

## 豪雨時の斜面災害発生リスクの軽減と規制緩和・解除への適用

# 「土壌水分を考慮した斜面監視システムの実装」

京都大学大学院 工学研究科  
都市社会工学専攻 プロジェクト代表  
岸田 潔

京都大学



KYOTO UNIVERSITY

## 道路交通における斜面災害リスクを緩和する

降雨量のみを判断指標とする連続雨量による通行規制では、  
「見逃し」となった事例

斜面内の水分量指標を用いた土砂災害警戒情報に基づく  
パトロールによって「見逃し」を防いだ

累積の雨量だけでなく、時々刻々と変化する斜面の水分状態を補足した監視が必要

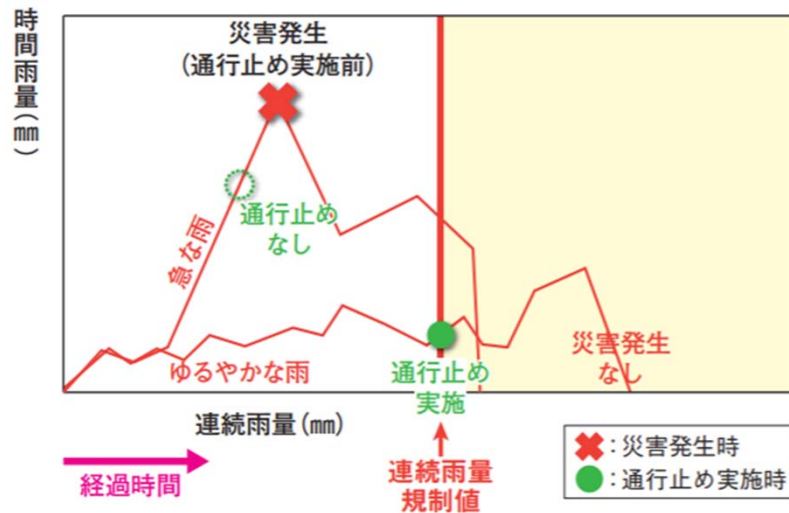
「令和2年7月8日の早朝、枚方亀岡線において、道路の山側法面の土砂・倒木が崩落し、延長約50メートルにわたって2車線を塞ぐとともに、道路を越えて谷側の民有地にも到達。」

(引用元；大阪府：<http://www.pref.osaka.lg.jp/ibarakidoboku/xyz/index.html>)

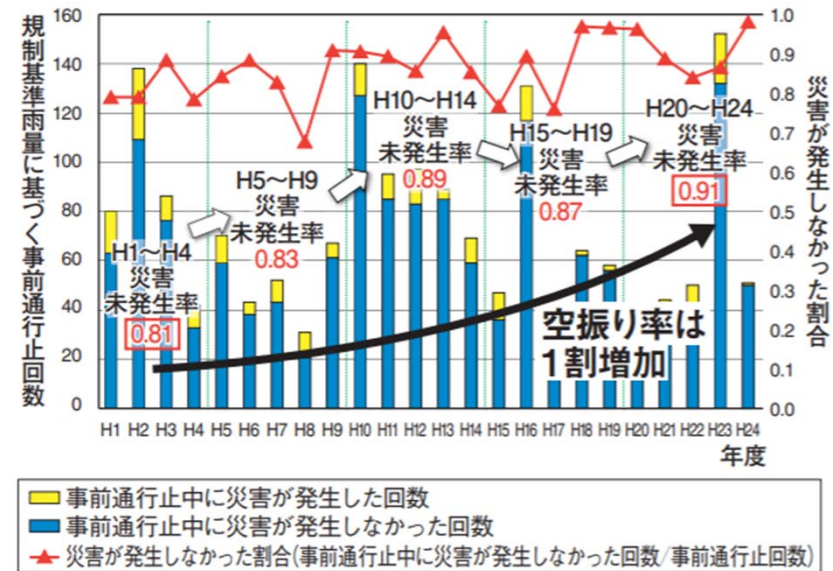
# 雨量規制基準の種類：現行法は連続雨量法（一部 時間雨量を併用）

## 区間ごとに定められた雨量の累積基準値により判断する連続雨量法

- 3時間 無降雨（or 2 mm/h以下）が継続した場合に、累積をリセット
  - ✓ 単純な規制判断の一方、降雨強度を考慮できず、先行降雨の影響が見込まれない場合があるため「空振り」が増加する傾向がある



連続雨量法による規制の概念図\*

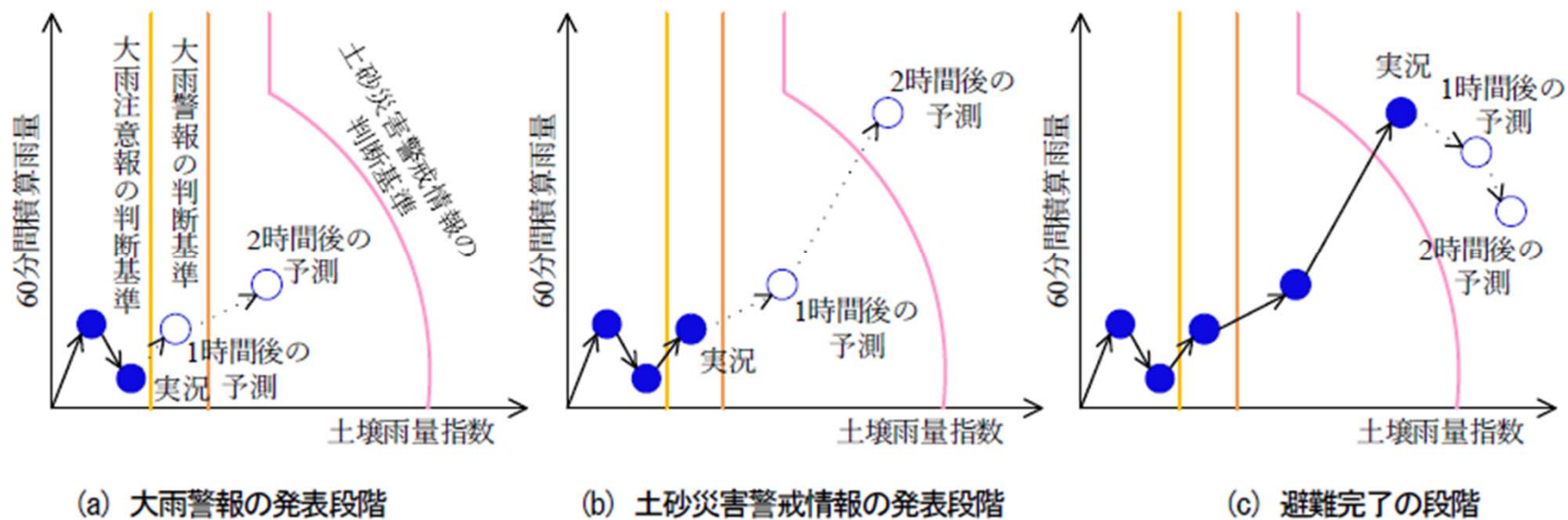


事前通行規制区間における空振り率の上昇（直轄国道）\*

\*国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015.

# 気象庁が発表する土砂災害警戒情報の仕組み

- 時々刻々と変化する土壌雨量指数と60分間積算雨量を二軸グラフ上に描画し、数時間後の予測位置と警戒判断基準線との関係で、警戒情報を発表する

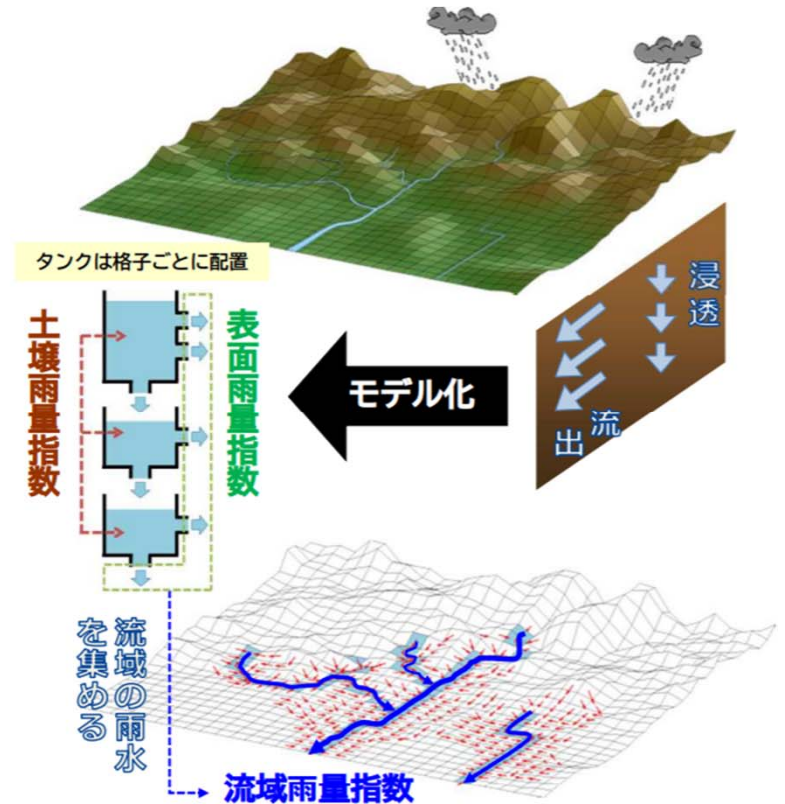
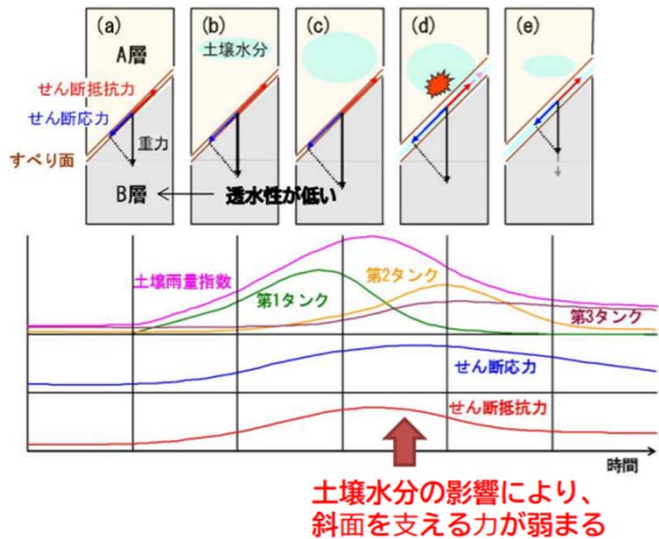


土砂災害警戒情報発表の仕組み\*を基に作成

気象庁予報部予報課 気象防災推進室：土壌雨量指数・表面雨量指数・流域雨量指数の概要と基準の設定方法について、平成30年2月28日、気象等の情報に関する講習会\*

# 土砂災害警戒情報の仕組み

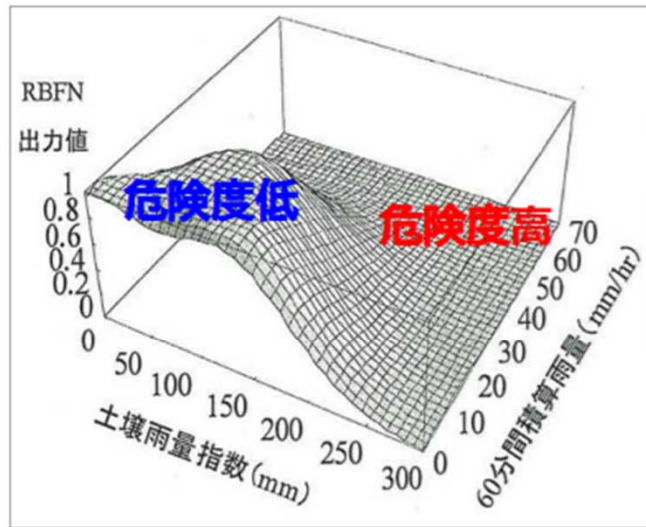
- 土壌雨量指数は、5 kmメッシュの領域における土壌水分量を表す指標



気象庁予報部予報課 気象防災推進室：土壌雨量指数・表面雨量指数・流域雨量指数の概要と基準の設定方法について、平成30年2月28日、気象等の情報に関する講習会 より

# 土砂災害警戒情報の判断基準線の決め方

## 降雨発現確率の応答曲面



- RBFNとは、データ補間手法（有限個のデータから近似関数を導く）の1つで、Radial Basis Function Network（放射基底関数）の略。
- RBFNを用いて、有限個の降雨事例データから「非発生降雨の発現確率」を求め、その確率分布をもとに基準線を設定する。

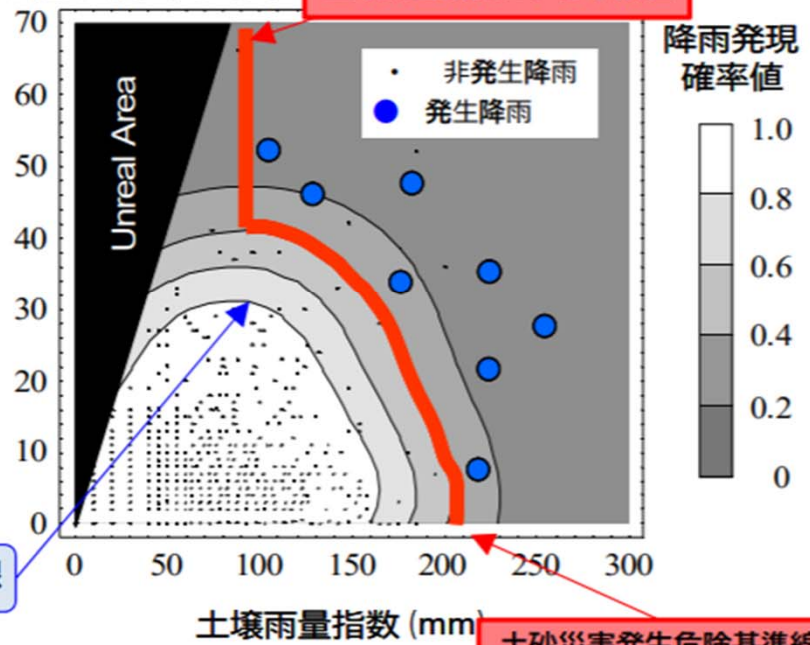
平面上において、非発生降雨データが密な領域ではRBFN出力値が高く、疎らな領域ではRBFN出力値が低くなる。

土壌雨量指数による下限値

2次元化

60分間積算雨量 (mm/hr)

等RBFN出力値線



土砂災害発生危険基準線 (Critical Line)

気象庁予報部予報課 気象防災推進室：土壌雨量指数・表面雨量指数・流域雨量指数の概要と基準の設定方法について、平成30年2月28日、気象等の情報に関する講習会 より

# 斜面内の水分量を考慮した通行規制の考え方の必要性

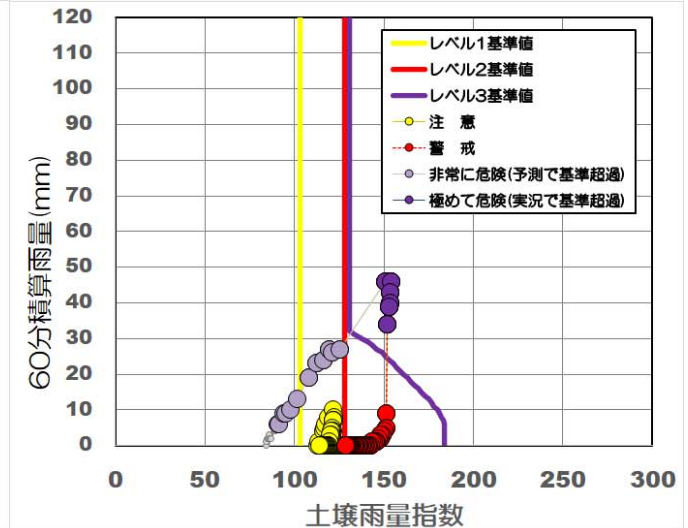
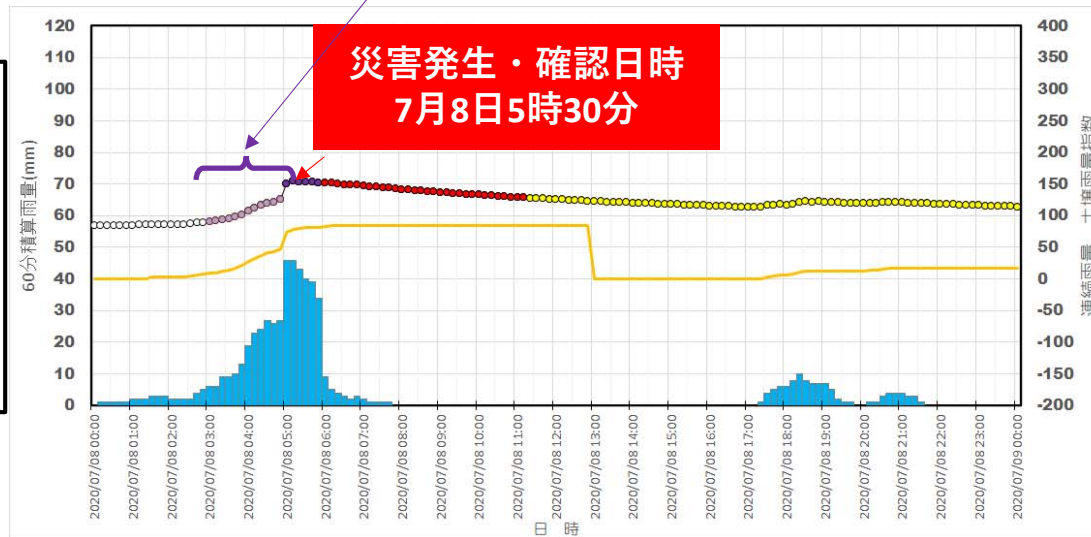
連続雨量による規制が発令されないまま災害が発生（枚方亀岡線）

【出灰:テレメータ雨量】  
連続雨量max 85mm

土砂災害CL:52353418

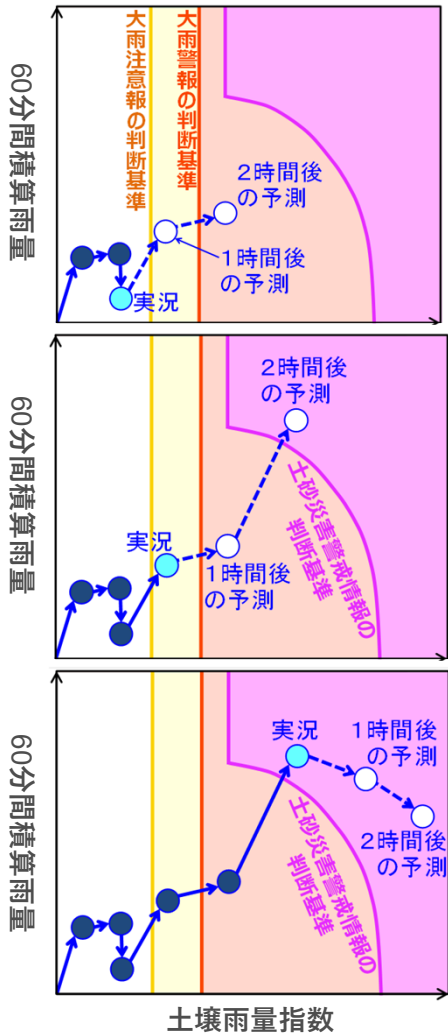
土砂災害の防災情報で「非常に危険」  
到達を確認4時～5時頃

災害発生・確認日時  
7月8日5時30分



- 被災の発生時刻とスネークライン上の位置関係は不明であるが、従来法では「見逃し」

# 土砂災害警戒情報を道路監視用へ昇華させる



## 土砂災害警戒情報 運用例

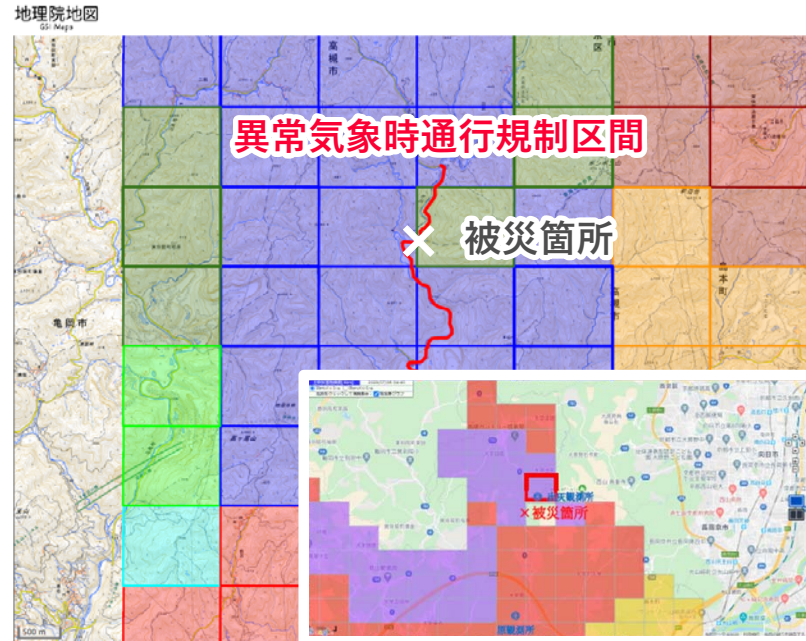
2時間先までに大雨警戒  
(土砂災害) の  
基準に到達すると予測

大雨警戒  
(土砂災害) 発表  
高齢者等は避難開始

2時間先までに  
土砂災害警戒情報の  
基準に到達すると予測

土砂災害警戒情報発表  
避難開始

既に  
土砂災害警戒情報の  
基準に到達



## 異常気象時通行規制区間への適用のイメージ

- 規制区間を含む各メッシュに対して、
1. 左図のスネーク曲線を地域性を考慮して描画し、
  2. 道路用の警戒基準に基づき、監視して、
  3. 通行規制の発令・解除の判断を行う。



# 土砂災害警戒情報を道路監視用へ昇華させる

## 道路監視への適用上の課題

### 1. 土壌雨量指数の妥当性の把握

- 異常気象時通行規制区間を対象に斜面を最小システムによりモニタリング
- Ishihara & Kobatake (1979)の直列3段タンクモデルに、監視区間の地質条件を考慮

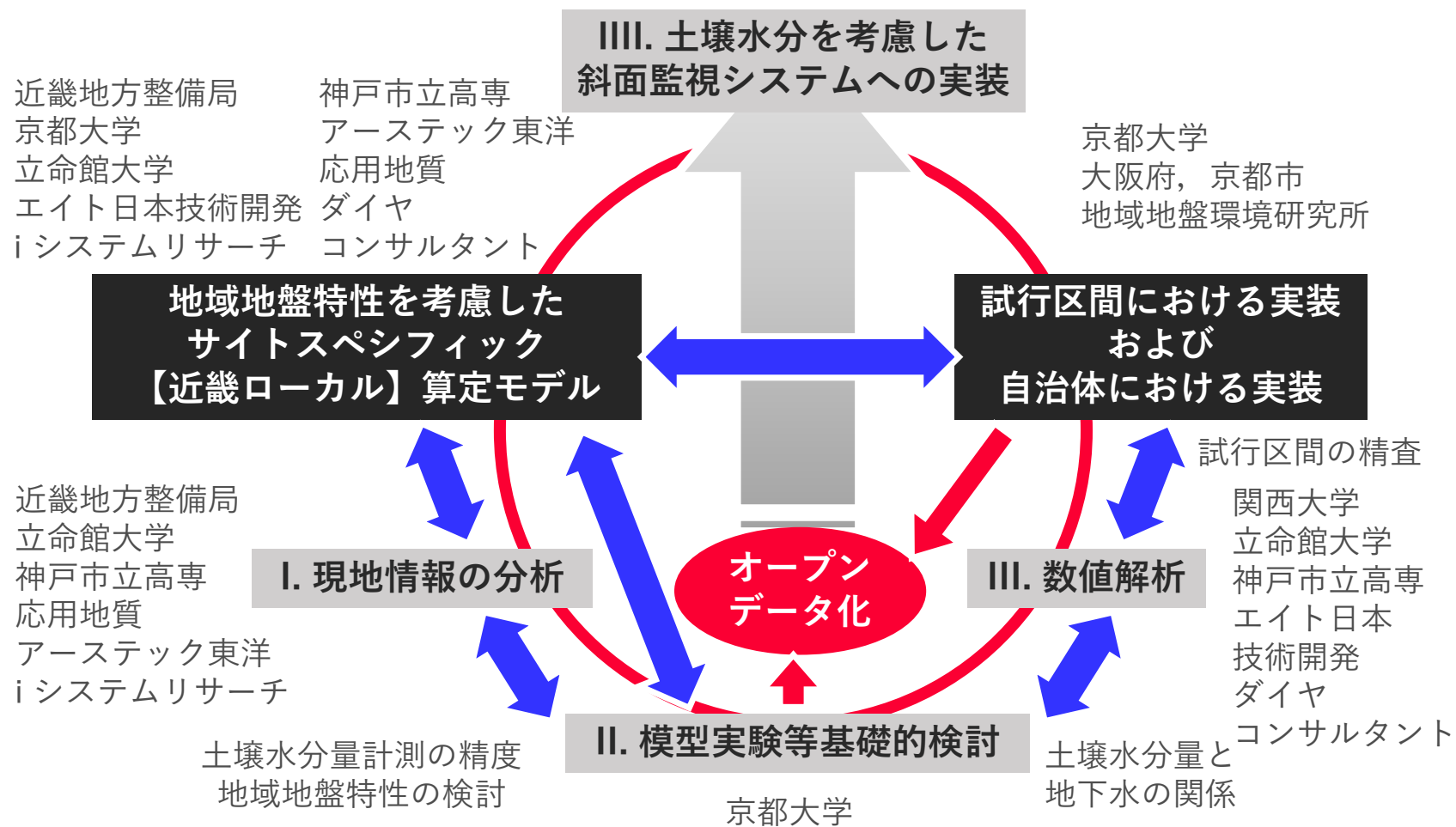
### 2. 道路斜面に相応しい警戒基準の設定

- 道路通行規制非発生降雨データに切り替えた道路用警戒基準へ
- 対策工を施した道路斜面に対する警戒基準の更新方法を検討

### 3. 警戒体制の社会実装

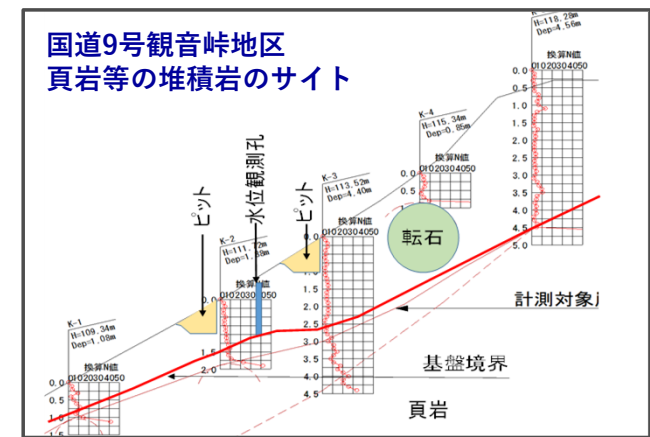
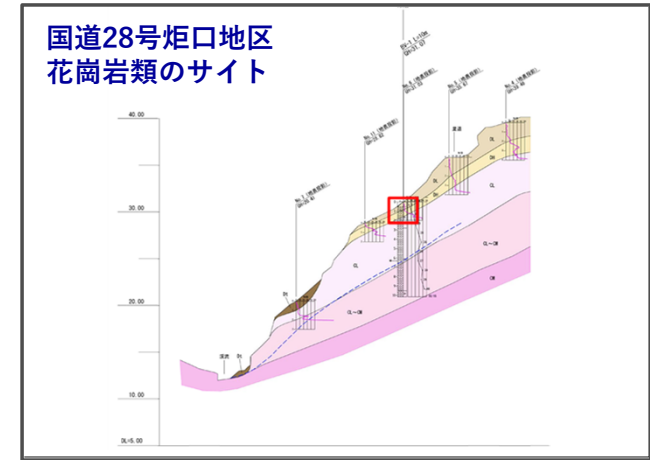
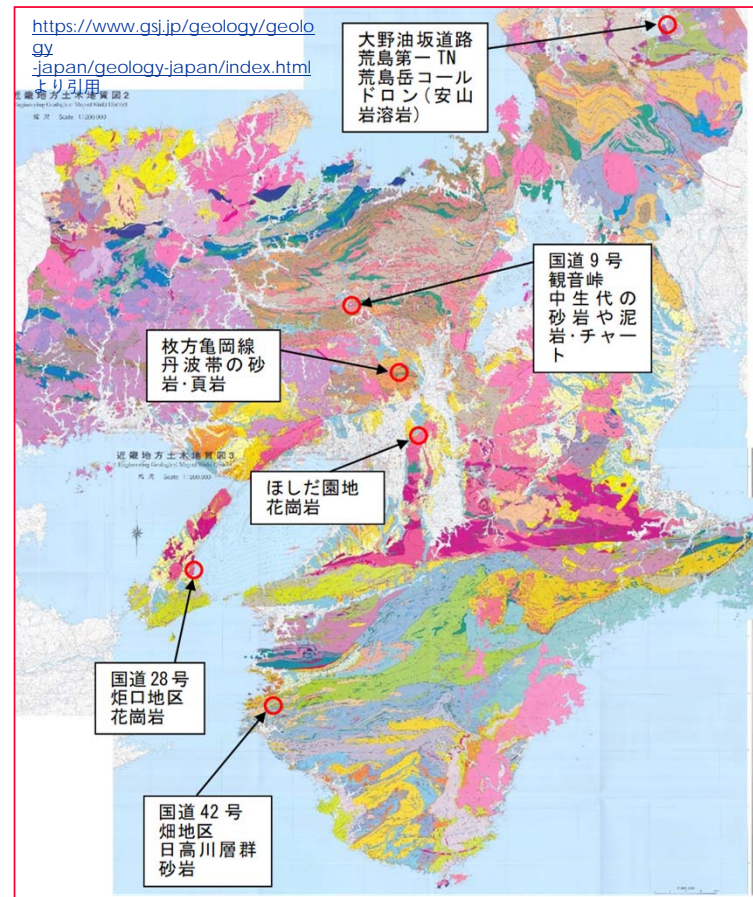
- 即時に実装可能な範囲から、システムの合理化を図る
- 土砂災害警戒情報と従来の連続雨量による規制の併用から施行を開始

# 実施体制：国道事務所・府・市との連携



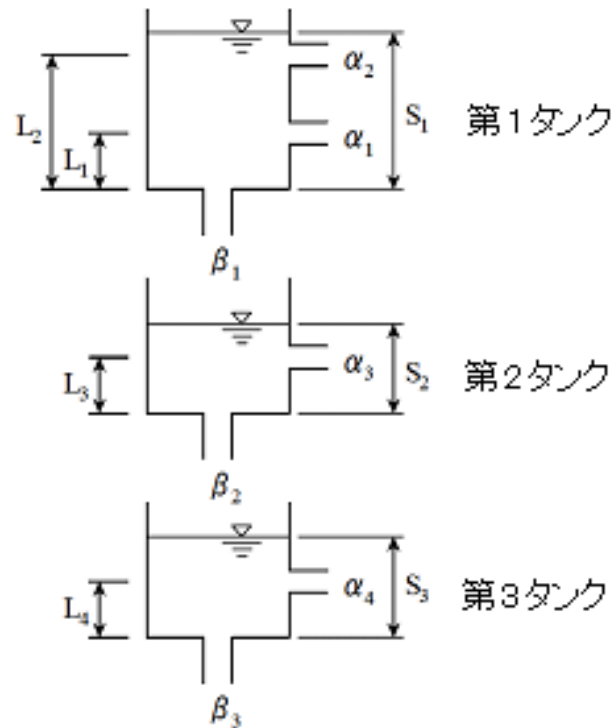
# 1. 土壌雨量指数の妥当性の把握

- 近畿の代表的地質構成の斜面2サイト（花崗岩類，堆積岩）において，最小計測システムによるモニタリング



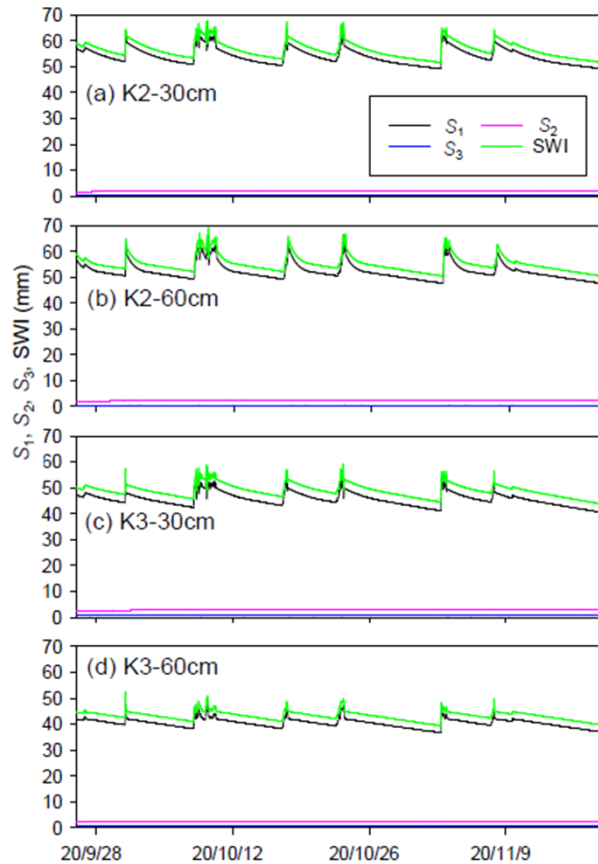
# 1. 土壌雨量指数の妥当性の把握

Ishihara & Kobatake (1979)の直列3段タンクモデルに、監視区間の地質条件を考慮



- 土壌水分量の変動は第1タンクの貯留高さとの関係性が良い？
- 乾燥状態を含めた長期変動では第3タンクを修正する必要があるか？
- 上記の2点を同時に修正して実挙動を捕捉可能か？

# 1. 土壌雨量指数の妥当性の把握



タンク1のパラメータの値をフィッティングして求めた貯水高 $S_1, S_2, S_3$ とSWIの値の時系列

フィッティングにより求めたタンク1のパラメータセットと Ishihara and Kobatake(1979) によるパラメータセットとの比較

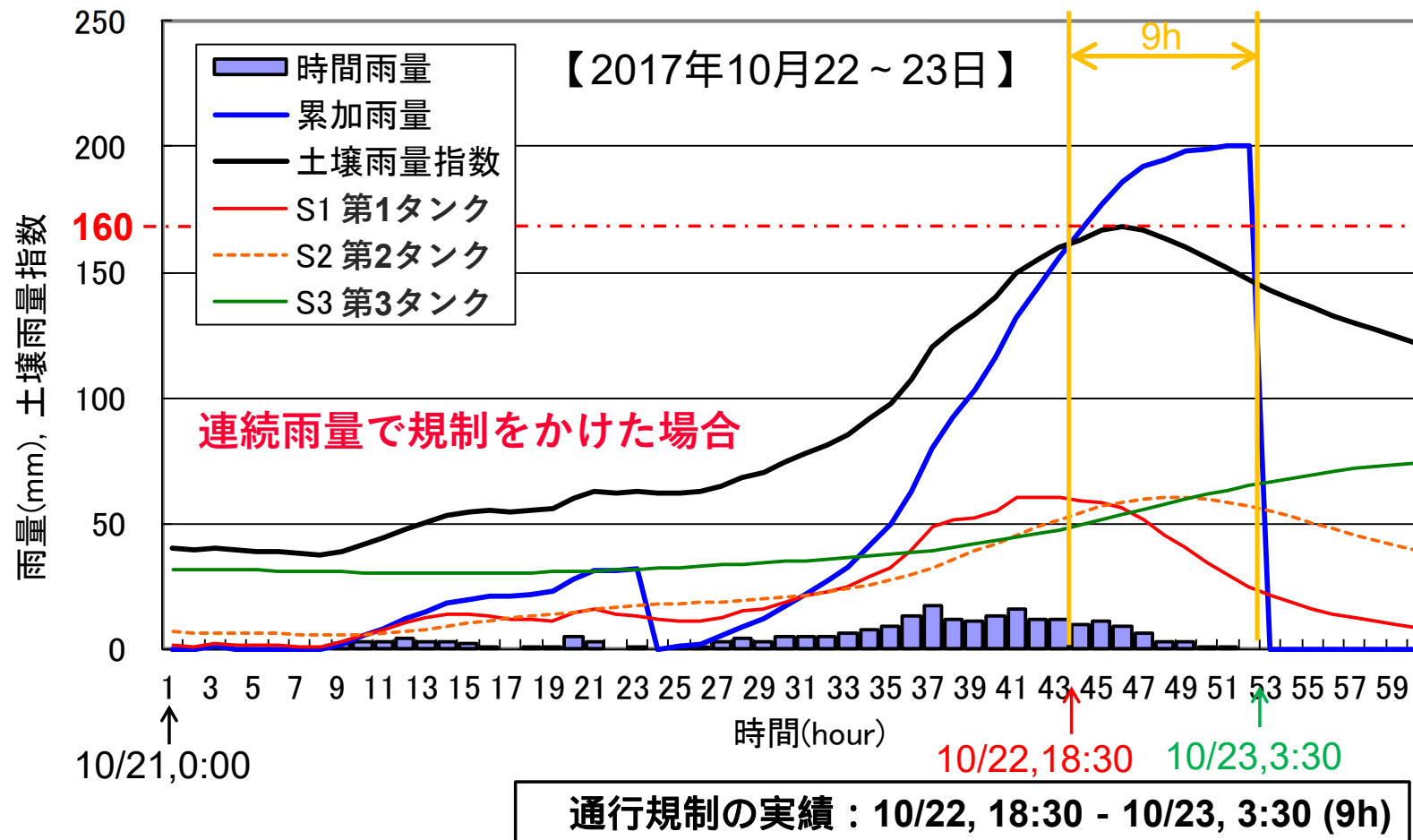
| Plot | Depth(cm) | $\alpha_1$ (1/hr) | $\alpha_2$ (1/hr) | $L_1$ (mm) | $L_2$ (mm) | $\beta_1$ (1/hr) | RMSE |
|------|-----------|-------------------|-------------------|------------|------------|------------------|------|
| K2   | 30        | 0.01              | 2.90              | 51.1       | 60.9       | 0.00040          | 1.38 |
| K2   | 60        | 0.05              | 3.00              | 52.0       | 60.9       | 0.00047          | 1.29 |
| K3   | 30        | 0.01              | 3.00              | 45.0       | 51.3       | 0.00062          | 1.35 |
| K3   | 60        | 0.99              | 2.60              | 42.0       | 56.5       | 0.00058          | 1.32 |
| 平均   |           | 0.27              | 2.88              | 47.5       | 57.4       | 0.00052          |      |
| 花崗岩  |           | 0.1               | 0.15              | 15         | 60         | 0.12             |      |

- 観音峠地区において、2020年9月23日からモニタリングを開始
- サイトスペシフィックモデルの開発を目標に直列3段タンクモデルにより計算される土壌雨量指数、体積含水率の計測値、飽和度の関係から、パラメータセットをフィッティング
- チャート質土壌で計測される体積含水率の応答とタンク貯留高の応答を一致させるパラメータセットを決定したが、オーダーの差が大きく、多様な地質を有するサイトの拡充が必要

林ら, 2021, 関西ジオシンポジウム論文集

## 2. 道路斜面に相応しい警戒基準の設定

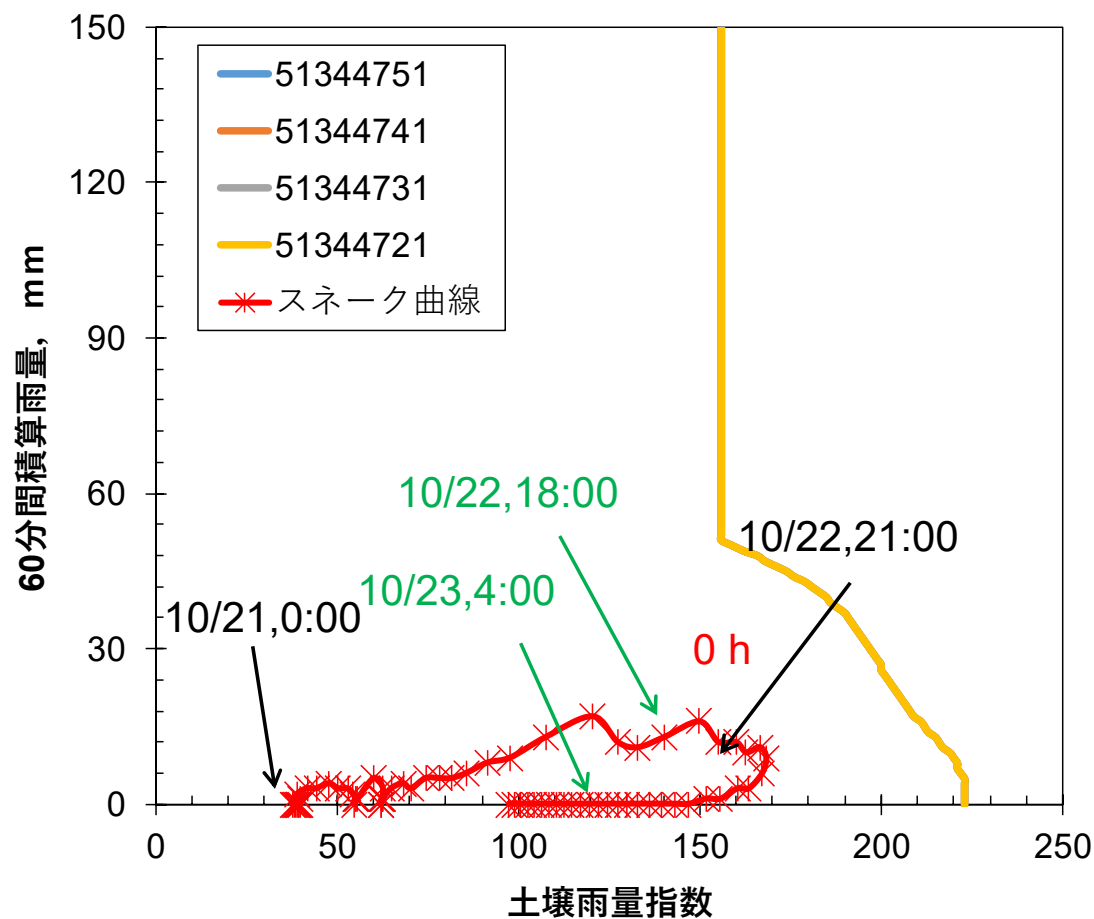
近畿地方整備局管内において、従来法と提案法の比較



## 2. 道路斜面に相応しい警戒基準の設定

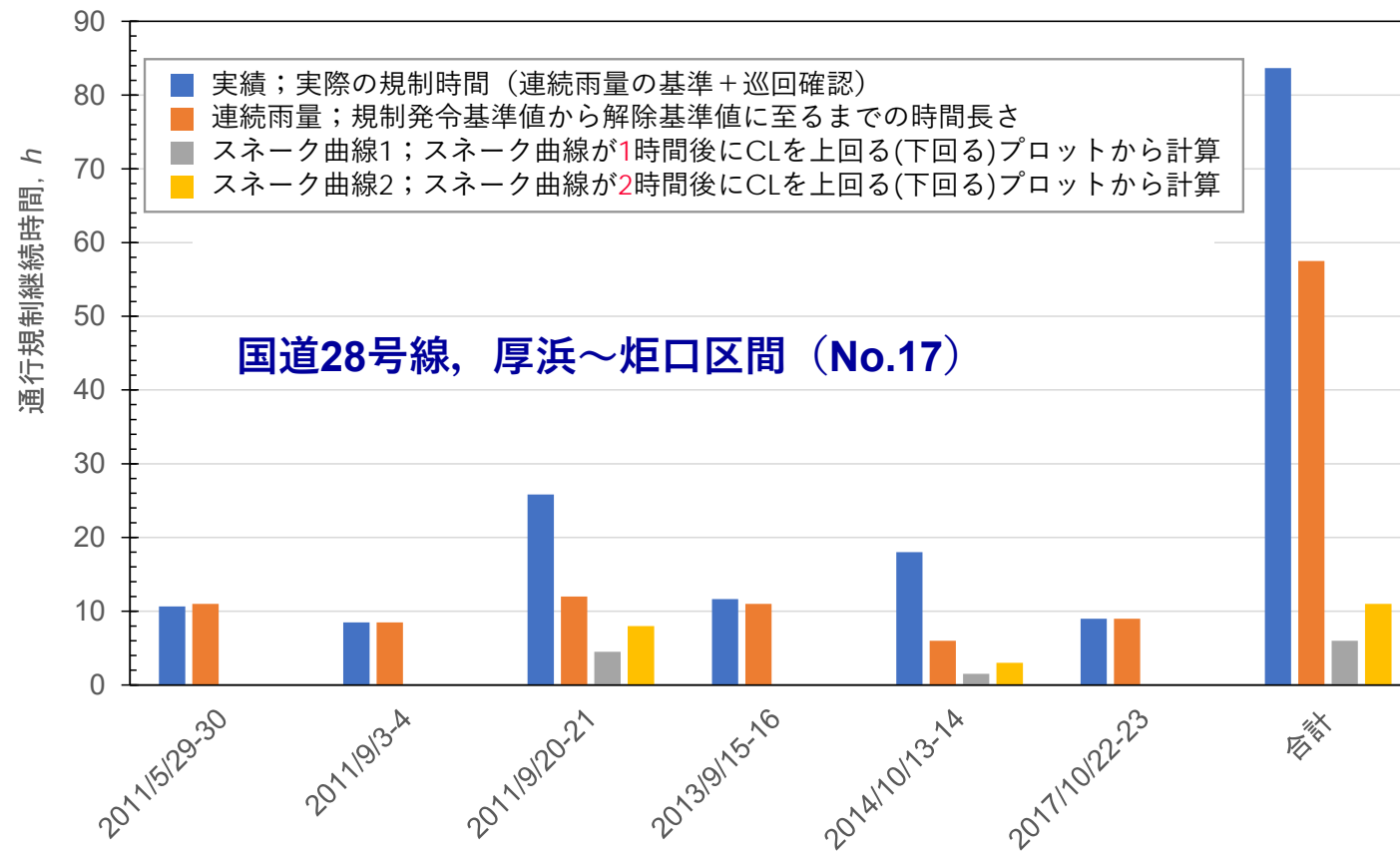
【2017年10月22～23日】

- 土砂災害警戒基準線（CL）のみで規制を発令した場合
- 連続雨量で規制を発令した場合と比較して、「空振り」を回避した事例
- 傾向としては、規制時間が短くなる



## 2. 道路斜面に相応しい警戒基準の設定

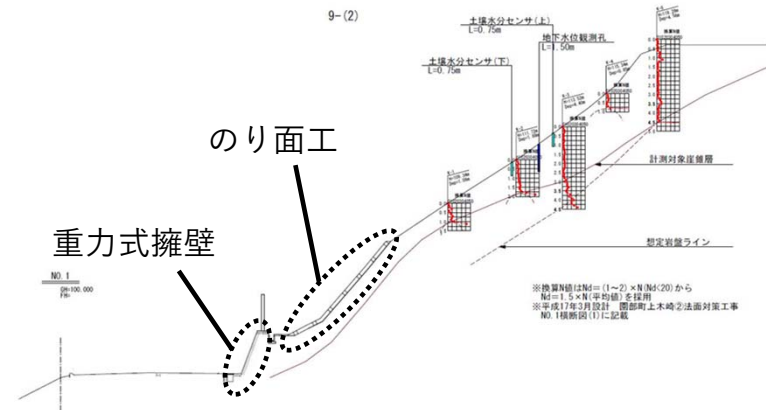
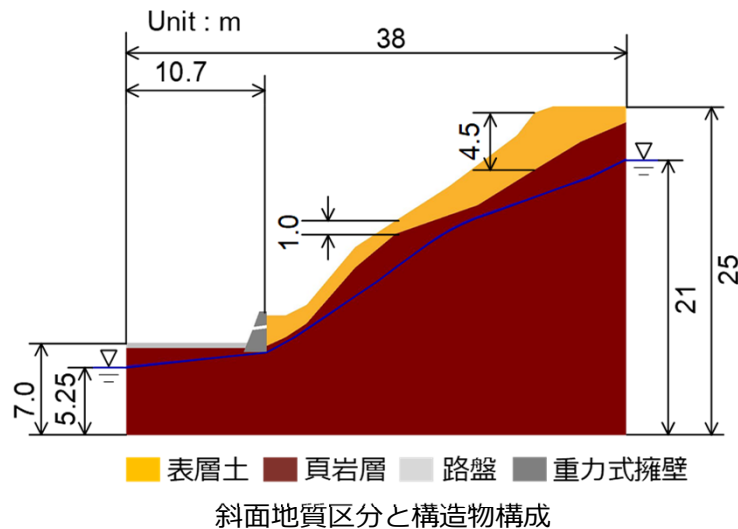
- CLのみを規制・解除の判断に用いると、規制時間短期化
  - ✓ CLを繰り返し超過する例が課題；予測雨量による整理が必要





## 2. 道路斜面に相応しい警戒基準の設定

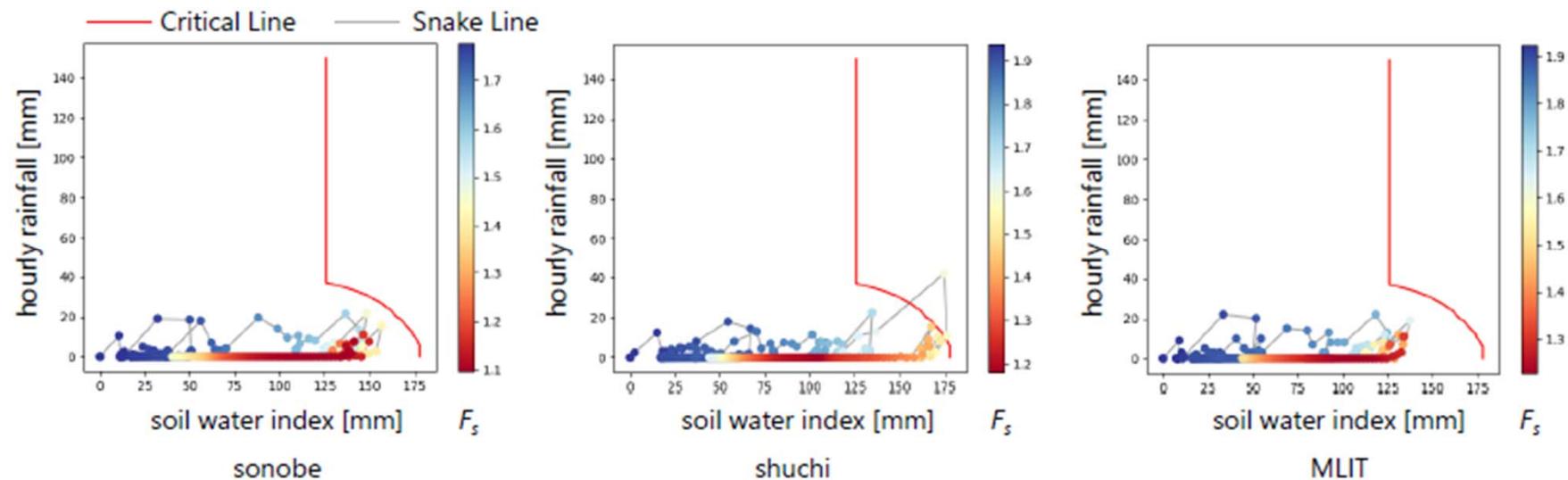
- 対策工直後の斜面に対してCLを更新する場合、過去の最大の災害非発生降雨を超える降雨を経験する必要有
- 対策工済みの斜面に対し、浸透流解析と円弧滑り解析を組み合わせ、**スネーク曲線上の斜面の安全率を直接評価する更新方法を提案**



観音峠地区のモニタリング斜面 横断図

## 2. 道路斜面に相応しい警戒基準の設定

- 平成30年7月豪雨に対して、想定した円弧滑り面に対し、  
現行の砂防CLを越える範囲で安全率1を下回ることがないことを確認
- CLを超過する範囲で災害非発生降雨データを収集することができ、  
これに基づき対策工済みの斜面におけるCLの更新が可能といえる



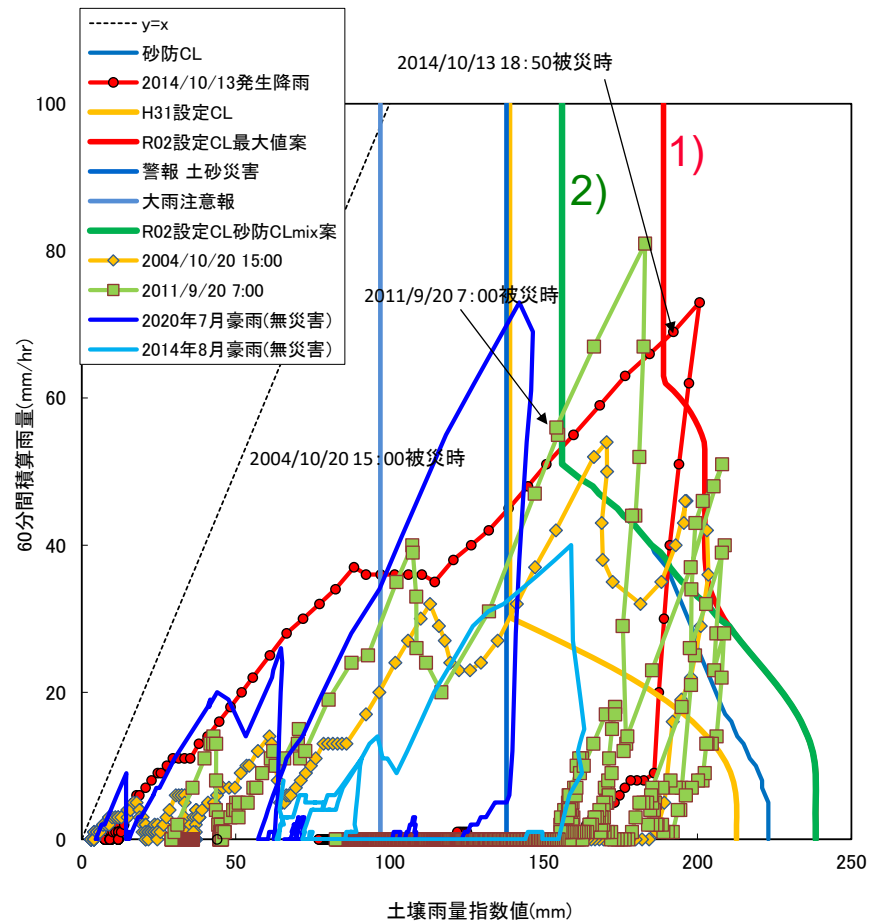
園部・須知・国交省テレメータ 観測降雨データによる計算結果（平成30年）  
想定した円弧滑り面とスネーク曲線上の安全率の推移（Fukuoka et al, 2022）

## 2. 道路斜面に相応しい警戒基準の設定

- 道路通行規制非発生降雨データに切り替えた道路用警戒基準へ；道路用CL（Critical Line）
- 10分間降雨を基に2種類提案

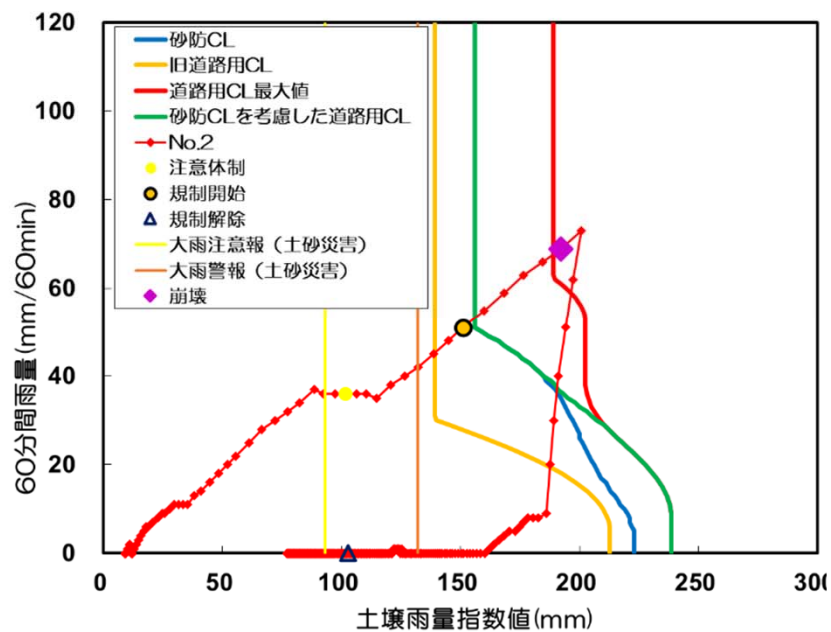
国道28号炬口地区に関して、

1. **被災実績を考慮した最大CL**  
災害発生降雨（2014年10月20日）時の土壌雨量指数と60分積算雨量がCLを超過する条件でCLを設定
2. **砂防CLを考慮したCL**  
これまでの無被災の降雨を包括したうえで、小規模な土砂流出現象も評価できるように、1)のCLをやや低めに設定した案

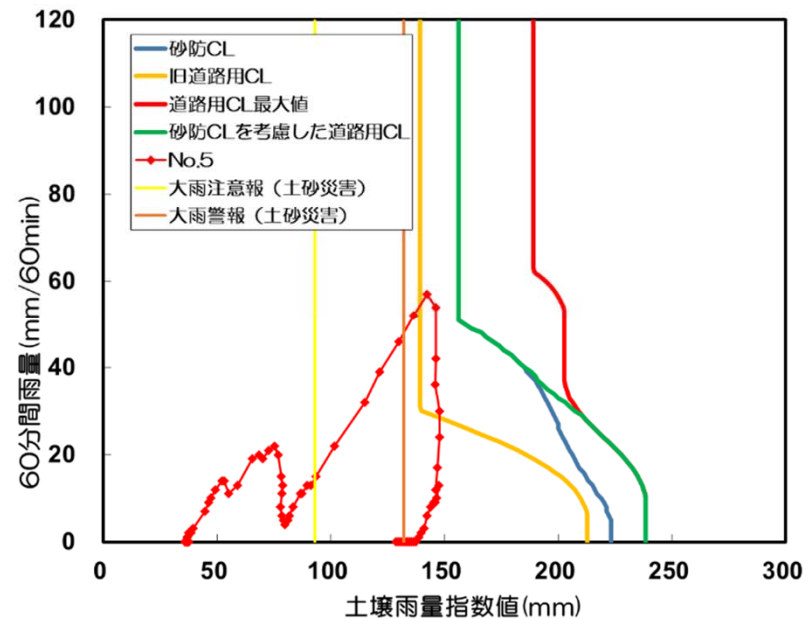


## 2. 道路斜面に相応しい警戒基準の設定

- 改善を加えた2種CLは、旧道路用CL（H31 CL）と比較し、被災実績を包括しつつ、過去の「空振り」を回避



被災実績あり (2014年10月13日)



通行規制なし (2016年9月20日)

### 3. 警戒体制の社会実装

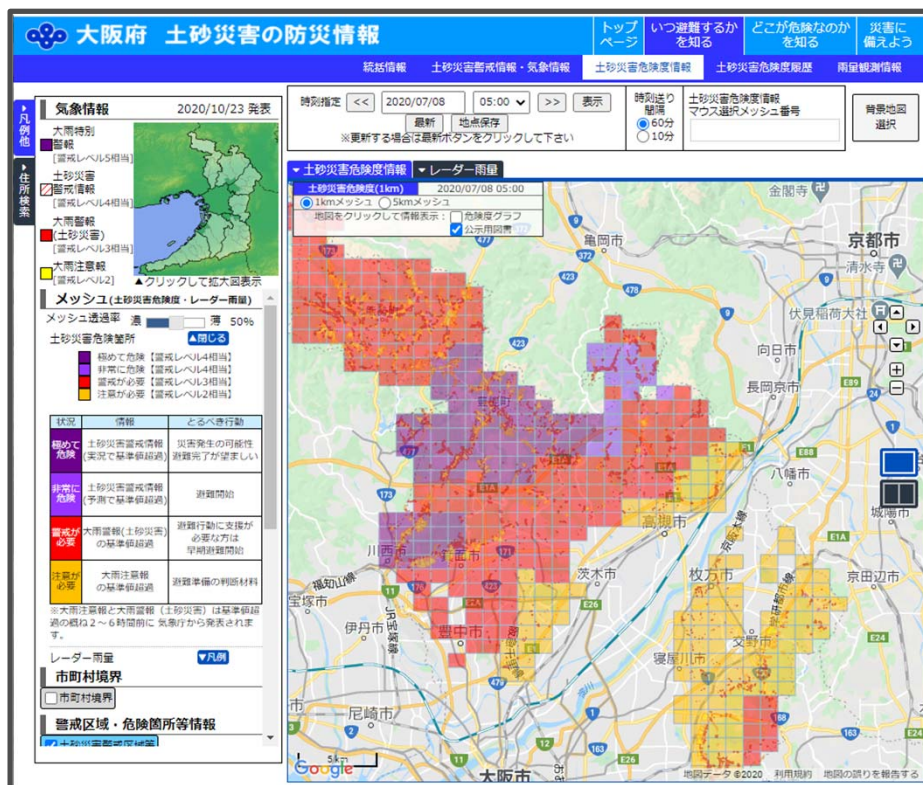
- 本プロジェクトで計画する各国道事務所の実装段階

|           | 実装段階 | 活用システム | テレメータ<br>雨量活用 | 解析雨量活用<br>(現時刻降雨) | 解析雨量活用<br>(予測降雨) | CLのタイプ |
|-----------|------|--------|---------------|-------------------|------------------|--------|
| 短期        | I.   | 既往HP活用 | ×             | △                 | △                | 砂防     |
| 導入時期<br>↓ | II.  | 専用     | ○             | △                 | △                | 砂防     |
|           | III. | 専用     | ○             | ○                 | ○                | 道路     |
| 長期        |      |        |               |                   |                  |        |

×：取得不可， △：既往HPを活用した手動取得， ○：完全自動取得，  
砂防：従来の土砂災害発生危険基準線， 道路：道路用の土砂災害発生危険基準線

### 3. 警戒体制の社会実装：大阪府 実装段階Ⅰ.を実現

| 実装段階 | 活用システム | テレメータ<br>雨量活用 | 解析雨量活用<br>(現時刻降雨) | 解析雨量活用<br>(予測降雨) | CLのタイプ |    |
|------|--------|---------------|-------------------|------------------|--------|----|
| 短期導入 | I.     | 既往HP活用        | ×                 | △                | △      | 砂防 |

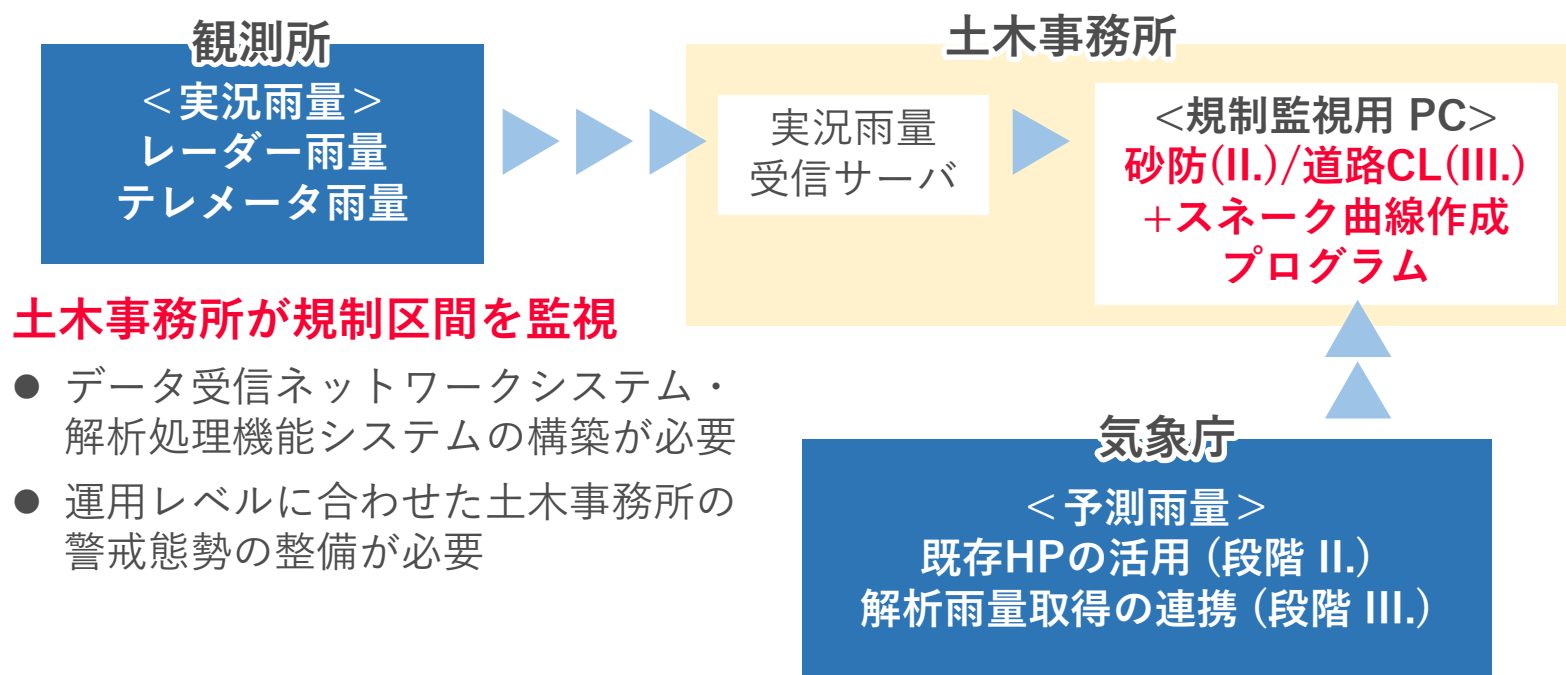


#### 大阪府 土砂災害の防災情報HPの例 (自治体により表現方法が異なる)

- 5 (or 1) kmメッシュごとの60分間積算雨量時系列グラフ、降雨データが取得可能
- 3時間後までの予測が可能
- 事前通行規制区間内に「非常に危険（薄紫）」に到達するメッシュを確認次第、パトロール（茨木土木事務所の例）
- 2020年7月豪雨で従来の規制条件で捉えられなかった被害を捉えた
- 砂防用CL基準に合わせた規制/解除体制を実現した例

### 3. 警戒体制の社会実装：炬口においてIII. を試行開始

|       | 実装段階 | 活用システム | テレメータ雨量活用 | 解析雨量活用<br>(現時刻降雨) | 解析雨量活用<br>(予測降雨) | CLのタイプ |
|-------|------|--------|-----------|-------------------|------------------|--------|
| 中長期導入 | II.  | 専用     | ○         | △                 | △                | 砂防     |
|       | III. | 専用     | ○         | ○                 | ○                | 道路     |



### 3. 警戒体制の社会実装：試行運用ルール

- 試行予定の炬口地区の規制ルール；従来法との併用型

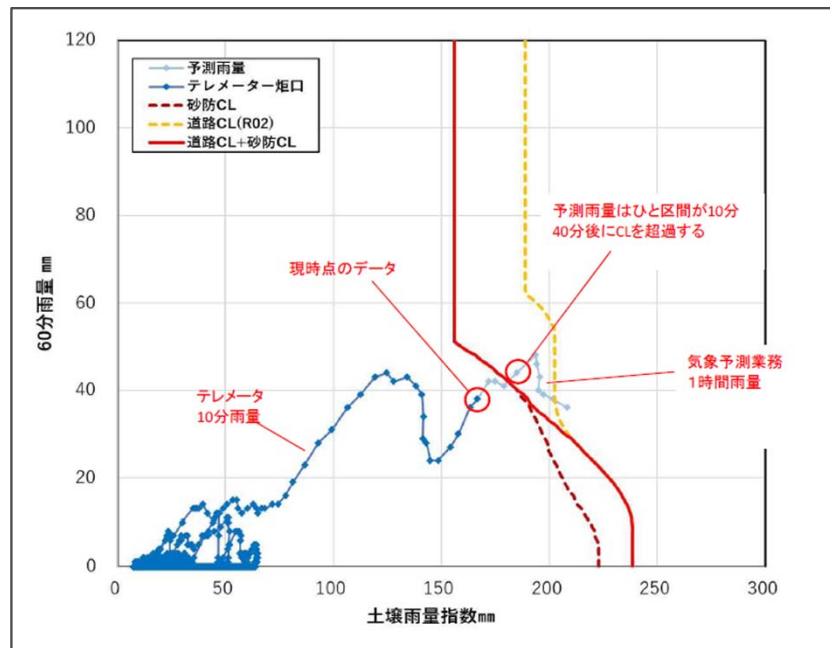
| 通行止め基準      | 現行  | 試行運用   |
|-------------|---|--|
| 注意体制        | 100mm   | 同左   |
| (運用)<br>注1) | 上記 又は   | 気象庁の「大雨注意報」相当の土壌雨量指数基準 注2)   |
| 注意強化体制      | 連続雨量: 60mm以上 かつ 時間降雨量: 50mm/h以上<br>連続雨量: 70mm以上 かつ 時間降雨量: 40mm/h以上<br>連続雨量: 80mm以上 かつ 時間降雨量: 30mm/h以上 | —  |
| (運用)<br>注3) | 上記 又は   | 3時間後に土壌雨量指数の土砂災害発生危険基準線※(CL)を上回る予測の時点  |
| 警戒体制        | 120mm   | —  |
| (運用)<br>注4) | 上記 又は   | 2時間後に土壌雨量指数の土砂災害発生危険基準線※(CL)を上回る予測の時点  |
| 非常体制        | 160mm   | —  |
| (運用)<br>注5) | 上記 又は   | 土壌雨量指数の土砂災害発生危険基準線※(CL)を上回った場合、通行止め 開始することができる   |
| 解除          | 時間降雨2mm以下が3時間連続した後、巡回等により安全が確認された場合に解除する  | —  |
| (運用)<br>注6) | 上記 かつ   | 降雨予測がなく、点検等による安全性が確認でき、土壌雨量指数が土砂災害発生危険基準線※(CL)を下回り、3時間後の降雨予測が土砂災害発生危険基準線※(CL)を上回らない場合、通行止めを解除する注7) |

本プロジェクトのCLは、土砂災害警戒情報と同様に土砂災害発生危険基準線(砂防CL)であり、土壌雨量指数だけでなく60分間雨量の組合せからなる基準

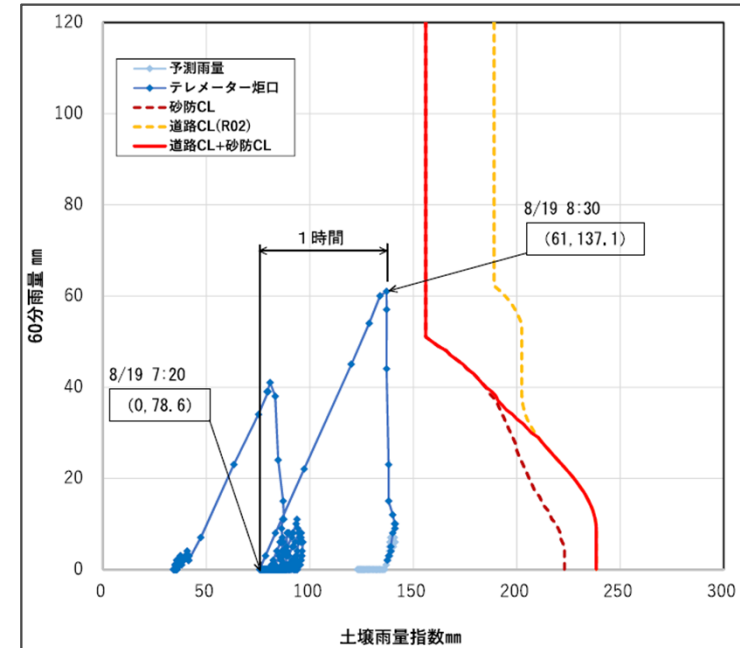


### 3. 警戒体制の社会実装：炬口(兵庫県)においてIII. を試行

- データ受信ネットワークシステム・解析処理機能システムの構築が必要
- 運用レベルに合わせた土木事務所の警戒態勢の整備が必要



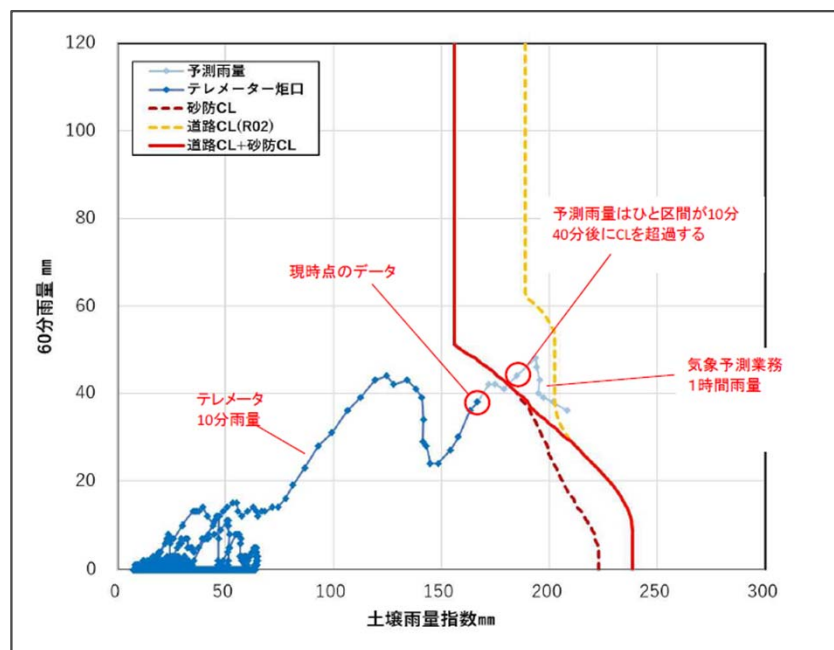
システム仕様



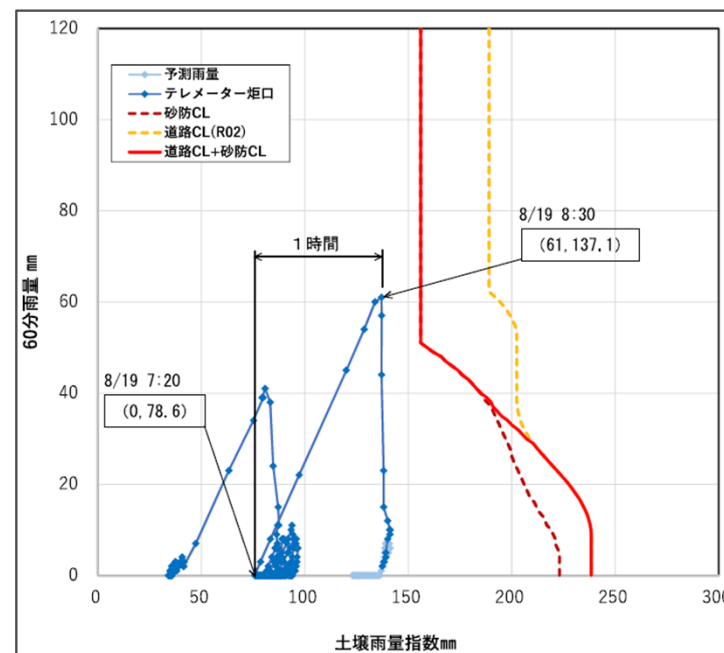
2021/8/17 ~ 8/19 の監視事例

### 3. 警戒体制の社会実装：炬口(兵庫県)においてIII. を試行

- 炬口テレメータ・気象庁提供の予測雨量データをスネーク曲線として可視化
- 令和3年8月11日から的大雨に対して、本システムにより監視結果的に通行規制は必要なし → 一方で、従来法により規制はかからない危険な雨



システム仕様



2021/8/17 ~ 8/19 の監視事例

# まとめと今後の課題

## 1. モニタリングによる土壌雨量指数の妥当性の把握と改善 成果と課題

- 異常気象時通行規制区間の2地区（花崗岩系 炬口地区，堆積岩系 観音峠地区）において，地下水，土壌水分をモニタリングする計測システムを構築した．これらのサイトにおける体積含水率のモニタリングに基づき，土壌雨量指数と比較することで，**花崗岩とは土質の異なる土壌でのタンクモデルの妥当性を検討することを目的とした**．その上で新たなパラメータの値を提案した．
- 観音峠地区のモニタリングの結果，体積含水率とタンク1の貯留高 $S_1$ は相対値を変化させると，似た値の変動を示していることが分かった．従って，タンクモデルのパラメータを変えることで，貯留高 $S_1$ の変動が体積含水率と一致させることができる可能性が示唆された．
- しかし，花崗岩質の炬口は観音峠に比べて顕著に従来の花崗岩を元に決定されたパラメータの値に近くはならなかった．これらの結果は，花崗岩質斜面における風化の程度，形状などの多様性に起因することが予想され，**モニタリングサイトの拡充が必要であることを示唆している**．

## まとめと今後の課題

### 2. 道路斜面に相応しい警戒基準の把握 成果

- 異常気象時通行規制の発令・解除に関して、連続雨量と土壌雨量指数を用いた方法による規制時間の比較を行った結果、**土壌雨量指数による規制の方が、規制時間が短くなる傾向がみられた。**
- 二次元浸透解析および円弧滑り解析に基づき対策工効果を仮定して算出された安全率の推移を、スネークライン上で評価する方法を提示した。これに基づき、2018年7月の降雨においてスネーク曲線上の推移と現行のCLの超過状況を比較すると、安全率1を下回ることがなく、対策工効果を加味した災害非発生降雨データを収集できた。**これにより、現行のCLを更新する一手法を提案した。**
- 道路通行規制非発生降雨データに基づく、道路用の土砂災害警戒警戒基準線（道路用CL）の策定を炬口地区において行い、10分間降雨を用いて2種類の道路用CLを提案した。結果、CLのみを用いて、規制の発令・解除判断を行う場合、過去の被災実績を包括しつつ、「空振り」を回避した。

# まとめと今後の課題

## 2. 道路斜面に相応しい警戒基準の把握 課題

- CLを用いて通行規制の発令・解除判断を行う際、CLを繰り返し超過するケースに関しては、依然として課題が残る。過去の規制事例に対して、予測雨量を用いた分析を進めることで、規制の発令・解除タイミングを適切に設定することを目指す
- 水平展開を加速するため、炬口地区に関して策定された道路用CLについて、同様に観音峠地区においても検討を進める。
- 対策工済みの道路用CLの更新に関して、二次元解析を行う場合、異常気象時通行規制区間に対して逐次的な解析が必要になるが、対策工を施された斜面に限定的に実施し、ケース数を増やすことで、解析範囲の妥当性を検討する。対策工の劣化状況に関する評価については課題が残る。
- いずれの検討においてもどの降雨データを用いるか、という課題を有し、Xrain, モニタリングサイトの打刻式雨量計, 国交省設置のテレメータ等既存の降雨データを包括的に分析し、適切な降雨データを選定する必要がある

## まとめと今後の課題

### 3. 警戒態勢の社会実装 成果と課題

- 大阪府において、既存の土砂災害警戒情報と従来の連続雨量による規制の発令・解除方法を併用する（実装段階Ⅰ.）ことで、**気象庁の土砂災害警戒基準に合わせた規制・解除体制を実現した。**
- 炬口地区において、2.で構築された**道路用CLに基づく専用の斜面監視システム（実装段階Ⅲ.）を構築した。**このシステムは、気象予測業務で予測した雨量を、その時点以降のスネーク曲線として表示することが可能である。本システムでは、**現行の規制基準である累積雨量と土砂災害発生危険基準の関係を確認することができる。**2021年8月以降の大雨に対して監視データを蓄積した。
- 規制の発令・解除判断に関しては、連続雨量と土壌雨量指数による規制の併用を行った場合、規制時間の長期化が懸念される。**そのため、事前通行規制の時間的な適正化に向けて、専用システムに基づく監視経験を引き続き蓄積する必要がある。**

## 主たる参考文献

---

- 国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015.
- 気象庁予報部予報課 気象防災推進室：土壌雨量指数・表面雨量指数・流域雨量指数の概要と基準の設定方法について，気象等の情報に関する講習会，2018.
- Ishihara, Y. and S. Kobatake (1979): Runoff Model for Flood Forecasting, Bull.D.P.R.I., Kyoto Univ., 29, 27-43
- 国土交通省道路局国道・防災課道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の施行，2015.
- 松四雄騎：豪雨と崩壊；山地の斜面災害を知る，京都大学防災研究所公開講座
- 小山倫史：降雨特性に応じた道路通行規制のあり方に関する研究，2016.
- 小山ら：国道沿い斜面を対象とした数値解析と実効雨量を組み合わせた雨量通行規制基準の提案，2015.
- 鳥居宣之：事前通行規制区間の解除の在り方に関する研究，2018.
- 小原公克：土砂災害発生危険度の解析・予測技術，2018.

Thank you for your kind attention!

---



# Appendix.

1. 道路用CLにおける課題
  2. 地中温度計測に基づく土壌水分把握
  3. 事前通行規制の変遷
  4. 炬口地区における試行運用の補足
  5. 連続雨量法による規制の限界
-

## Appendix. 道路用CLにおける課題

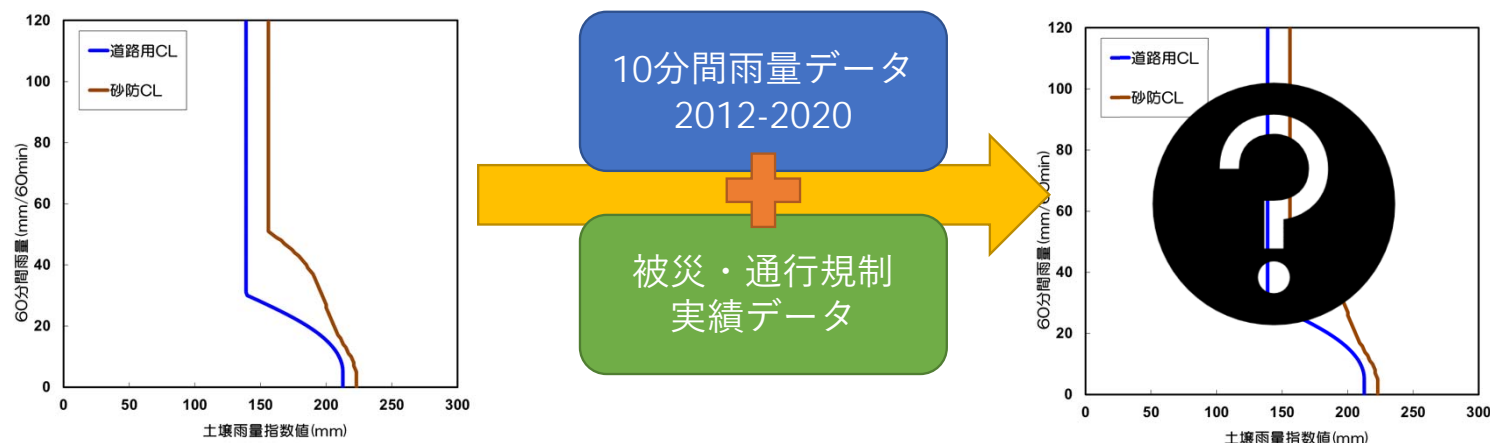
---

# 道路用CLの設定による通行規制/解除のシステム作り

## <背景と目的>

H28-H30年度の新都市研究会PJ（代表：鳥居@神戸高専）において、国道28号炬口テレメータの降雨データ（1時間雨量データ）ならびに災害（無被災）履歴データを利用して、土壌雨量指数と60分積算雨量に基づく道路用の土砂災害発生危険基準線（以下、道路用CLと称す）を作成し、この道路用CLを通行規制・解除の基準として用いることを提案

本WGでは、2021年度から炬口規制区間での道路用CLを用いた通行規制・解除の試行に向けて、新たに近畿地方整備局から炬口テレメータの10分間降雨データを入手し、前回のプロジェクト以降で観測された降雨実績ならびに通行規制実績等を考慮した新たな道路用CLを作成し、2021年に観測された雨量データを対象に、妥当性について検討



前回PJで作成した道路用CLと規制区間内で使用されている砂防CL

## 道路用CLの設定による通行規制/解除のシステム作り

### <2019年度>

2021年度からの炬口規制区間での道路用CLを用いた通行規制・解除の試行にむけて、課題の整理・検討

### <2020年度>

近畿地方整備局から炬口テレメータの10分間降雨データを入手し、前回のプロジェクト以降で観測された降雨実績ならびに通行規制実績等を考慮した新たな道路用CLを作成

### <2021年度>

2021年に観測された雨量データを対象に、新たな道路用CLの妥当性について検討

# 道路用CLの設定による通行規制/解除のシステム作り

## <新たな道路用CLの作成>

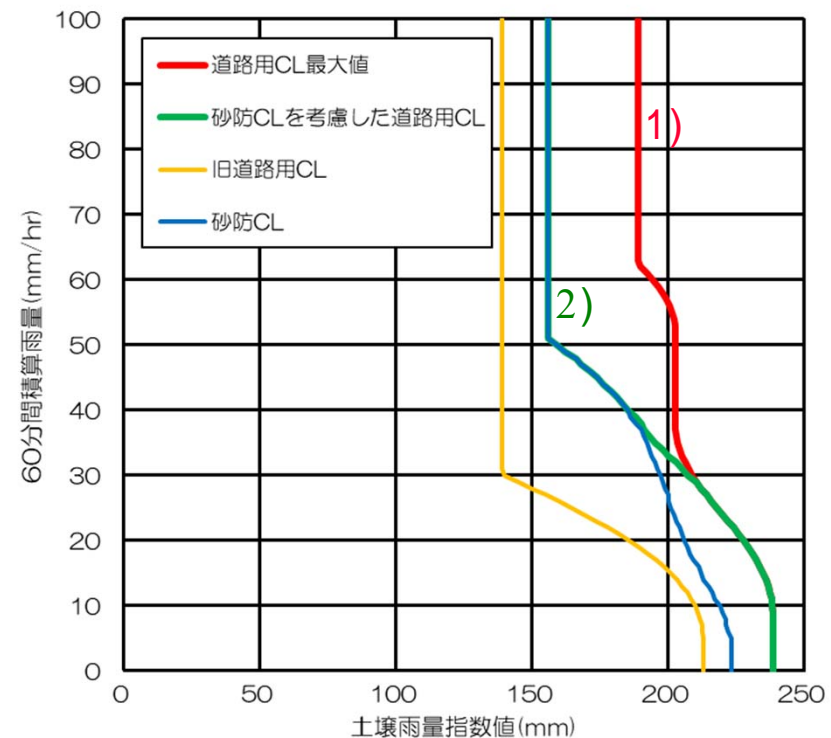
**RBFN** (Radial Basis Function Network) を用いた応答曲面や土砂災害発生危険基準線 (CL) の設定については、土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法に従った道路用CLとして以下の2つを提案

### 1) 被災実績を考慮した最大CL

災害発生降雨 (2014年10月20日) 時の土壌雨量指数と60分積算雨量がCLを超過する条件でCLを設定

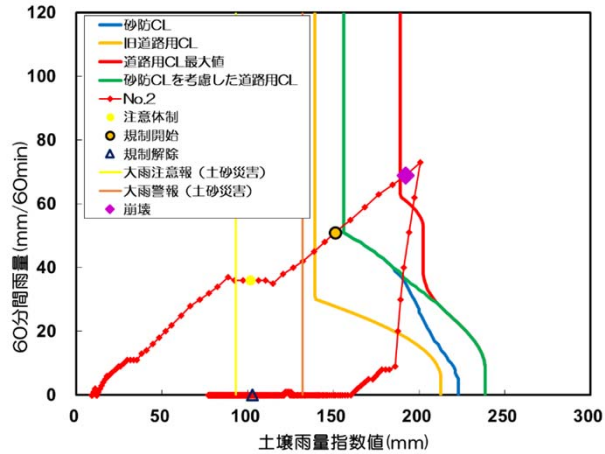
### 2) 砂防CLを考慮したCL

これまでの無被災の降雨を包括したうえで、小規模な土砂流出現象も評価できるように、1)のCLをやや低めに設定した案

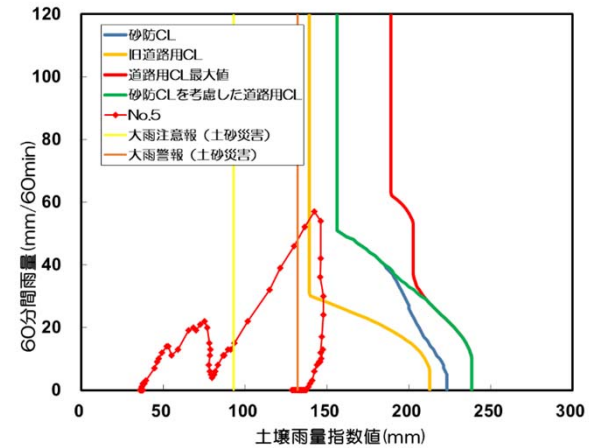


# 道路用CLの設定による通行規制/解除のシステム作り

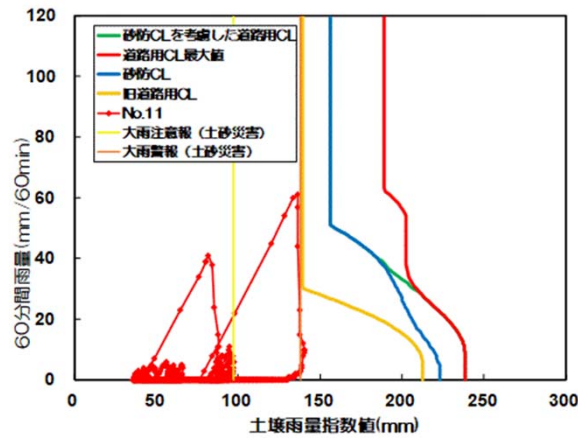
< 新たな道路用CLと災害・規制実績との比較 >



被災実績あり (2014年10月13日)



通行規制なし (2016年9月20日)



通行規制なし (2021年8月17~20日)

# 道路用CLの設定による通行規制/解除のシステム作り

## <今後の課題>

### 【使用する雨量データの検討】

- テレメータ（規制区間で原則1点での観測雨量）を使用
- 解析雨量（規制区間で複数点での解析雨量）を使用
- 国交省XRAINを使用

過去の災害実績ならびに通行規制実績に対し、どの降雨データを用いるのが最も適しているかを比較検討

### 【規制時間の適正化の検討】

- 各体制発令基準の妥当性の検討
- 繰り返しCLを超過する場合の対応

どのCLを用いるのが最も適しているかを比較検討、実績雨量値と予報値（降水短時間予報値）を使用し、実際の通行規制実績と比較検討

### 【道路用CLの見直しの検討】

- 対策工の施工完了後
- 無被災降雨を経験後  
道路用CLの見直し方法について検討

## Appendix. 地中温度計測に基づく土壤水分把握

---



## 1枚目:WGの検討目標

土壌水分量、地中温度計測データを基に、降雨時ののり面浸透を再現し、浸透-熱連成解析から降雨浸透の新しい知見を得ることで、斜面安定性評価のための安価で網羅的な崩壊予測ツールとして地中温度計MEMSを開発・実装に向けた可能性を検討する。

表-1 社会実装へのロードマップ

| 目標とする実装内容                  | 令和3年   | 令和4年                               | 最終目標                                      |   |
|----------------------------|--|------------------------------------|---|---|
| 土壌水分を利用した通行規制・解除           | 社会実装に向けた基礎実験(検証)<br>具体的には地下水の抜けていく状態を追跡して、規制解除の考え方に取り入れる | 観測データ収集継続<br>土壌雨量指数のサイトスペシフィック版検討へ | 土壌雨量指数のサイトスペシフィック版の提案と令和3年度実装システムへの組み込み検討 | 土壌水分量を基礎にした通行規制・解除の運用システムの導入<br>サイトスペシフィック版土壌雨量指数の提案と導入 |
| 地中温度の計測により、土壌水分量観測の代替手段とする | 社会実装に向けた基礎実験(検証)<br>観音峠・炬口データ収集                          | 観測データ収集継続<br>降雨・土壌水分量の代替検証         | 必要とされるMEMS要件をとりまとめる。                      | 独立型MEMSとして受信器を開発完了し、実装する。                               |



図-1 地中温度MEMSと親機データロガー内部写真(MU-2/Smart Analog)

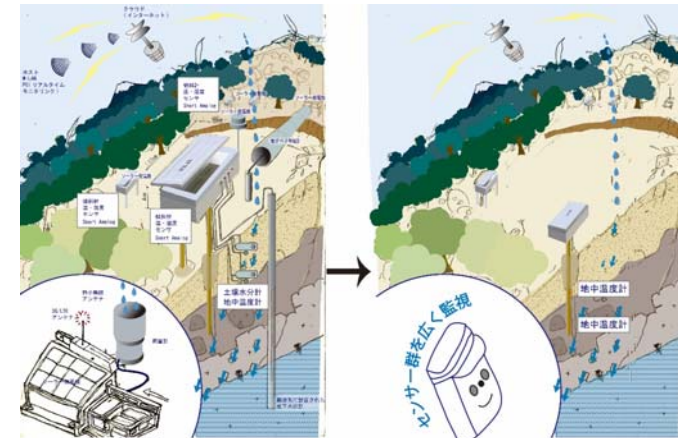


図-2 温度計MEMSで観測体制の規模が変わる

## 2枚目:3年分の検討事項のリスト

| 実施年度           | 検討項目(温度計MEMSの適用検証)   | 備考     |
|----------------|--|--------|
| 1年目<br>(令和元年度) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 既往データの整理</li> <li>・ カラム試験試料採取</li> <li>・ 時刻打刻型雨量計設置</li> <li>・ リアルタイム監視システムの導入(仮設置・閲覧配信)</li> </ul>                 | 写真-1,2 |
| 2年目<br>(令和2年度) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 国道9号線観測サイトの選定・観音峠の選択</li> <li>・ 雨量計の設置/リアルタイム監視システムの設定/土壤水分計、地中温度計の設置/バッテリーによる電力供給の設置、維持/測量/簡易貫入試験(地質調査)</li> </ul> | 写真-3   |
| 3年目<br>(令和3年度) | 観音峠におけるモニタリング斜面を対象とした土水熱連成解析   |        |



写真-1 試料採取状況 D級真砂土を採取

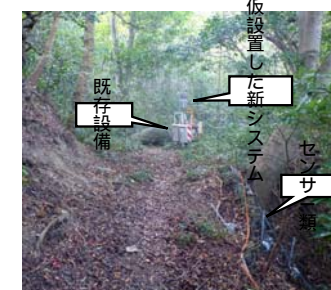


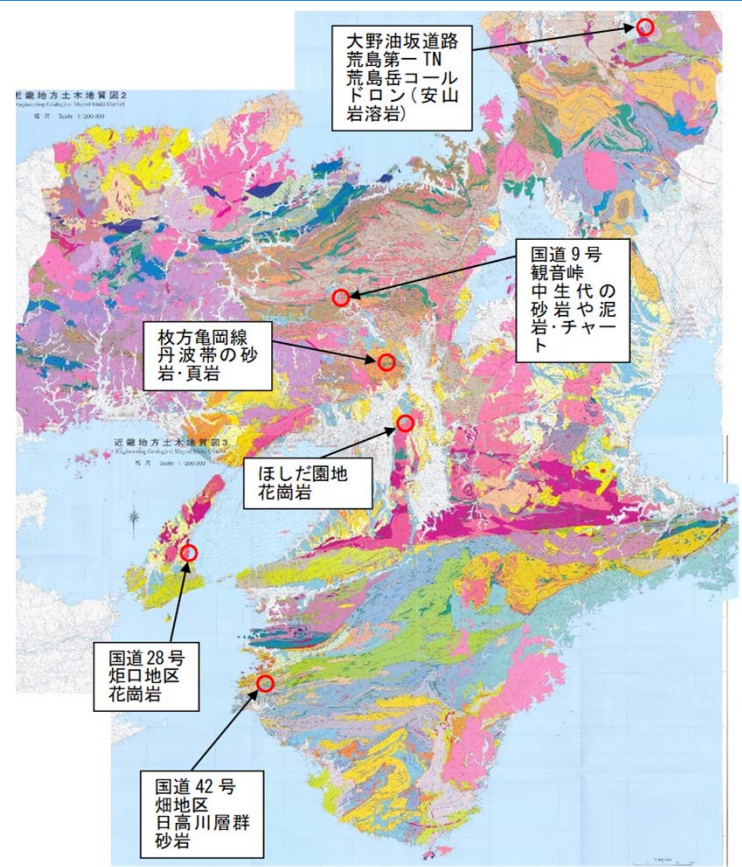
写真-2 既存ロガー設備箇所に仮設置した降水量観測システムとwebリアルタイム監視システム



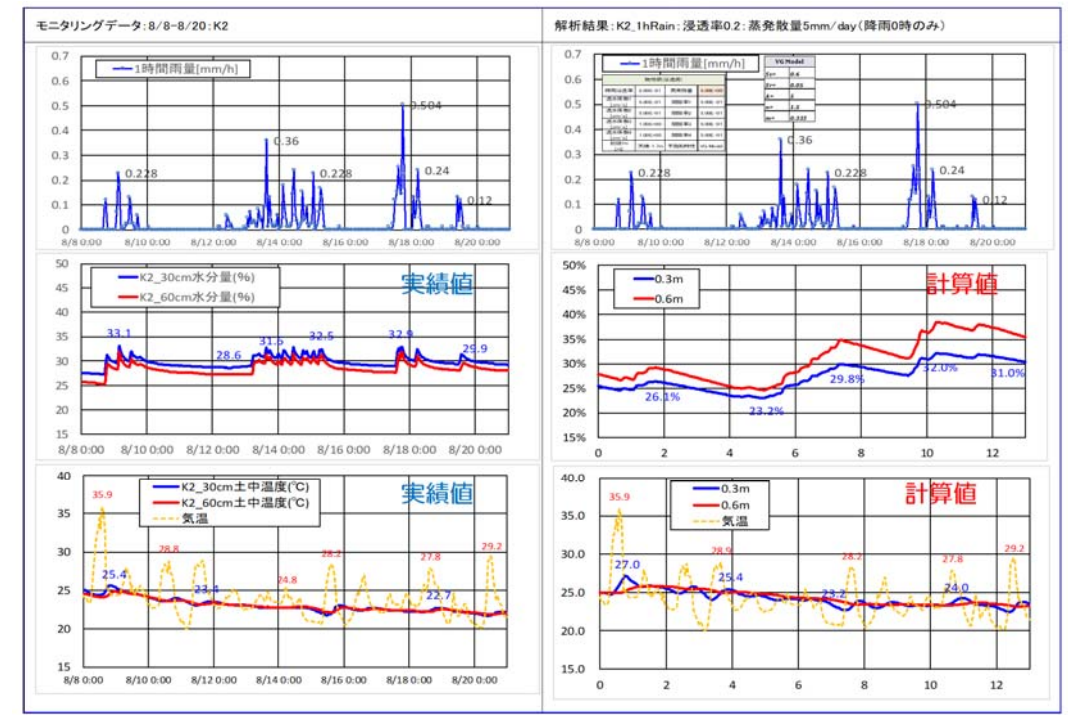
図-3 国道9号観音峠サイト

3枚目:主要な成果

土壌雨量指数のサイトスペシフィック版検討へ向けて土壌水分を考慮した斜面監視システムの実証サイトを近畿地方の直轄国道に係わる代表的な地質圏で設定できた。花崗岩類・火山岩類のサイト、茶系統・寒色系統で表される泥岩・頁岩等の堆積岩のサイト等網羅できた。



熱伝導理論を用いて地表面の周期的な温度変化に伴う地温分布の定常的な周期変動は予測可能とされており、このような気温変化に影響される予測結果から、実際の観測値とのズレを詳細に検討し、降雨浸透に伴う浸透-土水熱連成解析を通じて、地中温度をパラメータとして土中内の浸透流の動態(土壌水分量の変化)把握に活用できる可能性がある事が確認できた。



実測値と計算値の対比 蒸発散量5mm/h ( : 2021年8/8 ~ 2021年8月20日)

## 4枚目:今後の課題

今後、最終的な目的である地中温度MEMS開発に関わる土壌水分量と地中温度の相関の解明に向けての課題を以下にまとめた。

土中におけるサクション（負圧）は、当然、降雨特性に大きく依存し、降雨強度が小さい場合は浸潤フロントが深部まで達しにくく、浅部のサクションのみ低下させる。降雨強度の小さい雨が長時間降り続く、降雨の浸潤フロントは緩やかに地盤の浅部から深部へ低下し、深部のサクションにも影響を及ぼす。これまでの知見でいえば先行降雨を伴う降雨イベント、あるいは単位時間当りの降雨強度が大きい降雨イベントでは、浸潤フロントは短時間で深部に到達すると考えられる。

既往研究事例として、佐倉（千葉大）・谷口（京大1983）のカラムを用いた降雨浸透実験によれば、降雨開始にともなって“ぬれ前線”が形成され、ぬれ前線が懸垂水帯を降下して不飽和毛管水帯の上端に到達すると、毛管水帯における圧力平衡が崩壊する。この圧力変化は瞬時に地下水面付近まで伝達され、その結果、不飽和および飽和毛管水帯の水の移動が始まり、地下水面を通過する水の移動が生ずることが示されており、今後“ぬれ前線”の概念も導入した土壌水分の変化メカニズムの構築を検討する方針である。

降雨の発生により土壌水の移動が始まると、毛管水帯では懸垂水帯のように“ぬれ前線”が降下するという移動形態はとらず、毛管水帯に“ぬれ前線”が到達すると、一斉に土粒子間を満たす水の移動が生ずる浸透メカニズムの急激な変化が生ずると考えられる。

降雨時の地温変化に関しても地表面における熱収支との関連で定量化を進めることで、土壌水の移動機構をより定量的に把握し、このような急激なメカニズムの変化の理解を取り込むことで、土壌水分量と地中温度の相関の利用がより実践的になると考えられる。

観測計画に関しては、上述したように毛管水帯における圧力平衡が崩壊し、圧力変化は瞬時に地下水面付近まで伝達され、不飽和および飽和毛管水帯の水の急激な移動現象を把握することの実証に向けて、これまでの長期観測結果の精査に加えて、短期間での降雨時における実測鉛直連続プロファイルの観測の実施が必要であると考えている。

## Appendix. 事前通行規制制度の変遷

---

# 事前通行規制の変遷

---

## 事前通行規制制度の歴史\*

- 事前通行規制とは

- ✓ 「大雨や台風による土砂崩れや落石等の恐れがある箇所については、過去の記録などを元にそれぞれ規制の基準等を定め、災害が発生する前に「通行止」などの規制を実施し、道路を利用する皆様の安全を確保します。」

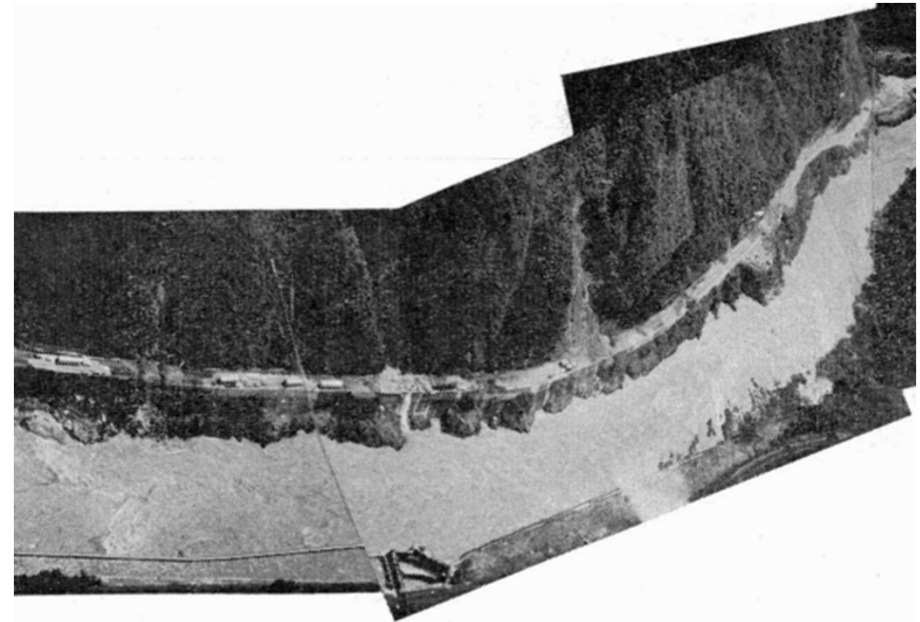
- <https://www.mlit.go.jp/road/bosai/jizenkisei/kisei.html> より

\*国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015.

# 事前通行規制の変遷

## 事前通行規制制度の歴史\*

- 飛騨川バス転落事故を契機に，一般道路に導入
  - ✓ 昭和43年8月18日に岐阜県加茂郡白川町の国道41号で発生
  - ✓ 国道を通行中の観光バス 2 台が巻き込まれ，並行する飛騨川に転落した事故で，乗員・乗客 104 人が死亡した道路災害
  - ✓ 昭和 44年に**事前に区間を指定して異常気象時に通行止めを行う制度**（事前通行規制制度）が整備
- 転落事故以前の道路管理
  - ✓ 道路法第 46 条に基づき，**災害等で道路が損壊してから**，通行止め措置を行うことが一般的



飛騨川バス転落事故  
(尾崎・伊藤, 1968)より抜粋

\*国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015.

\*尾崎，伊藤，1968. : 8.17豪雨災害およびバス転落事故について，地すべり，Vol (5), No. 2, pp. 34-40.

# 事前通行規制の変遷

指定区間内に標識を設けることで注意喚起を行う



初の事前通行規制区間（岐阜新聞Web）



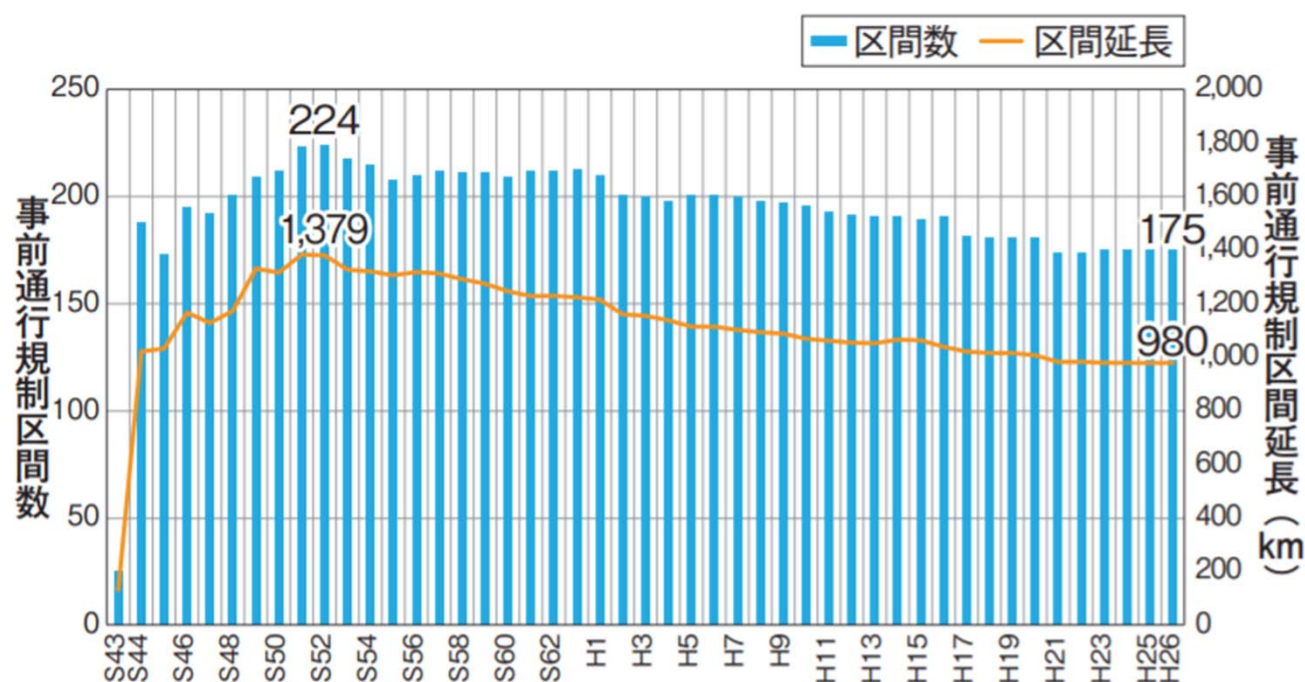
事前通行規制の様子（国土交通省）



# 事前通行規制の変遷

## 事前通行規制区間の指定はH27年4月時点で減少傾向

- 昭和 50 年代前半から、ピークの昭和 52 年度には 224 区間1,379km が指定。
- 各区間で法面防災対策が実施
  - ✓ 事前通行規制区間の安全性向上に伴い、規制区間は解消され、平成 27 年 4 月現在では、175 区間 980km
- 高速道路も同様に規制区間の適正化が図られている



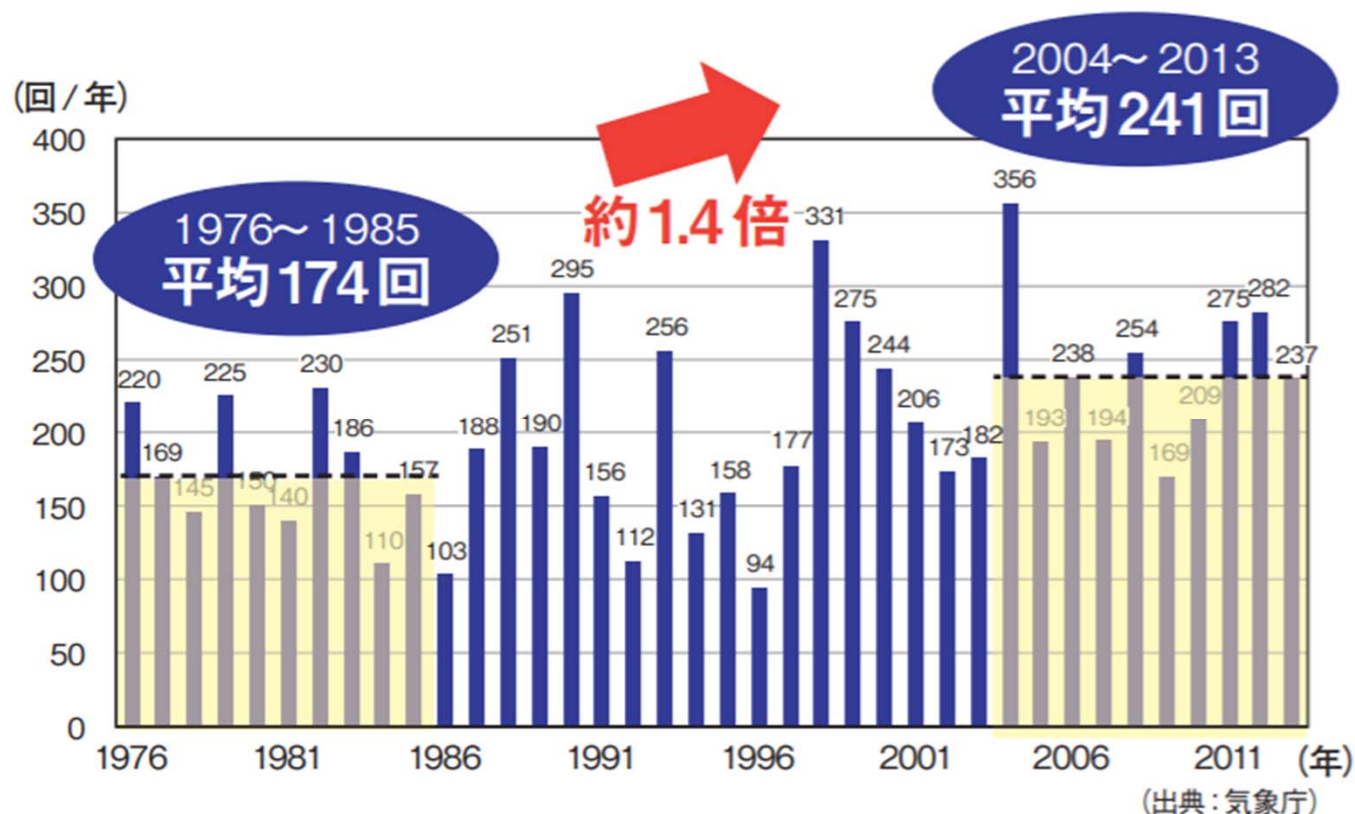
事前通行規制区間数・延長の推移（直轄国道）\*

\*国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015.

# 事前通行規制の変遷

## 事前通行規制制度の歴史\*

- 近年の気象条件の変化に伴い、事前通行規制の考え方を高度化する必要性が生じる
- ✓ 「短時間集中豪雨といわれる時間 50mm を上回る降雨が、最近 30 年間で 1.4 倍に増加している等、雨の降り方が局地化、集中化している。」\*



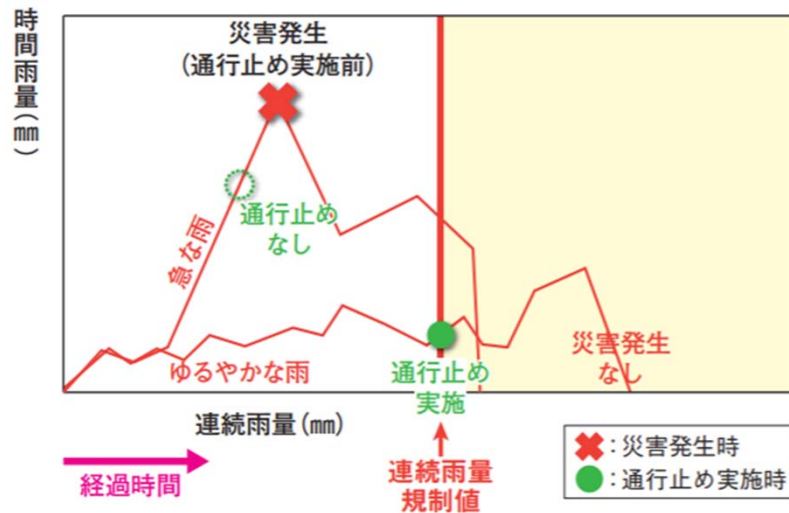
1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数 (アメダス 1,000 地点あたり) \*

\*国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015。

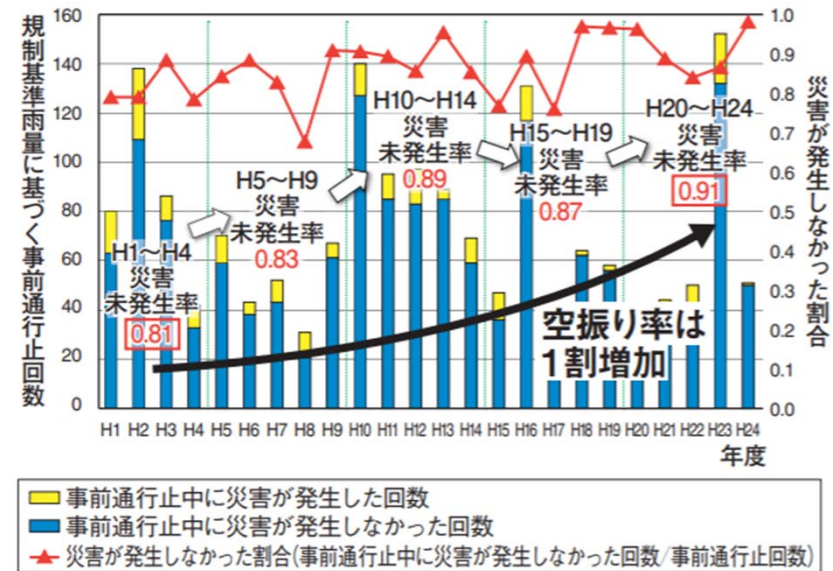
# 雨量規制基準の種類

## 区間ごとに定められた雨量の累積基準値により判断する連続雨量法

- 3時間 無降雨 (or 2 mm/h以下) が継続した場合に、累積をリセット
  - ✓ 単純な規制判断の一方、降雨強度を考慮できず、先行降雨の影響が見込まれない場合があるため「空振り」が増加する傾向がある



連続雨量法による規制の概念図\*



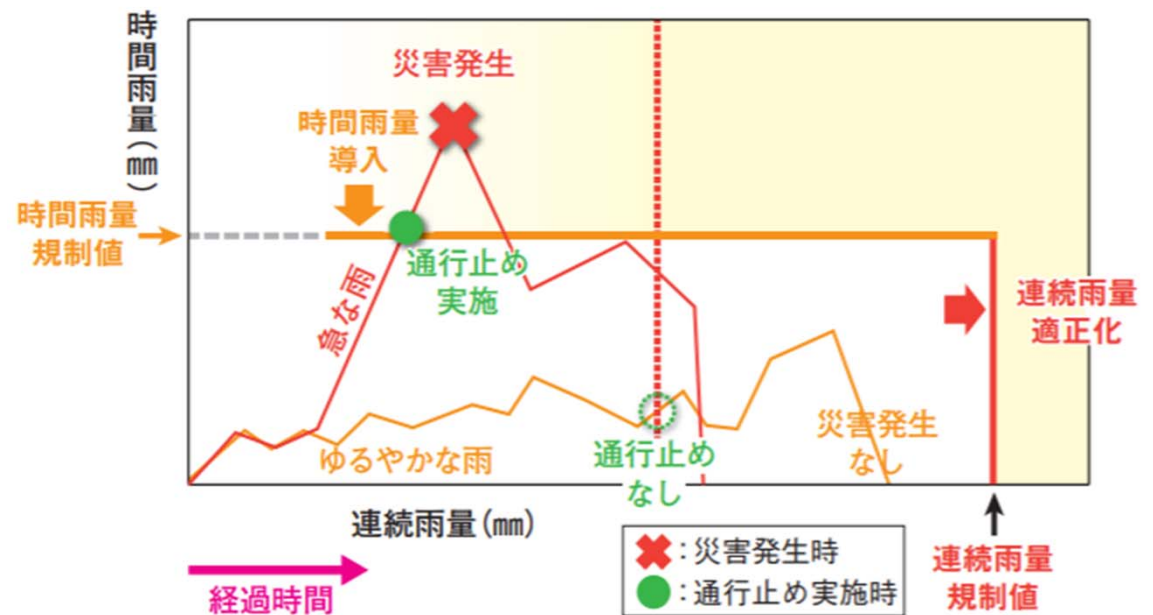
事前通行規制区間における空振り率の上昇 (直轄国道)\*

\*国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015.

# 雨量規制基準の種類

## 連続雨量及び時間雨量の併用法

- 規制のかけやすい高速道路に一般的に用いられている規制基準
- 連続雨量法では対応が難しい短時間の局所的・集中的豪雨への対応を、時間雨量により補う
- 迅速な通行止めができる道路等に対しては、導入が可能
  - ✓ 出入口が制限
  - ✓ 料金所に 24 時間人員が配置



連続雨量及び時間雨量の併用法による規制の概念図

\*国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015.

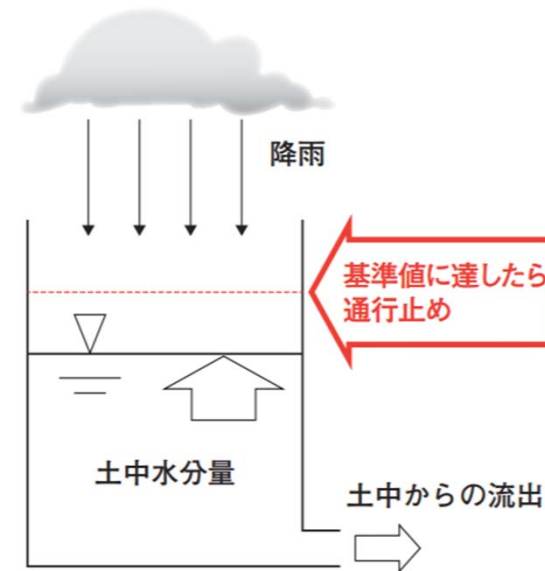
# 雨量規制基準の種類

## 雨量の累積により判断する連続雨量法

- JR等の鉄道で用いる規制基準の設定方法
  - ✓ 土壌中の水分量を近似的に表現\*\*
- 土中の水分量を基準値とする規制方法
  - ✓ 土砂災害のメカニズムと一定の合理性
  - ✓ 前述の方法と比較して、災害発生と雨量との関係を精度高く予測し規制できる方法
- データ構築と指標間の相関性が課題
  - ✓ 20年程度のデータを蓄積してモデルを構築
  - ✓ 降雨量、土中の水分量、災害発生との関係
  - ✓ 地形・地質等の状況により相関の判断が困難

$$R_w = \sum_j 0.5^{j/T} R_j$$

実効雨量の定義式 (矢野, 1990)



実効雨量法による規制の概念図\*

\*国交省 道路防災対策室：ゲリラ豪雨に対応した新しい事前通行規制の試行，道路行政セミナー，2015.

\*\* 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門：実効雨量について，<https://sip4dkit-web.bosai.go.jp/rain/effectiverainfall/> (2022/04/13)

## Appendix. 炬口地区における試行運用の補足

---

### 3. 警戒体制の社会実装；補足

- 炬口の試行ルールに関する注記

- 注1) (現行) 連続雨量基準と(試行運用) 気象庁の「大雨注意報」相当の土壌雨量指数基準以上のいずれか早いタイミングで発令する。
- 注2) 土砂災害警戒情報(気象庁)の洲本市「大雨注意報」の判断基準雨量(97mm)この時点より「気象予測業務」において、土壌雨量指数を算出し報告を行う。
- 注3) (現行) 連続雨量基準と(試行運用) 土砂災害発生危険基準線 (CL)を上回る予測の3時間前のいずれか早いタイミングで発令する。
- 注4) (現行) 連続雨量基準と(試行運用) 土砂災害発生危険基準線 (CL)を上回る予測の2時間前のいずれか早いタイミングで発令する。
- 注5) (現行) 連続雨量基準と(試行運用) 土砂災害発生危険基準線 (CL)の、いずれかを上回った場合に発令する。
- 注6) (現行) 連続雨量基準と(試行運用) 土砂災害発生危険基準線 (CL)の、双方が下回った場合に解除する。
- 注7) 3時間降雨予測で土砂災害発生危険基準線 (CL)を上回らない場合に解除するが、気象庁の「大雨注意報」相当の土壌雨量指数基準以上の場合、またはその後の3時間降雨予測で大雨警報基準値 (CL)を上回る場合は、再度、「注意」または「注意強化」体制に入る。

## Appendix. 連続雨量法による規制の限界

---



## 積算雨量による交通規制の限界

- 京都市域において平成27年以降、通行止となった大規模災害のうち、道路斜面の山側斜面で発生し、被災時間が判明しているものを抽出した事例群
  - 全ての事例で雨量による規制降雨量（160mm）以下で通行不可能な災害が発生
  - 全ての事例でクリティカルラインの内側で発生した、いわゆる見逃しのケース
  - 京都府域の自然斜面では土砂災害が発生した土壌雨量指数が把握されている
- 警報基準の土壌雨量指数で判断していれば事前に通行止めができた
  - 正確には3時間前に警報基準を土壌雨量指数が超過すると予測されていれば、その予測に基づき通行止めは可能だった
  - ただ、その警報基準を超過しても、必ずしも土砂災害が発生するわけではない

# 連続雨量法による規制の限界

PJメンバー 大西 功氏作成資料より抜粋

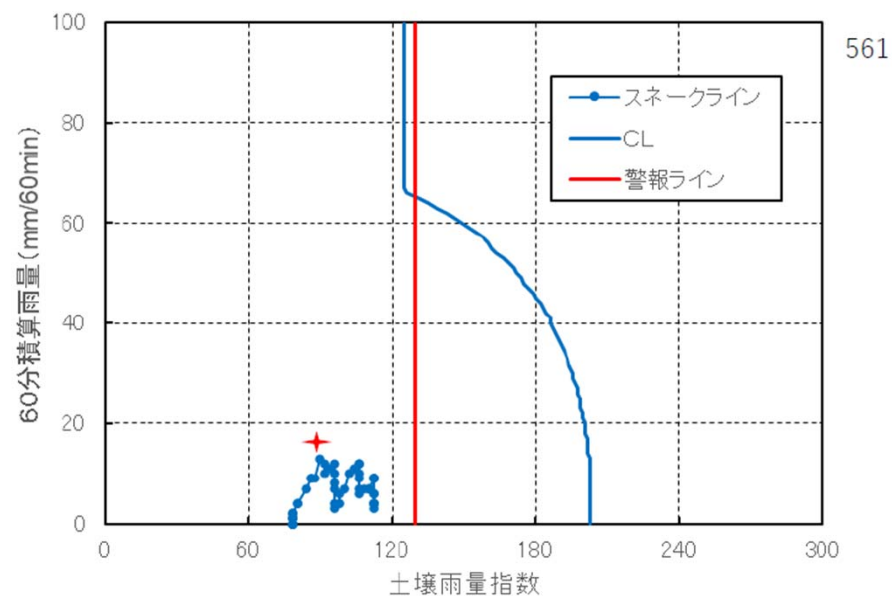
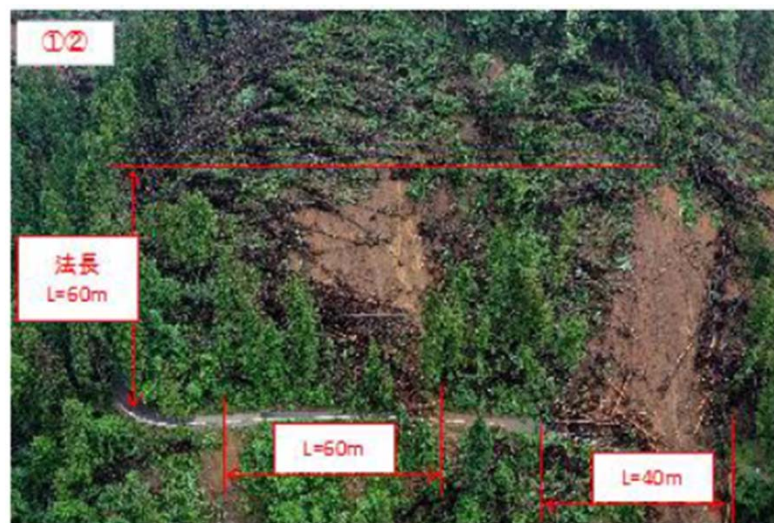
## 積算雨量による交通規制の限界

52355661

r02-6  
7月6日14時45分  
時間雨量  
土壌雨量指数  
積算降雨量

| 2020/07/06<br>08:00 | 2020/07/06<br>09:00 | 2020/07/06<br>10:00 | 2020/07/06<br>11:00 | 2020/07/06<br>12:00 | 2020/07/06<br>13:00 | 2020/07/06<br>14:00 | 2020/07/06<br>15:00 | 2020/07/06<br>16:00 | 2020/07/06<br>17:00 | CP  |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----|
| 0                   | 1                   | 9                   | 11                  | 3                   | 12                  | 7                   | 9                   | 4                   | 8                   | 99  |
| 78                  | 78                  | 86                  | 94                  | 96                  | 106                 | 108                 | 112                 | 112                 | 116                 | KP  |
|                     | 1                   | 10                  | 21                  | 24                  | 36                  | 43                  | 52                  | 56                  | 64                  | 130 |

### 府道上黒田貴船線



# 連続雨量法による規制の限界

PJメンバー 大西 功氏作成資料より抜粋

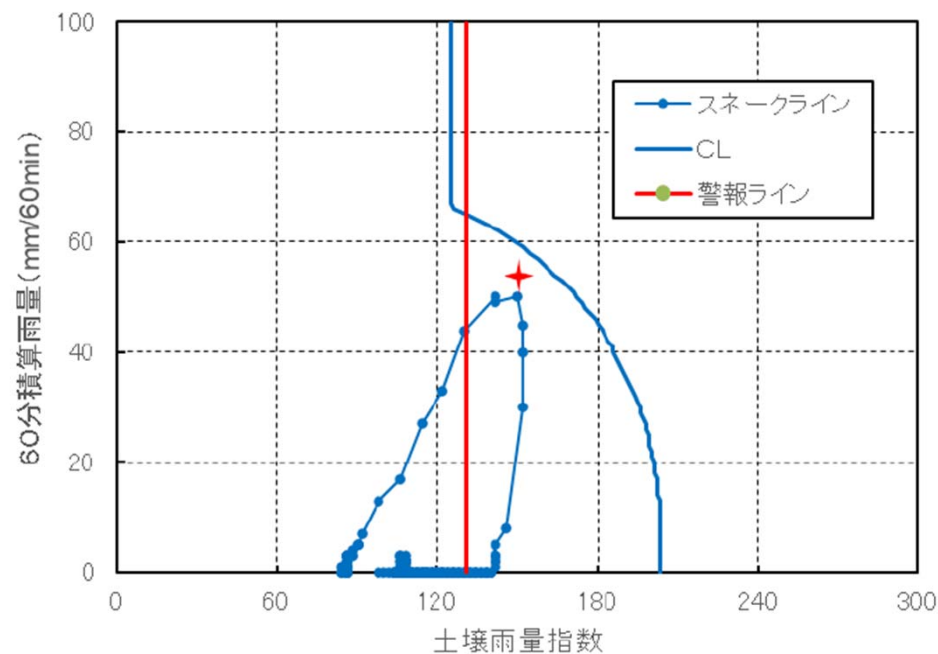
## 積算雨量による交通規制の限界

| 52354574 |        | 2020/07/08<br>00:00 | 2020/07/08<br>01:00 | 2020/07/08<br>02:00 | 2020/07/08<br>03:00 | 2020/07/08<br>04:00 | 2020/07/08<br>05:00 | 2020/07/08<br>06:00 | 2020/07/08<br>07:00 | 2020/07/08<br>08:00 | 2020/07/08<br>09:00 | 2020/07/08<br>10:00 | CP  |
|----------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----|
| r2-1     | 時間雨量   | 0                   | 3                   | 0                   | 3                   | 7                   | 50                  | 8                   | 2                   | 0                   | 0                   | 0                   | 100 |
| 7月8日6時   | 土壌雨量指数 | 84                  | 86                  | 86                  | 86                  | 92                  | 142                 | 146                 | 142                 | 138                 | 132                 | 128                 | KP  |
|          | 積算降雨量  |                     | 3                   | 3                   | 6                   | 13                  | 63                  | 71                  | 73                  | 73                  | 73                  | 73                  | 131 |

国道162号



通行規制基準  
200mm



574