

# 土壌雨量指数を活用した道路の事前通行規制手法に関する検討

加藤俊二・東 拓生・佐々木哲也

## 1. はじめに

豪雨時の道路利用者の安全性確保の観点から、土砂災害の危険性がある山地部の道路においては事前通行規制による対応が行われている。現在用いられている「異常気象時における道路通行規制要領」では、連続雨量により事前通行規制の実施の判断をしているが、3時間連続で時間雨量2mm以下の条件でリセットされる。連続雨量では、リセット後に降雨があってもそれ以前の先行降雨の影響は考慮されないため、例えば断続的に継続するような降雨などで、規制解除後の少降雨時に災害が発生する「見逃し」に課題がある。また、近年の突発的に発生する局地的短時間集中豪雨（以下、俗称として用いられている「ゲリラ豪雨」という。）への対応も必要であるが、規制を行っても災害が発生しない「空振り」の頻度や、短時間の降雨で通行規制を行うための準備などの運用面での対応が課題となる。

道路の事前通行規制では、道路利用者の安全性（災害からの回避）と利便性（規制時間や頻度）の観点からバランスの取れた適切な方法とともに、道路管理者の運用体制の面からの容易性も含めた効率的な方法が求められる。このため、筆者らは先行降雨の影響やゲリラ豪雨にも対応した効率的な事前通行規制手法を提案することを目的に検討を行い、土壌雨量指数を活用した新たな指標を提案した。本報は、事前通行規制を行う上での雨量指数の課題を概説した上で、それを踏まえた検討・提案の概要を報告するものである。

## 2. 通行規制を行う上での雨量指標の課題

「連続雨量」、「実効雨量」、「組合せ雨量（連続雨量－時間雨量）」、「土壌雨量指数」が、現在道路分野で通行規制の雨量指標として検討されている。なお、本誌2022年8月号においてこれらの特徴および基本的な考え方が紹介されているので、

各雨量指標の詳細はそちらを参照されたい。

豪雨時の道路の事前通行規制では、基準値（基準線）を設けて規制区間内への車両の進入を規制するが、一般国道は自由通行であるため事前に規制を行うための体制を整える必要がある。このため、段階的に体制を構築するうえで累積性の指標が求められる。併せて、規制を解除する際もわかりやすい判断方法が求められる。

「連続雨量」は、運用体制の面では単純でわかりやすいものであるが、「見逃し」や「空振り」も多い課題があった。これらの点を考慮して、前述の先行降雨やゲリラ豪雨に対応するため、「組合せ雨量（連続雨量－時間雨量）」や「土壌雨量指数」を用いた規制手法の適用性の検討が行われているところである。

「組合せ雨量（連続雨量－時間雨量）」は、短時間降雨の影響を考慮した手法として現在高速道路で用いられており道路分野としては実績がある手法だが、比較的短時間で増減を繰り返すような時間雨量への運用体制面での対応が必要な手法である。高速道路は、インター間で規制を行っており、各料金所での出入制限を行えることから、時間雨量に対する短時間での対応は比較的容易である。一方、一般国道は、前述のように自由通行であるため短時間での規制の準備が難しく、運用上の課題がある。気象・砂防分野で用いられている「土壌雨量指数－時間雨量」を用いる場合も同様であり、準備体制も考慮した運用方法を検討する必要がある。また、基準線を設けて規制を行う場合、一般に基準線を超えると危険で基準線以下であれば安全という判断を行うが、時間雨量のような短時間で増減を繰り返すような可能性がある指標を判断指標に用いる場合、オン・オフを繰り返すケースも想定され、「空振り」の増加が問題となる。

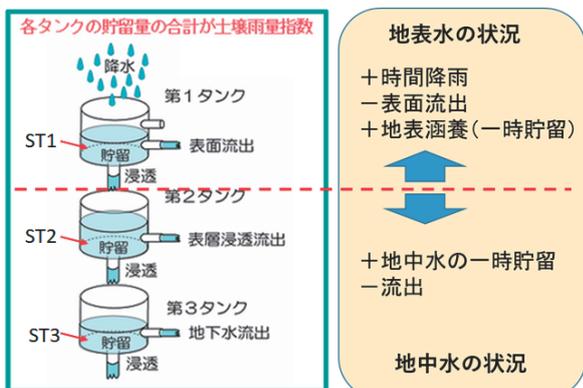
土砂災害は、地盤内に浸透・残留している地中水の状態と降雨により生じる表流水の状態によっ

て、災害の起こりやすさや災害形態（表面侵食による泥水の流入、土砂崩壊、土石流など）および規模が異なる。例えば、表層崩壊は時間降雨との相関が高いといわれているが、その発生も浸透水による地中水分量の増加・地下水位の上昇が前提である。地中水の状態を考慮するために、タンクとしてモデル化したものが実効雨量や土壌雨量指数である。特に、土壌雨量指数は豪雨に伴い発生するがけ崩れ（表層崩壊）および土石流の発生の危険度を評価することを目的に3段タンクで地表および地中の水の状態を表現したもので<sup>2)</sup>、地中水の状態を考慮した土砂災害への適用が期待されるものである。道路の通行規制では、表流水と地中水の状態の影響を大きく受けるような、比較的小規模な土砂流出や表層崩壊なども対象に評価する必要がある。しかしながら、現行の「土壌雨量指数－時間雨量」では地表水の状況も含む3段タンクの総量である土壌雨量指数を用いていることから地中水の状態が不明瞭であり、上記のような災害形態によってはうまく評価できない場合もあると考えられる。

### 3. 新たな通行規制指標の検討・提案

#### 3.1 地中水の状態を考慮した規制指標の検討

前述の課題に対応した指標を検討するため、まず土壌雨量指数および各タンクの役割と降雨時におけるそれぞれの挙動の確認を行うこととした。土壌雨量指数は、図-1に示すように3段タンクを用いて雨水の地盤への浸透および表面流出・地下流出をモデル化したものである。第1タンクは、地表面上の水の状態を表現したタンクで、地表の植生等による涵養的な役割も含めて降雨を一時貯



※気象庁HPより ST1,ST2,ST3:任意時間の各タンクの貯留量

図-1 土壌雨量指数の概念図（参考文献2に加筆）

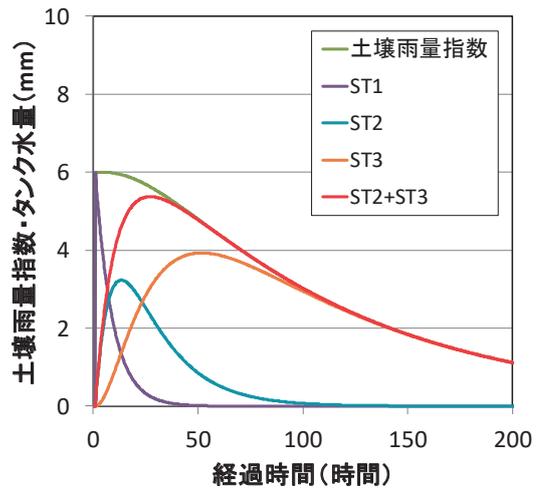
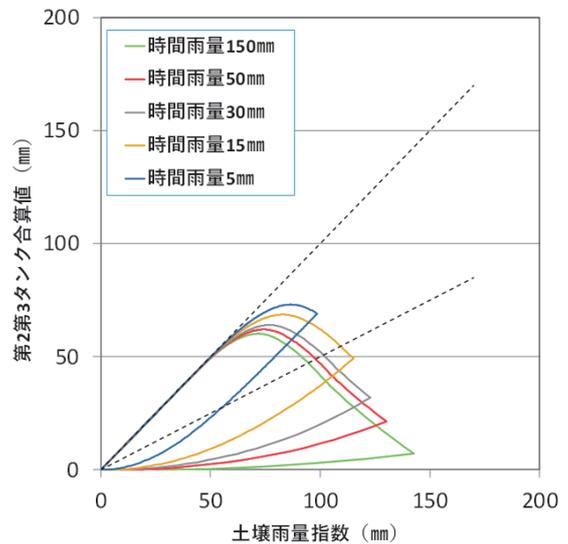
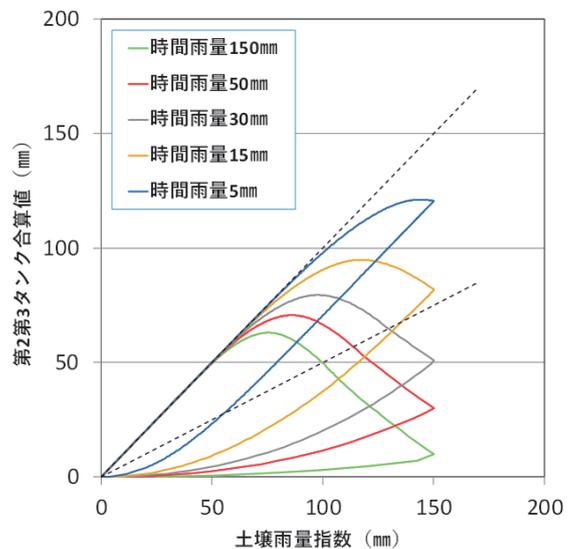


図-2 土壌雨量指数および各タンクの挙動（時間雨量 6 mm）



(a) 総雨量 150mm まで継続



(b) 土壌雨量指数 150mm まで継続

図-3 時間雨量の違いによる挙動検討例

留して地表面流出と地中への浸透に振り分けている。また、第2タンクおよび第3タンクは、地盤内の水の状態を表現したタンクで、第2タンクは表層部の浸透水の含水状態の変化をモデル化したもの、第3タンクは地盤の地下水の上昇および流出による減少をモデル化したものである。

図-2は、降雨による土壌雨量指数および各タンクの動きをわかりやすく確認するために、時間雨量6mm（土壌雨量指数の計算上10分1mm計6mm）の降雨による土壌雨量指数および各タンクの変化を示したものである。土壌雨量指数の増加は、降雨（時間雨量）によるものでそれ以外の要因で増加することはなく、降雨はまずは第1タンク（ST1）に蓄積される。また、前述のように第2（ST2）、第3タンク（ST3）は地盤内の水の状態を表しており、第1タンクに蓄積されていた水のすべてがおおむね地盤に浸透するころに第2第3タンクの合計値が最大となり、土壌雨量指数とほぼ等しくなる。これらの関係から、土壌雨量指数に対する第2第3タンクの水量の占める割合が地中水分の影響、土壌雨量指数の増加が降雨強度の影響を特に表す指標になるものと考えられる。

図-3は、集中豪雨、長雨による挙動の違いを確認することを目的に、異なる降雨強度で総雨量が同じおよび土壌雨量指数が同じ（図はいずれも150mm）になるまで降雨を継続させた場合の、土壌雨量指数－第2第3タンク合計値の関係（スネーク曲線）を示したものである。総雨量が同じ場合、土壌雨量指数の最大値は降雨強度が大きいほど大きくなるが、地中水分の状況を表す第2第3タンクの合計値は、降雨強度が小さいほど大きくなり、長雨になるほど地中水分の影響が大きくなる。同じ土壌雨量指数まで継続した場合は、その傾向がより顕著に表れる。これらの点から、土壌雨量指数－第2第3タンクの合計値の関係を用いることで、短時間集中豪雨型と長雨型の両方の挙動を評価できるものと考えられる。

### 3.2 切土のり面の被災事例による検討結果<sup>3)</sup>

図-4に、切土のり面で発生した降雨による被災事例（被災により規制を伴った表層崩壊等18件：泥水の流出等の軽微な災害は対象外）について、実災害・実降雨における土壌雨量指数－第2第3タンクの合計値の関係を整理した結果を示す。ここでは、1つのグラフで傾向を整理するため、

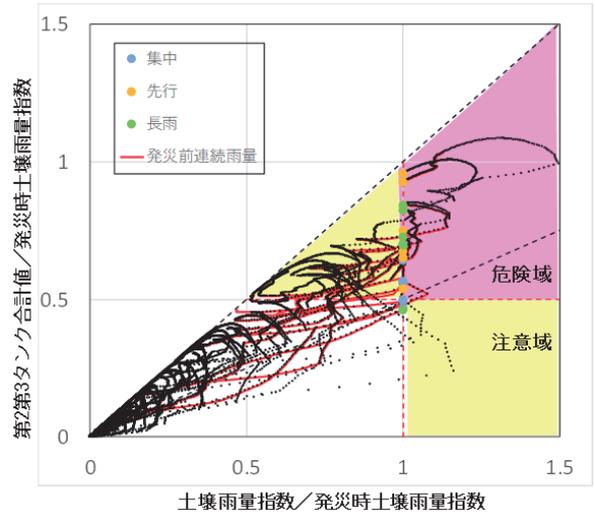
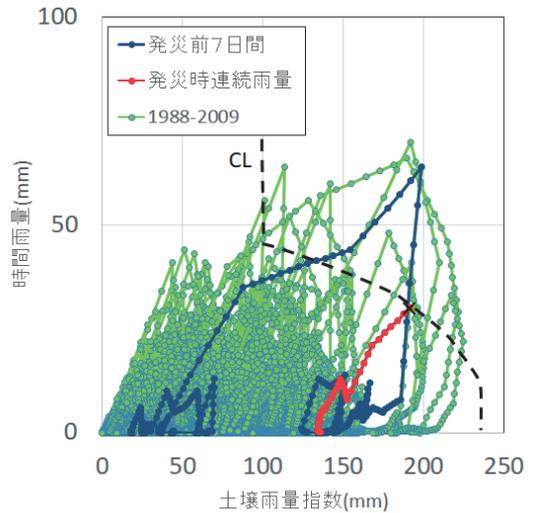
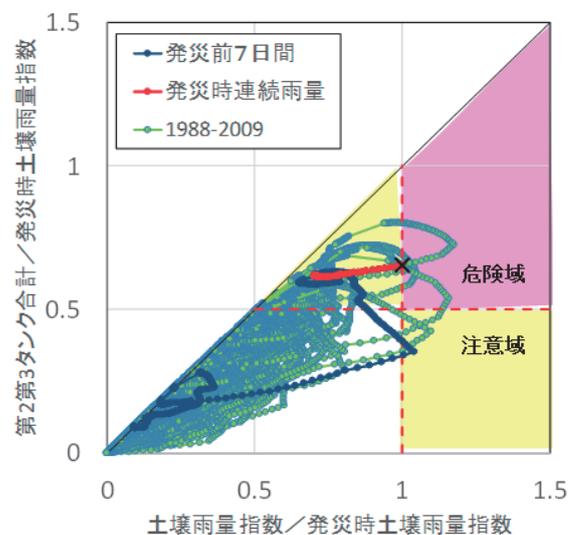


図-4 土壌雨量指数－第2第3タンク合計値の関係（切土のり面災害18件）



(a) 土壌雨量指数－時間雨量の関係



(b) 土壌雨量指数－第2第3タンク合計値の関係

図-5 集中豪雨での地中水の影響が特徴的な事例

各災害についてそれぞれの発災時土壌雨量指数で正規化し、発災までの7日間のスネーク曲線を示している。降雨データは、1988～発災年までのレーダーアメダス解析雨量を用い、被災箇所を含む1kmメッシュの毎正時の1時間雨量から土壌雨量指数の算出に必要な10分間雨量（毎正時雨量を1/6した値）を求めた。これを用いて、10分毎の1時間雨量、土壌雨量指数（第1、2、3タンクの各値）および連続雨量の降雨指標値を求め、発災時刻（発災時刻が不明なものは発見時刻）までのスネーク曲線を作成し、図はその一部を示したものである。

災害は、①土壌雨量指数が発災時の土壌雨量指数以上である、②発災時の土壌雨量指数に対する第2第3タンク合計値の比率が0.5以上である、の2つの要件を満たす場合に発生しており、この要件を閾値として通行規制の判断ができる可能性がみられた。図中には通行規制を想定した仮の注意域（準備体制）と危険域（降雨時の規制実施）を示している。

ここでは、短時間集中豪雨における地中水と降雨強度の影響の関係から、本手法の効果が顕著にみられた事例について紹介する。図-5は、事例の「(a) 土壌雨量指数－時間雨量」および「(b) 土壌雨量指数－第2第3タンクの合計値」の関係を整理したものである。図中の、緑線が1988年から発災までのレーダーアメダス解析雨量から求めたスネーク曲線、赤線が発災時連続雨量、青線が発災前7日間の降雨履歴である。「(a) 土壌雨量指数－時間雨量」の関係を見ると、発災前の先行降雨は数時間で土壌雨量指数のピークとなっており、発災時の土壌雨量指数より若干大きいもののほぼ同程度であり、時間雨量が大きい。図中には、当該地域で設定されているCL（クリティカルライン）を示しており（以下、図中で示すCLは各地域で設定されているもの）、CLをもとに規制を考える場合には、青線の先行降雨でも規制を行う必要がある。一方、「(b) 土壌雨量指数－第2第3タンクの合計値」の関係を見ると、先行降雨は図-3で見られた短時間集中豪雨の特徴から、地中への浸透はあまり起こっていないため、第2第3タンクの合計値は発災時の土壌雨量指数の1/3程度で、前述②の要件を満たしていない。第2第3タンクの合計値が発災時の土壌雨量指数の2/3程度のと

ころで、時間雨量20～30mmの短時間降雨に伴い土壌雨量指数が増加して、前述の①、②の要件を満たして発災している。また、過去の降雨履歴をみても（a）図のCLを規制の目安とする場合に対して、（b）図の関係をを用いることで、短時間集中豪雨に対する規制頻度（空振り）の減少が図れる可能性も確認できる。

なお、切土のり面の場合には、人為的に山を切土しており通常の自然斜面に対して不安定化させているものといえるため、のり面に不安定部分が存在する場合には比較的弱い降雨でも災害が発生することが考えられる。上記の事例検討においても、既往の降雨履歴の観点からも効率よくとらえられる場合とそうでない場合が混在していた。このため、切土のり面の災害については被災要因を踏まえ、点検や維持管理での対応や、新設の場合には設計時の配慮などにより対応すべき被災形態と、事前通行規制により対応する被災形態を整理したうえで、規制基準値の検討などを適切に行う必要がある。

### 3.3 自然斜面災害事例による検討結果<sup>4)</sup>

自然斜面災害事例について、被災形態ごとに分類し、落石・岩盤崩壊（12件）、土砂流出・崩壊（27件）、土石流（11件）の計50件について、前述の切土のり面の被災事例と同様の整理した結果を示す。

#### (1) 落石・岩盤崩壊（12件）

図-6は、対象とした12事例について、発災時土壌雨量指数を1として正規化し、発災前7日間の降雨についての土壌雨量指数－第2第3タンク合計値の関係を示したものである。いずれの災害も、前述の①、②の要件を満たして発生している。しかしながら、落石・岩盤崩壊は図-7に示す時間雨量－土壌雨量指数の関係の事例のように、少降雨・無降雨で発生しているものがほとんどであり、いずれも発災時の土壌雨量指数の発生確率年は1年未満で、発災時を超える降雨の発生頻度が高いことから、事前通行規制による対応は効果的でないと判断されるものであった。このため、事前通行規制よりもハード対策が効果的と考えられる災害形態である。

#### (2) 土砂流出・崩壊（27件）

対象とした27事例の発災前7日間の降雨の提案手法の関係（図-8）は、図中に示す土壌雨量指数

の発生確率年1年未満の災害を除き、前述の①、②の要件を満たして発災しており、また発災時の1時間雨量の発生確率年と比しても同等以上のものが22件と規制頻度の効率性もみられた。なお、発災時の土壌雨量指数の確率年が1年未満の災害は、斜面上方にて切土開削し橋台を設置するための工事を行っており、開削箇所からの雨水が集中して流入して発生したもので、施工管理により雨水処理を適切に対応すべきもので、事前通行規制の対象外と考えるものであった。

図-9に、時間雨量－土壌雨量指数の関係の事例を示す。土砂流出・崩壊は、事例のように比較的

大きな降雨で発生する事例が多く、発災時の土壌雨量指数の発生確率年は1事例を除き1年以上で発生し（1～5年未満：13件、5～10年未満：5件、10年以上：8件）、事前通行規制による対応が効果的と判断されるものであった。

(3) 土石流 (11件)

対象とした11事例の発災前7日間の降雨の提案手法の関係（図-10）も、災害はおおむね①、②の要件を満たして発生しており、発災時の1時間雨量との発生確率年の比較で同等以上のものは6件であったが、残り5件のうち2件の1時間雨量の発生確率年は約73年と93年という異常な豪雨で

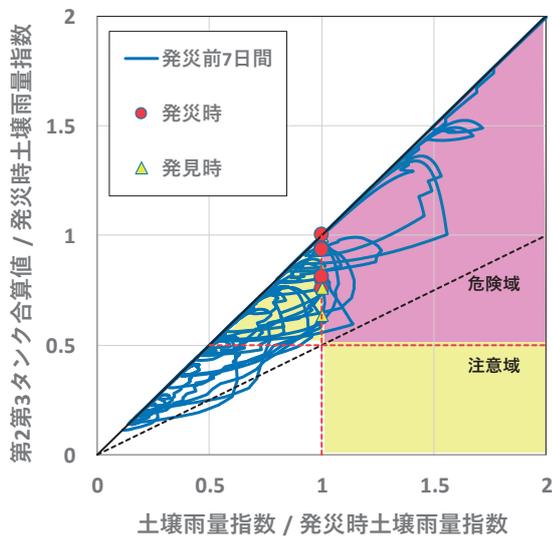


図-6 土壌雨量指数－第2第3タンク合計値の関係  
(落石・岩盤崩壊12件)

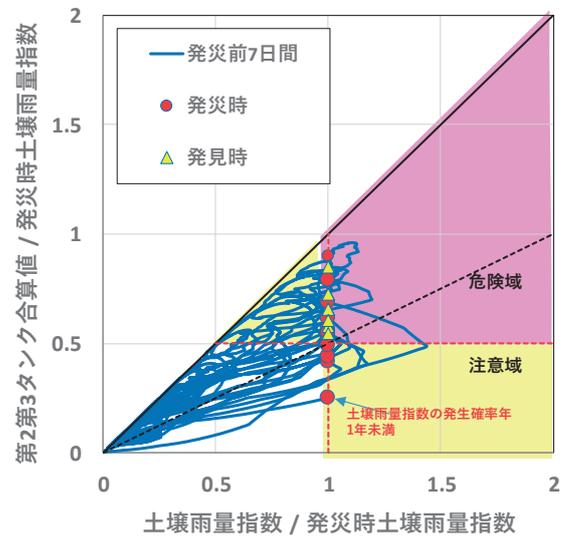


図-8 土壌雨量指数－第2第3タンク合計値の関係  
(土砂流出・崩壊27件)

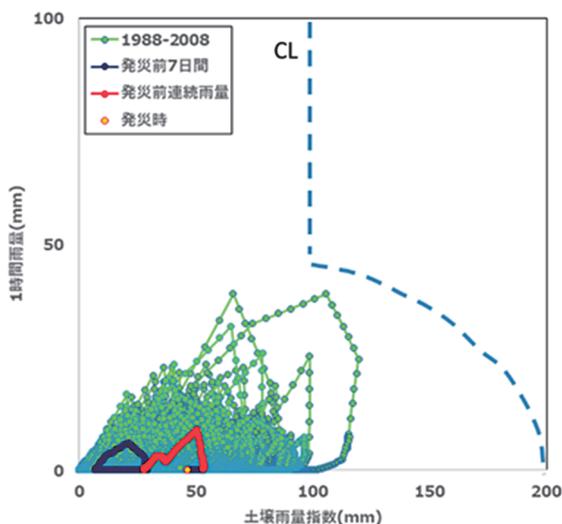


図-7 土壌雨量指数－1時間雨量の関係の例

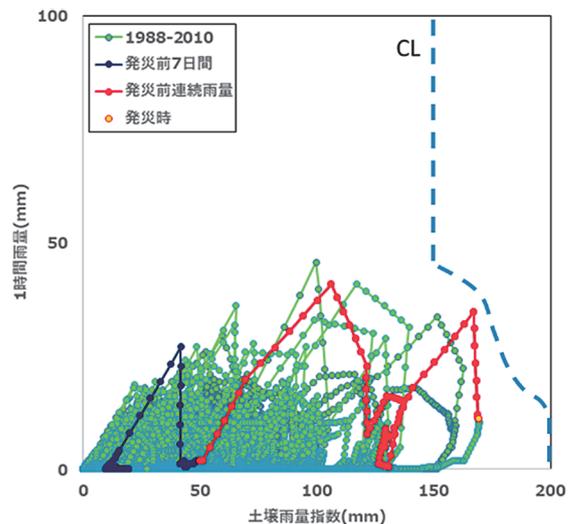


図-9 土壌雨量指数－1時間雨量の関係の例

あった。図-11に、時間雨量－土壤雨量指数の関係の事例を示す。土石流も土砂流出・崩壊と同様に比較的大きな降雨で発生する事例が多く（1～5年未満：4件、5～10年未満：3件、10年以上：4

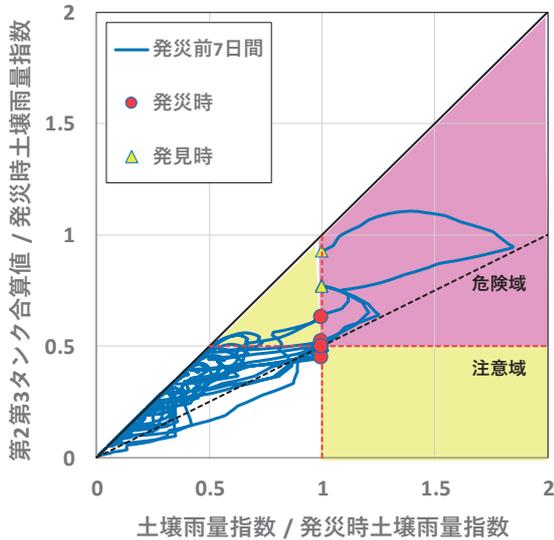


図-10 土壤雨量指数－第2第3タンク合計値の関係（土石流11件）

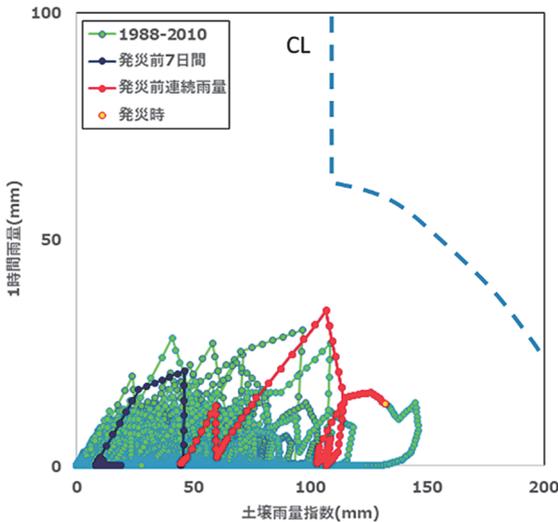


図-11 土壤雨量指数－時間雨量の関係の例

件)、事前通行規制による対応が効果的であると判断されるものであった。

上記のように、各地域で設定されているCL超過判定では、図-9,11は見逃しの事例に該当するが、第2第3タンク合算値の新指標では補足可能となる。このように、自然斜面災害においても、土砂崩壊や土石流のような降雨より発生する災害に対して、土壤雨量指数－第2第3タンクの合計値の関係をを用いることで効率的な事前通行規制ができる可能性を確認できた。

#### 4. まとめ

上記のように、土壤雨量指数－第2第3タンクの合計値の関係をを用いることで、地中水の影響を考慮した効率的な事前通行規制ができる可能性を確認できた。一方で、被災形態により事前通行規制になじまないものもあり、点検等により事前に対応すべき被災形態を明確にし、通行規制の対象となる被災形態に対する規制基準値の設定など、適切に対応することが必要である。今後、現場への適用に向けた試行検討を実施するうえで、基準値の設定方法、規制解除の方法、運用体制などの考え方および実運用に向けた課題を整理し、検討を進める必要がある。

#### 参考文献

- 1) 市川智史・中根淳：「道路通行規制に用いる雨量指標の特徴と基本的な考え方」、土木技術資料、第64巻、第8号、pp.58～61、2022。
- 2) 気象庁ホームページ：https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojoshisu.html
- 3) 加藤俊二・東拓生・佐々木哲也：土壤雨量指数を活用した道路の事前通行規制手法の検討、第76回土木学会年次学術講演会、2021.9
- 4) 加藤俊二・東拓生・佐々木哲也：土壤雨量指数を活用した道路の事前通行規制手法の検討（その2）、第77回土木学会年次学術講演会、2022.9

加藤俊二



土木研究所 地質・地盤研究  
グループ土質・振動チーム  
主任研究員  
KATO Shunji

東 拓生



土木研究所 地質・地盤研究  
グループ土質・振動チーム  
主任研究員  
AZUMA Takuo

佐々木哲也



土木研究所 地質・地盤研究  
グループ土質・振動チーム  
上席研究員  
SASAKI Tetsuya