、小さな値であったりする。そのような条件の違いが判断になるべく影響を及ぼさないようにするために、土砂容積濃度の絶対値よりも、時間的な変化の傾向に基づいて、対象とする土砂移動の有無を判断した方が良いと考えられる。そこで、土砂容積濃度がどの程度急激に上昇したかに着目して整理する。

表－1 土砂容積濃度の倍率

溪流	観測日	上昇期間		土砂容積濃度(%)		倍率	単位時間当たりの倍率
		開始	最大値※	開始	最大値※		
西之貝戸川	2003年7月20日	15:20	15:50	0.0004	0.0053	13.25	26.50
西之貝戸川	2004年6月21日	10:50	14:10	0.0001	0.0029	29.00	8.70
芋川	2005年6月27日	2:00	2:50	0.0039	0.4289	109.97	131.97

※最大値は濁度計の計測範囲を超えた時刻とその時点での計測値に基づいた値である。

図－４と７に示した観測結果から、砂、シルト、粘土といった細かい土砂だけでなく礫といった粒径の大きい土砂の移動が生じた場合には、土砂容積濃度は短時間で計測範囲を超えるほど上昇したことがわかった。その倍率は表－１に示すとおりで、単位時間当たりの倍率は8.7～132.0倍／時間であった。

また、図－５と８に示した観測結果から、濁水のように主に砂、シルト、粘土といった細かい土砂が流水中を浮遊して流れる状況が卓越するような土砂移動が生じた場合には、土砂容積濃度はゆっくりと変化したことがわかった。

以上の観測結果に基づくと、溪流の流水中の土砂容積濃度の時間的な変化を監視すれば、土石流等の土砂災害を引き起こす可能性のある土砂移動現象の有無を推定することができることを示していると考えられる。

4. おわりに

本研究は西之貝戸川と芋川の2つの溪流における観測結果を基づいて、土砂災害を引き起こす可能性のある土砂移動の有無を、濁度計を用いたシステムで推定する方法を検討した。その結果、土砂容積濃度の時間変化が短時間のうちに増加すれば、対象とする土砂移動の有無を推定できる可能性があることが分かった。西之貝戸川と芋川とでは、設置箇所の勾配や流域面積が大きく異なるため、対象とした土砂移動が異なっている。そのような流域や設置箇所の違いを考慮して、土砂災害を引き起こす可能性のある土砂移動の有無を判断する手順を整理していきたいと考えている。

また、大規模な崩壊の発生など上流域の変化によっては、濁度計を用いたシステムを緊急的に流水中に入ることなく現場に設置しなければならない状況が今後生じると考えられる。今回報告した事例では、濁度計を設置するための時間に余裕があったため、溪床や岸に頑丈な固定装置を設置できた。しかし、前述のように緊急に設置しなければならない場合では、そのような頑丈な固定装置を設置できない。簡易的に濁度計を流水中に固定できる装置の開発が必要であると考えられる。

本観測を実施するに当たり三重県、新潟県、および、北陸地方整備局湯沢砂防事務所の関係各位に多大なるご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

引用文献

- 小山内信智、水野秀明、沖中健起、原楨利幸（2005）：Time-integrated Sampler の浮遊砂採取効率に関する水路実験、国総研資料第 266 号、p. 46-47
- 小山内信智、水野秀明、清水武志、沖中健起、原楨利幸（2006）：平成 16 年新潟県中越地震後における浮遊砂量の観測、国総研資料第 278 号、126pp.
- 国土交通省国土技術政策総合研究所（2005）：平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震被害に係わる現地調査概要、国土技術政策総合研究所資料 No. 248、187pp.
- 高橋保（2004）：土石流の機構と対策、近未来社、p. 43、2004
- 土木学会（1999）：水理公式集平成 11 年版、丸善、p. 170-171
- 沼本晋也、近藤観慈、林拙郎、西本利彦、前川壮吉（2004）：2003 年 8 月 8 日台風 10 号により三重県藤原町で再発生した土石流、砂防学会誌、Vol. 56, No. 6, p. 20-26
- 水野秀明（2002）：平成 14 年台風 6 号、7 号による土砂災害現地調査報告、土木技術資料 44-11、p. 6-7