

# 降雨特性に応じた道路通行規制のあり方に関する研究

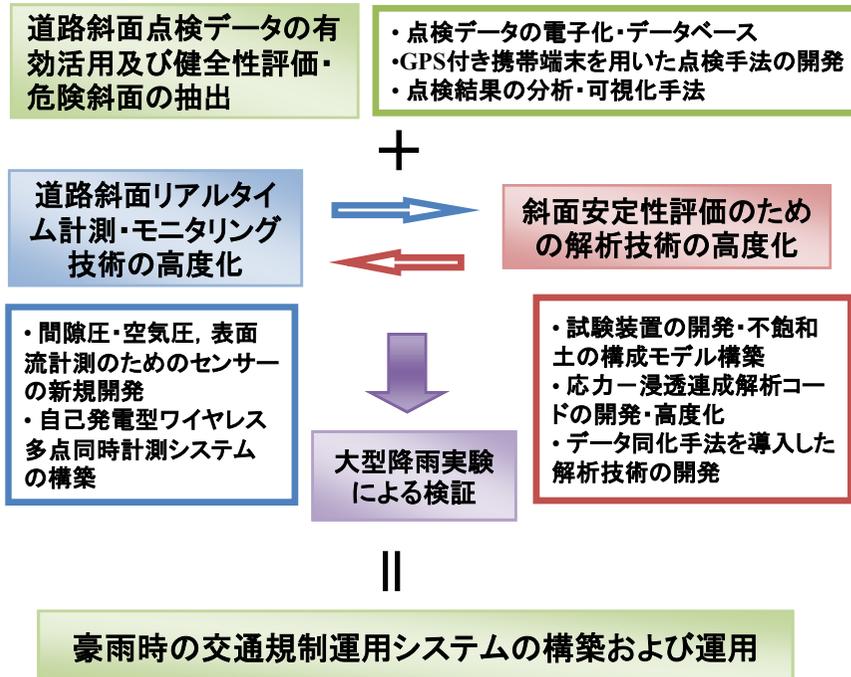
プロジェクトリーダー 小山倫史 関西大学・准教授

## ■ 研究の背景・目的

豪雨時における国道を対象とした道路通行規制の発令には、**事前通行規制区間**において**連続した時間雨量の累積を基準**としているため、**降雨特性に対応したきめ細やかな事前通行規制**ができないのが現状である。道路斜面は**多種多様な地形、地質構造、土質・岩質、地下水**を有しており、斜面への**豪雨時の雨水浸透・崩壊メカニズム**を考慮することなく、**降雨量の情報のみで、斜面安定性・崩壊危険度の評価・予測は困難**であり、**交通規制を発令することは可能であっても、降雨終了後の交通規制の解除を行うことはできない**。そこで、**降雨特性(降雨強度・降雨波形など)**や斜面の**地形・地質**などに応じた、「**きめ細やかで安全かつ最小限の事前通行規制**」を行うため、降雨特性と斜面安定性の関係を整理・分析・評価するなど、**降雨特性に応じた道路通行規制(発令から解除まで)**に関する研究を行う。

## ■ 研究の内容 ①

安定度調査表に基づいた**道路斜面点検データの有効活用**(点検記録の電子化を含めて)による**健全性評価および危険斜面の抽出**し、崩壊危険度の高い道路斜面に対して、**現場計測・モニタリング**(正確な斜面の現況把握)、**高精度な降雨観測情報(Xバンドレーダーによる高精度な降雨外力の把握)**および**数値解析(斜面安定性評価)**を組み合わせた統合的な**道路斜面の崩壊・危険度予測**を行うことで、**豪雨時の交通規制運用システム(規制発令から解除まで)**を構築する。



# 降雨特性に応じた道路通行規制のあり方に関する研究 (研究内容・スケジュール・研究体制)

## ■ 研究の内容 ②

具体的には、以下の項目について詳細な検討を行う。

- 交通規制等に関する雨量基準の事例(道路管理者、鉄道管理者など)の整理
- 斜面安定度調査表に基づいた斜面点検データの分析および危険斜面の抽出
- 過去の降雨特性と通行規制(斜面崩壊を含む)のデータ整理および分析
- 降雨特性と斜面安定度の検討(室内実験, 大型降雨実験, 数値解析による)
- 降雨特性(降雨強度・降雨波形)に応じた通行規制のあり方の検討
- 雨量通行規制運用システムの構築・試行運用および改善点の検討

	H25	H26	H27
雨量通行規制に関する事例の整理			
斜面点検データの分析・危険斜面の抽出			
降雨特性・通行規制のデータ整理			
降雨特性と斜面安定度の検討			
降雨特性に応じた通行規制の在り方の検討			
雨量通行規制運用システムの構築および試行運用			

## ■ 研究期間

平成25年度～平成27年度

## ■ 参加予定メンバー(体制)

地盤材料の要素試験, 現場計測・モニタリング, 数値解析を専門とする若手研究者・実務者を中心に構成された産・官・学連携かつ横断的なグループで研究開発にあたる。

顧問 沖村 孝 神戸大学名誉教授((一財)建設工学研究所)

学 関西大学, 京都大学, 大阪大学, 立命館大学, 岡山大学, 鹿児島大学, 横浜国立大学 + 追加メンバー検討中

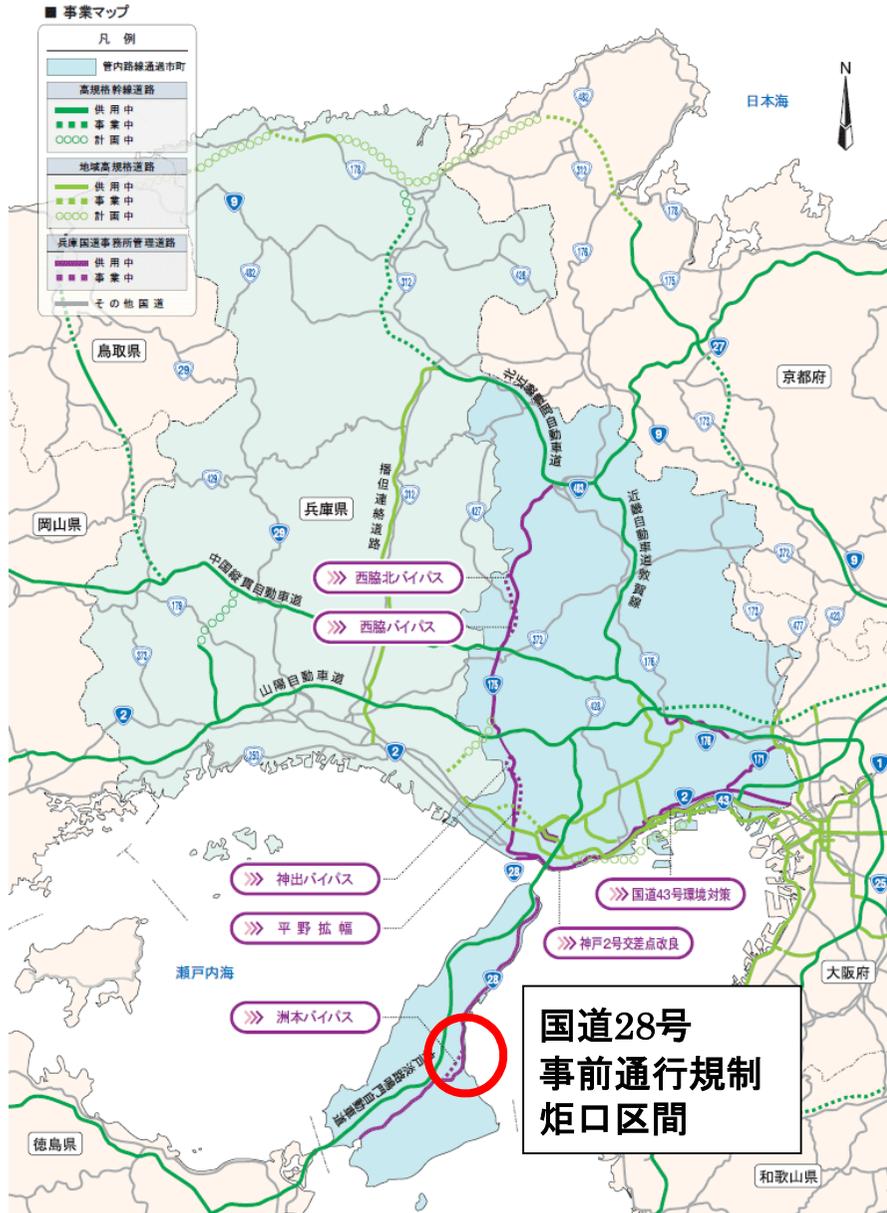
産 (株)建設技術研究所, (株)日本工営, (株)アーステック東洋, 計測技研(株), 水文技術コンサルタント(株), 日鐵住金建材, 環境総合テクノス + 追加メンバー検討中

官 国土交通省近畿地方整備局(近畿技術事務所, 兵庫国道事務所), 防災科学技術研究所

# 主な研究成果

- **自己組織化マップ(SOM)**を用いて、**安定度調査表**を分析し、**崩壊危険斜面を抽出する方法**を提示し、危険斜面に共通する特徴を抽出した。
- 斜面現場において、**土壌水分**、**地下水位**、**間隙水圧の計測・モニタリング**を実施し、降雨に対する応答および雨水浸透挙動について調べた。
- 数値シミュレーションを用いて、過去10年間の降雨について斜面安定計算を実施し、安全率と実効雨量の関係について調べ、「**半減期106時間**、**実効雨量290mm**」という**雨量通行規制の発令・解除基準**を提案した。
- 現場計測データを用いて解析モデル(**タンクモデル**)におけるパラメータを**データ同化**する(計測データと解析のマッチング)ことで、当該斜面におけるタンクモデルを構築し、斜面内の水収支および土壌雨量指数の検討を行った。

# 対象区間：国道28号線「炬口区間」



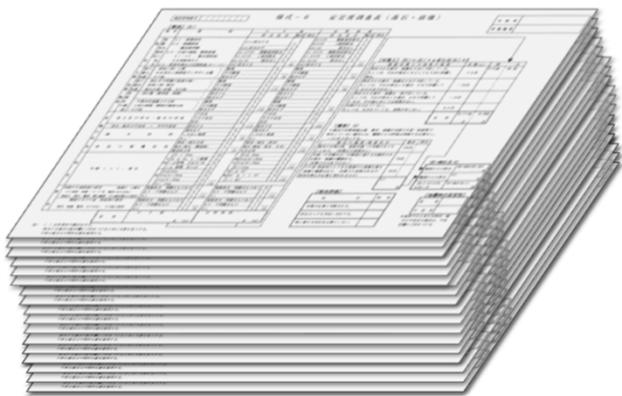
路線	規制区間	延長 (km)	規制条件(通行止)	
			気象等基準値	気象等観測所
176号	西宮市塩瀬町名塩 ～ 西宮市塩瀬町生瀬	2.4	連続降雨量 160mm	名塩テレメータ
28号	① 兵庫県淡路市塩尾 ～ 洲本市安乎町平安浦	1.8	連続降雨量 160mm	塩尾テレメータ
	② 洲本市中川原町厚浜 ～ 洲本市炬口	2.9	連続降雨量 160mm	炬口テレメータ



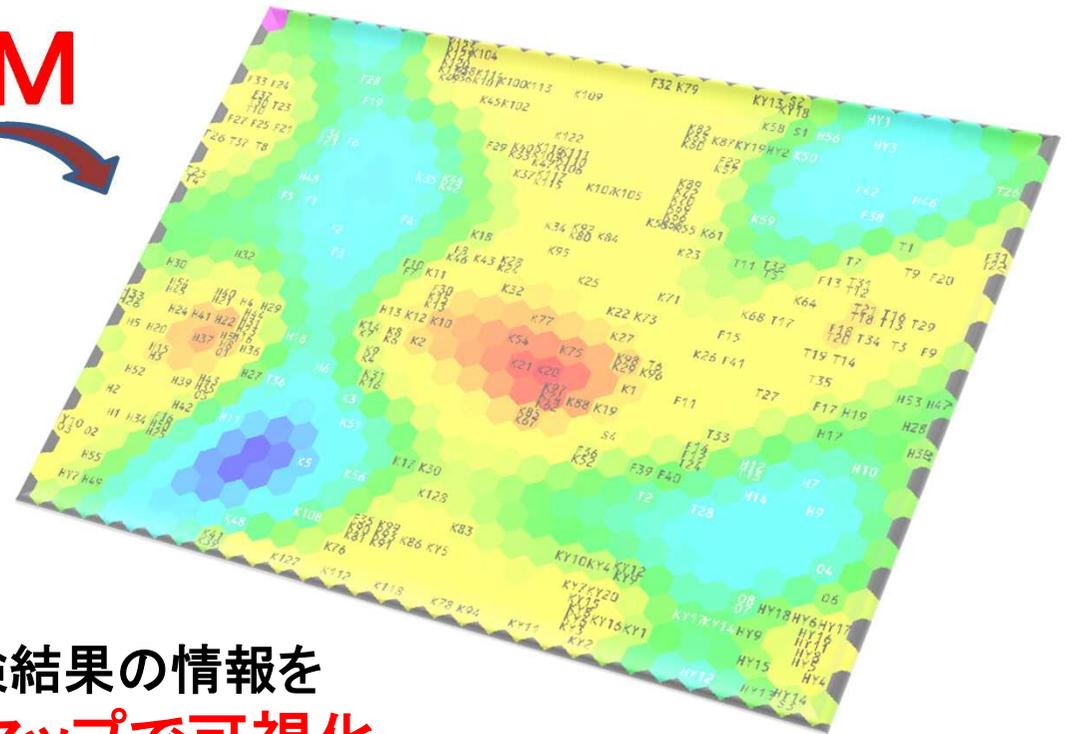
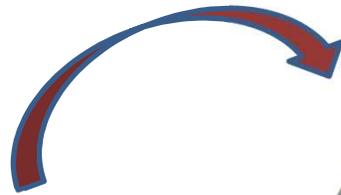
# SOMを用いた道路のり面のクラスタリング

安定度調査表

膨大な数の点検結果



SOM



全点検結果の情報を  
1枚のマップで可視化

- のり面ごとに作成
- 地質調査の専門家によって作成
- 点検項目ごとに重みづけ
- のり面の健全度を得点で表示

- のり面の特徴ごとに分類
- 全のり面の情報を1枚のマップで可視化
- 各点検項目の寄与度がわかる  
⇒ “点検項目の見直し”
- 道路管理者が各種意思決定に利用

# 使用データ

国土交通省近畿地方整備局，兵庫国道事務所

安定度調査表

国道28号線

「落石・崩壊」を点検対象とする斜面の点検結果

- 平成8年度の安定度調査表
- 平成19年度の安定度調査表

計 30箇所

健全性(危険度)の基準 (過去の崩壊箇所 全4箇所)

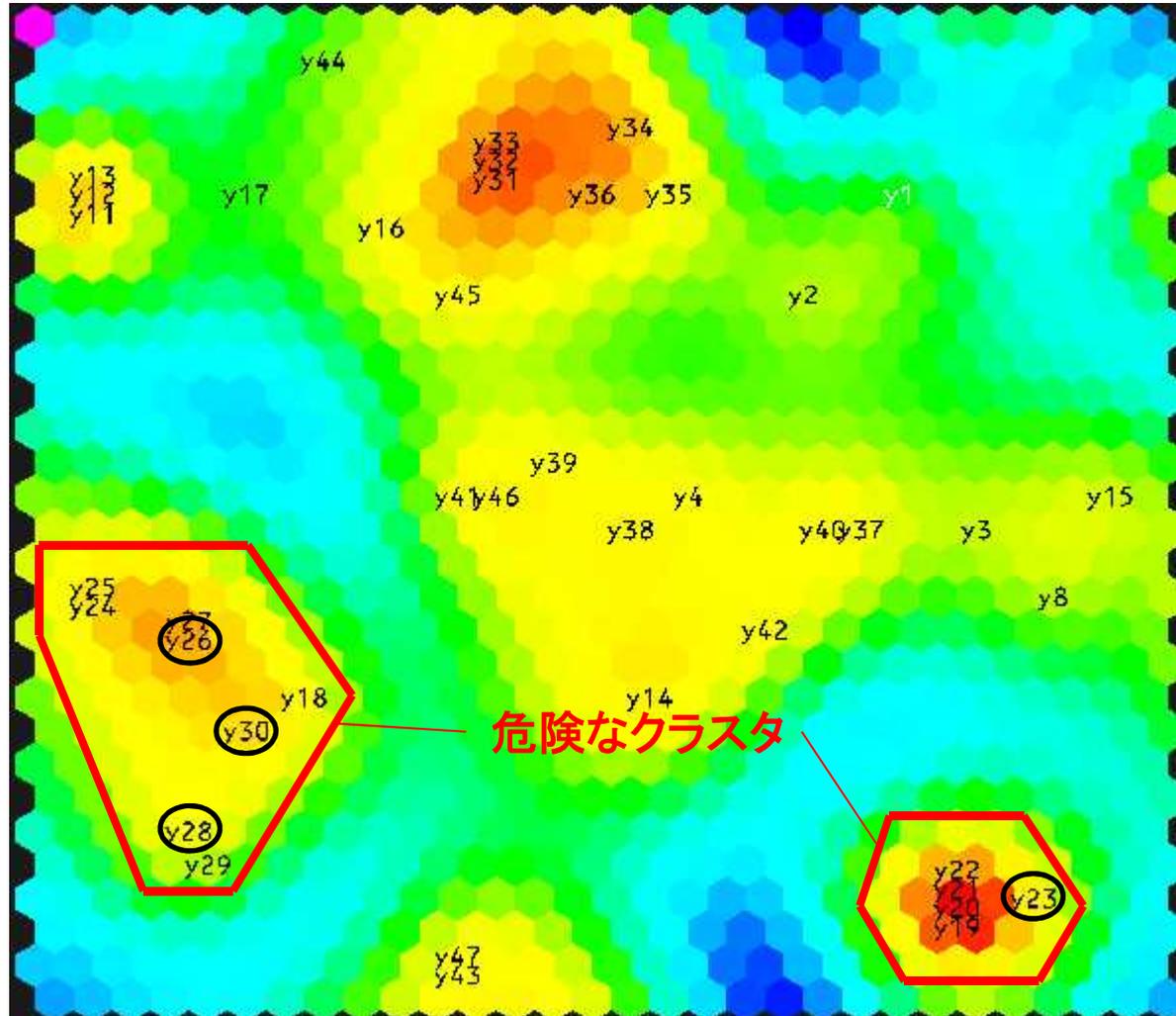
過去の崩壊箇所	距離標(kp)	原因
S028A023	41.2	昭和49年の台風8号
S028A028	41.95	平成16年の台風23号
S028A034	42.8	同上
S028A040	43.3	同上

# 全体マップ(斜面)

SOMマップ凡例

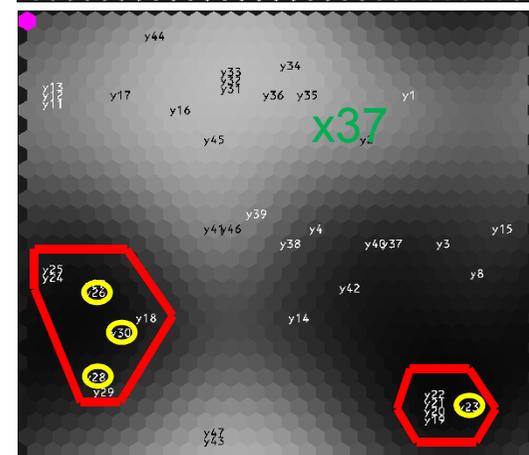
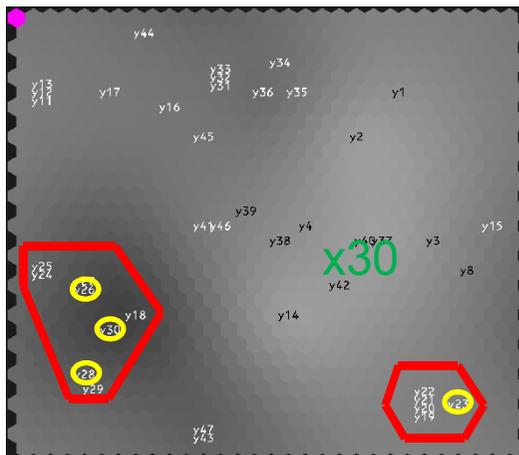
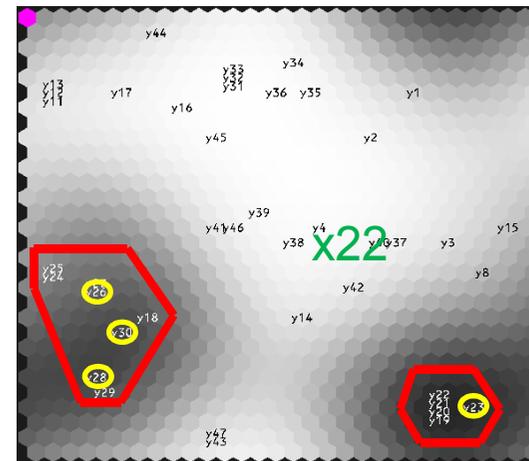
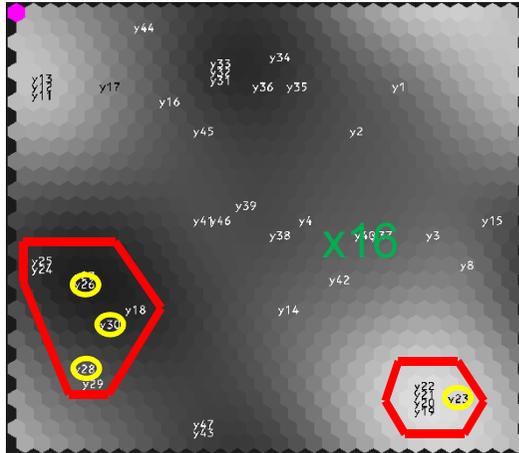


←低い 類似性 高い→



- 危険なクラスタに分類されたのり面  
y18(S028A006)  
y19(S028A010)  
y20(S028A011)  
y21(S028A014)  
y22(S028A015)  
y24(S028A024)  
y25(S028A025)  
y27(S028A033)  
y29(S028A039)

# 要素マップ(斜面)



## 危険なクラスタ

**X16: 崖錐地形** (■ 該当する, □ 該当せず)

**X22: 崩壊性の構造** (不透水性基盤上の土砂上部が硬質・脚部が脆弱な岩など)

(■ 顕著, □ 該当せず)

**X30: 隣接するのり面・斜面等の変状** (■ 複数該当, □ なし)

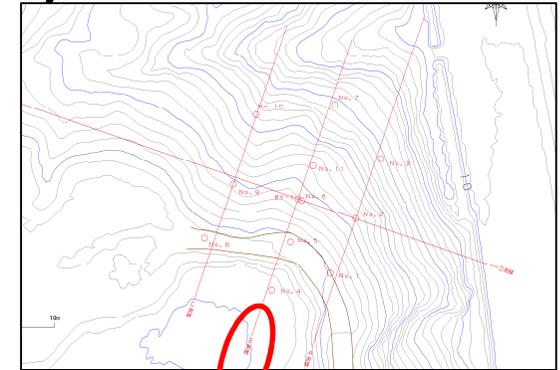
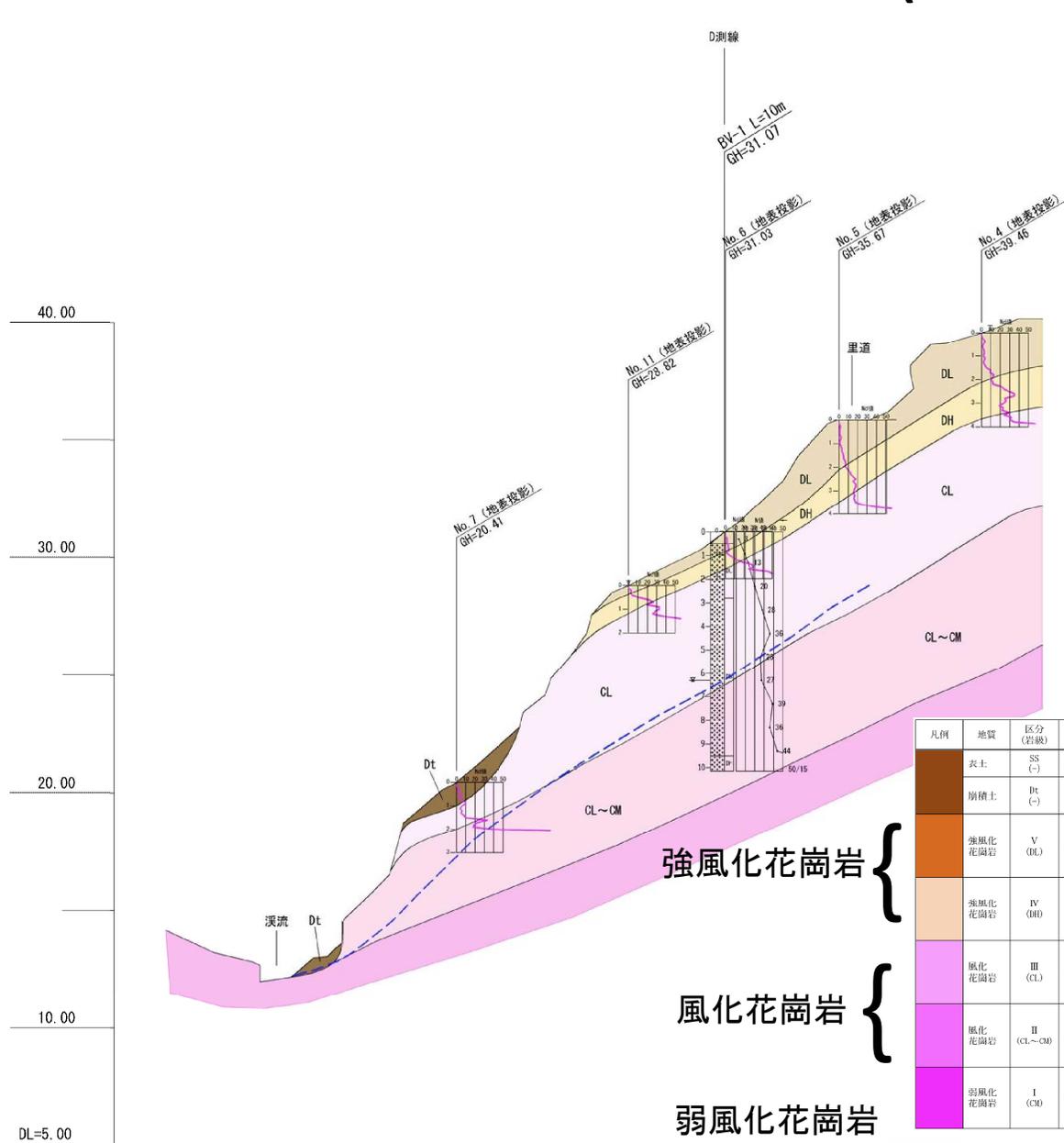
**X37: 地質区分** (■ 中・古生層, □ 段丘堆積物, 洪積層)

# モデル調査斜面の選定



1. 検討結果から危険箇所と判断されている。
2. 近年の被災履歴から、**20年以内に5回程度出水や土砂流出が確認され、対象箇所の周辺は崩壊箇所**となっている。
3. 流域面積が、河川部を除き、最も大きい溪流の流末に位置する。
4. 地層概要として、**上層から表層は強風化花崗岩および花崗岩**からなると想定され、**層構成および層厚は概ね区間内で類似している(代表的な斜面)**と判断できる。

# 土質調査結果(B測線)



B測線

## 凡例

凡例	地質	区分(岩級)	N値	Nd値	特徴	想定される崩壊タイプ
	表土	SS (-)	白沈	白沈	黒色土壌、腐植土。	表層崩壊 凹陥すべり
	崩積土	Dt (-)	6未満相当	10未満相当	黄褐色~黒色が偏状、二次堆積したマサ~原位置風化物と認定できないマサ、ルーズな砂質土状。	
	強風化花崗岩	V (DL)	10~20相当	12未満相当	黄褐色マサ状強風化部、岩組織を認定できない(部分的には岩組織を認識できる場合もある)。指圧で容易に崩れる。	小規模な岩盤崩落
	強風化花崗岩	IV (DH)	30~50相当	50以上	黄褐色マサ状強風化部、岩組織を認定できる。ハンマーで容易に崩れる。	
	風化花崗岩	III (CL)	30~50相当	反発	黄褐色~黄灰色コアストーンをのぞいたマトリクス部は、Vと同様であるが、硬質部を脱すコアストーンが認識可能なもの。ボリングコアの大部分で岩組織は残留している。節理が発達し、節理沿いのコアは砂状を示す。	
	風化花崗岩	II (CL~CM)	50以上相当(節理谷いは局所的に20~40相当)	75以上相当	黄灰色を主体とし、岩盤露頭として認識できる。一部節理が発達し、節理沿いのコアは礫状~砂状を示す。	-
	弱風化花崗岩	I (CO)	反発	反発	暗灰色深床付近に露頭する。新鮮岩。亀裂沿いも含めて風化は認められない。	-

強風化花崗岩

風化花崗岩

弱風化花崗岩

# 土質調査結果



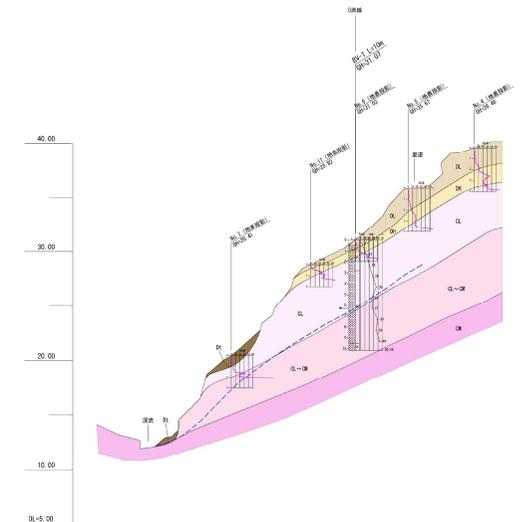
表土  
湿潤である

強風化花崗岩  
指圧で容易に崩せる。

強風化花崗岩  
ハンマーで容易に削れる。

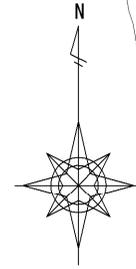
崩積土  
写真では表層を覆う  
崖錐堆積物

凡例	地質	区分 (岩種)	N値	γ <sub>d</sub> 値	特徴	想定される崩壊タイプ
	表土	SS (-)	自硬	自硬	黒色土層、 粘層土。	
	崩積土	Dt (-)	6未満相当	10未満相当	表層色～黒色が主体、 二次堆積したマサ～原位置風化物と認定できないマサ、 ルーズな砂質土状。	表層崩壊 円弧すべり
	強風化 花崗岩	V (DL)	10～20相当	12未満相当	表層色 マサ状強風化部、岩組織を認定できない(部分的には岩組織を認識できる場合もある)。 指圧で容易に崩せる。	
	強風化 花崗岩	IV (DL)	30～50相当	50以上	表層色 マサ状強風化部、 岩組織を認定できる。 ハンマーで容易に削れる。	
	風化 花崗岩	III (CL)	30～50相当	反発	表層色～黄灰色 コアストーンをのぞいたマトリクス部は、Vと同様であるが、硬質部を残すコアストーンが認識可能なもの、 ポリングコアの大部分で岩組織は残存している。 節理が発達し、節理面は粗面を呈する。	小規模な岩盤崩落
	風化 花崗岩	II (CL～CH)	50以上相当 (節理面は 局部的に20～ 40相当)	75以上相当	黄灰色を主体とし、岩盤露頭として認識できる。 一部節理が発達し、節理面は粗面を呈する。	-
	弱風化 花崗岩	I (CH)	反発	反発	黄灰色 塊状構造に露頭する。 節理が、亀裂面も含めて風化は認められない。	-



\* 撮影の前日に降雨あり。

# 計測機器設置位置



水位計 ... 1箇所(ボーリング箇所)

土壌水分計...解析対象断面  
の最下流部に設置

テンシオメータ...

①B測線(解析対象断面)

②C測線

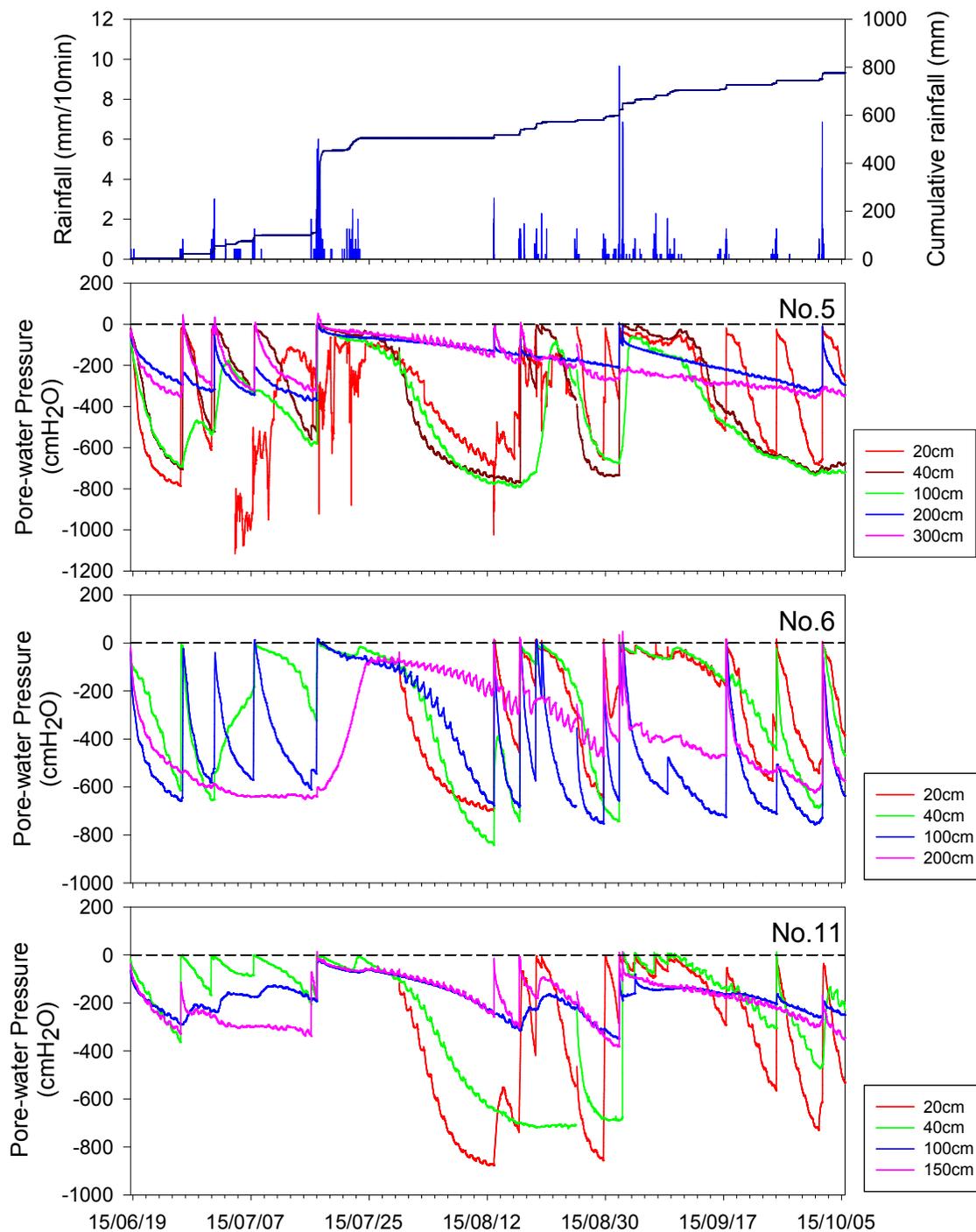
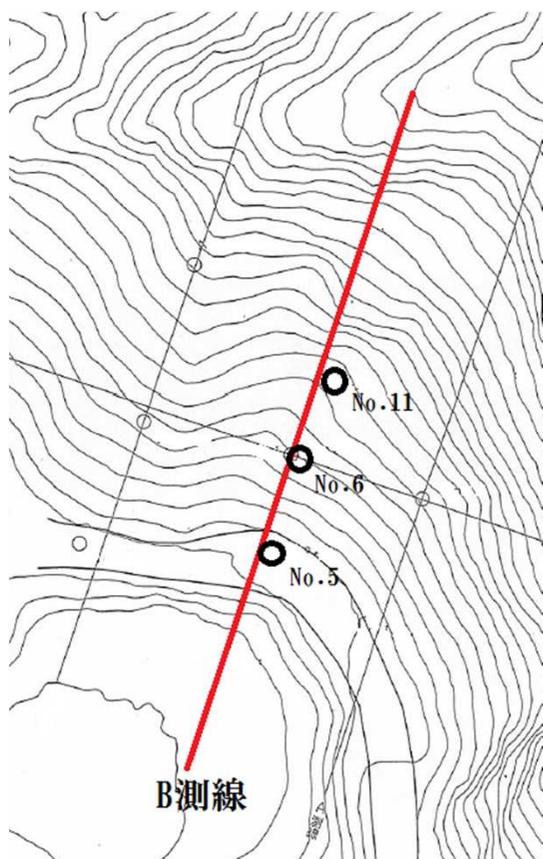
各箇所において深度方向に  
複数箇所センサを設置

調査位置図

S=1:200

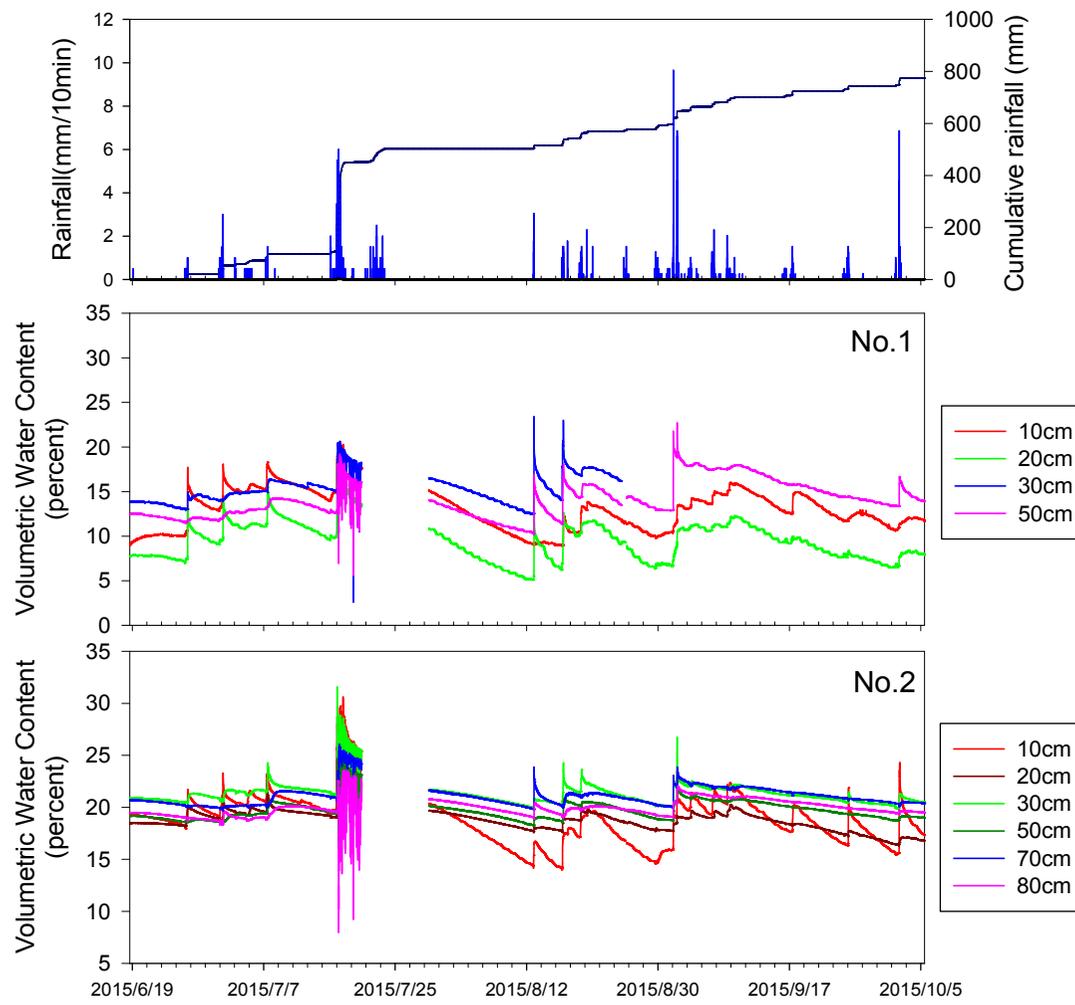
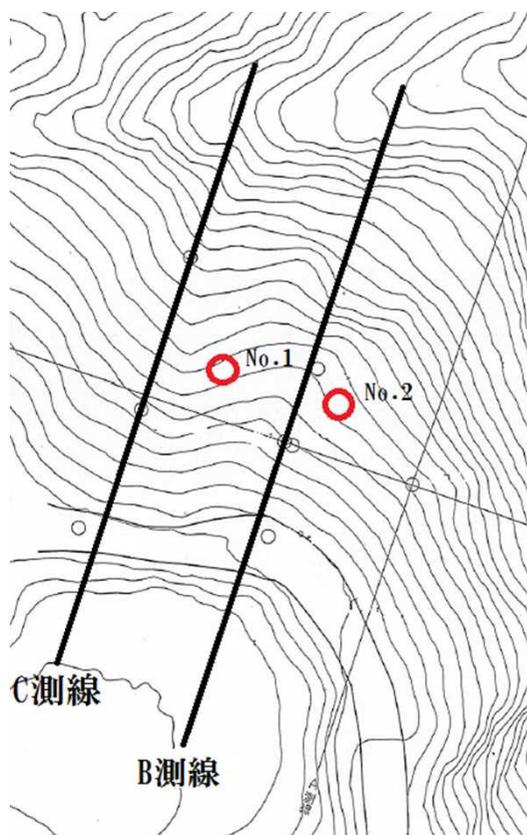
# 間隙水圧の変動(全期間) B測線

- 観測期間: 6/18 12:00 ~ 10/5 12:00
- 総降雨量: 847mm
- 降雨ピーク: 33.5mm/h



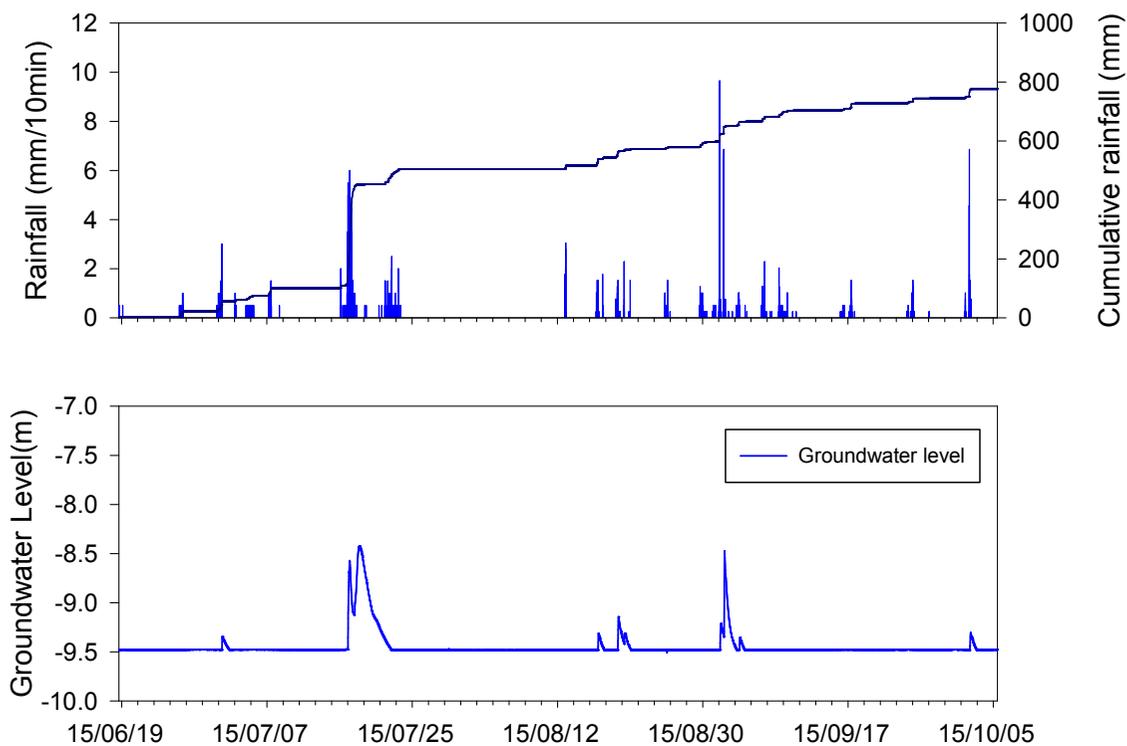
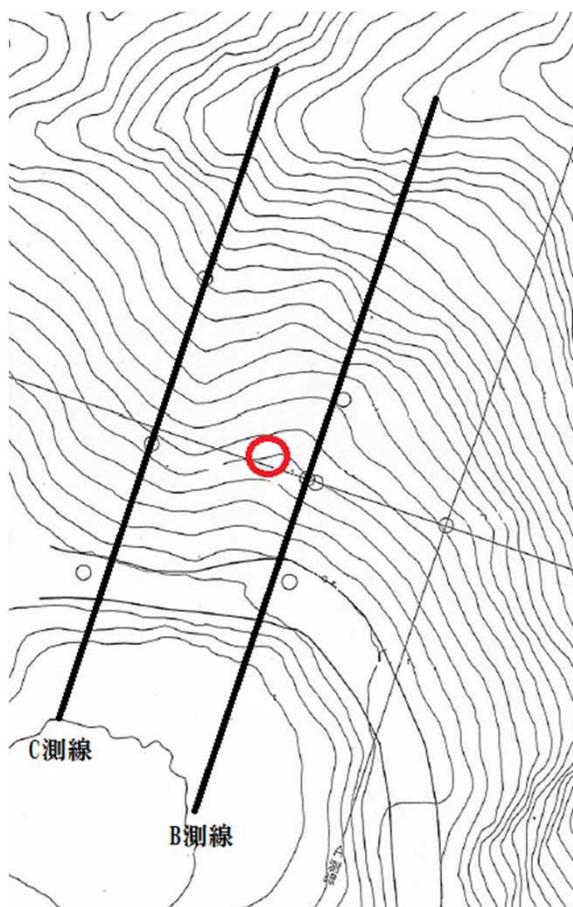
# 体積含水率の変動(全期間)

- ・観測期間: 6/18 12:00 ~ 10/5 12:00
- ・総降雨量: 847mm
- ・降雨ピーク: 33.5mm/h



# 地下水水位の変動(全期間)

- ・観測期間: 6/18 12:00 ~ 10/5 12:00
- ・総降雨量: 847mm
- ・水位ピーク: -8.4m



# 飽和・不飽和浸透流解析＋円弧すべり計算

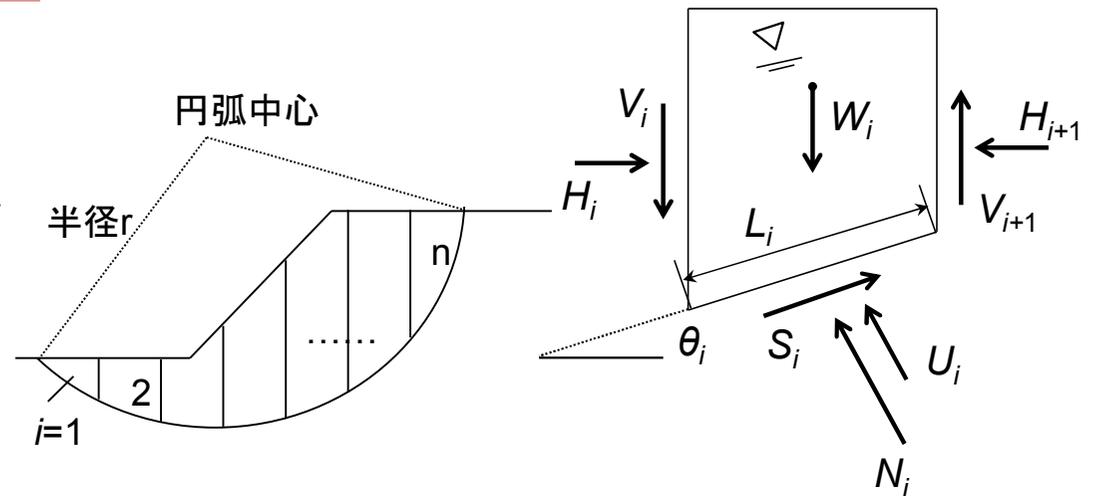
## 支配方程式

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ K_r(\theta) K_{ij}^s \frac{\partial \psi}{\partial x_j} \right\} - q = \{c(\psi) + \beta S_s\} \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad i, j=1, 2 \text{ (1:x, 2:y)}$$

$\theta$  : 体積含水率,  $\psi$  : 負の圧力水頭(マトリックサクション)  
 $q$  : 単位体積当たりのシンク/ソース流量,  $K_r$  : 相対透水係数  
 $K^s$  : 飽和透水係数,  $S_s$  : 比貯留係数,  $C(\psi)$  : 比水分容量  
 $\beta$  : 飽和領域=0, 不飽和領域=1

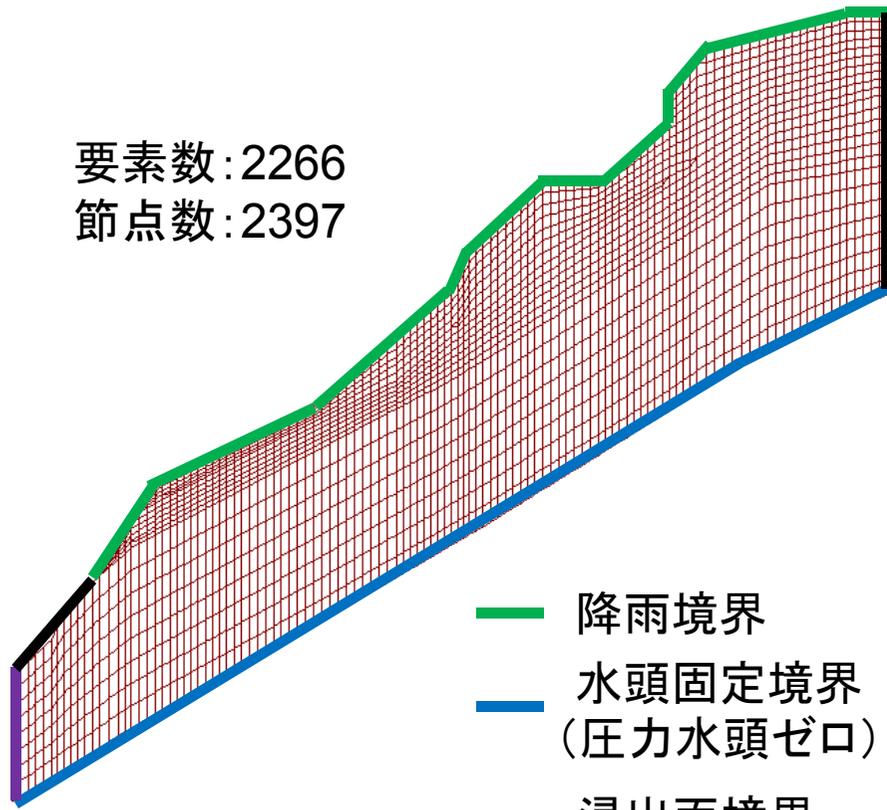
## 安全率の計算式: フェレニウス法

$$F_S = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i l_i + N_i \tan \varphi_i)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i}$$

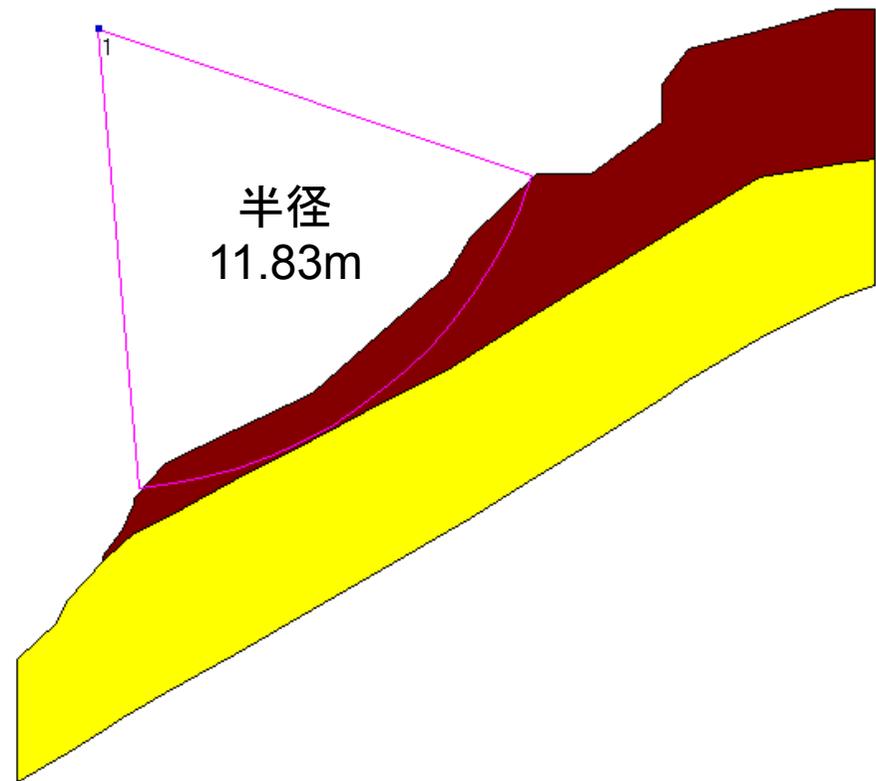


# 解析モデル

要素数:2266  
節点数:2397



- 降雨境界
- 水頭固定境界  
(圧力水頭ゼロ)
- 浸出面境界
- 不透水境界

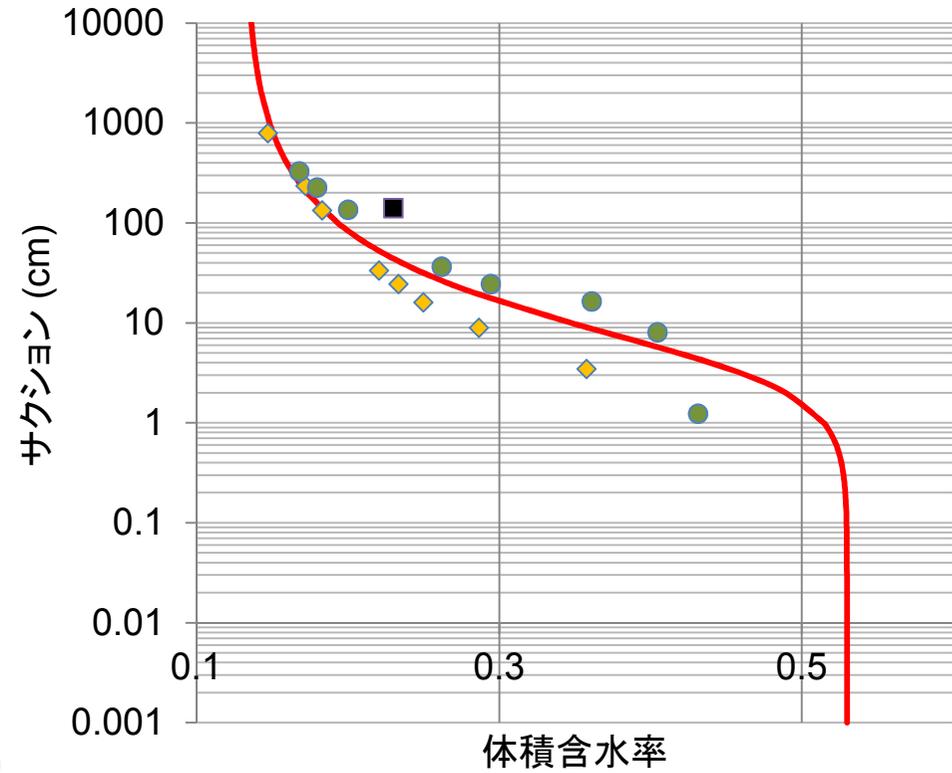
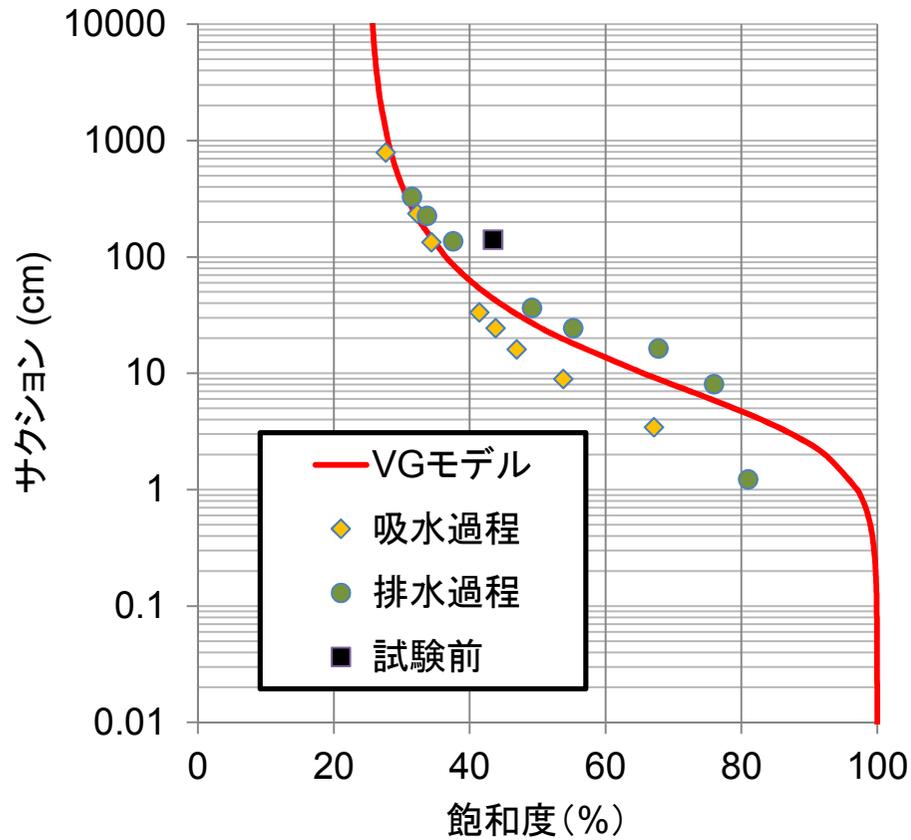


表層と岩盤層の境界付近にすべり面を想定

- 表層及びその下の岩盤一層のみをモデル化(表層崩壊のみを対象としているため)

# 保水性試験

## 結果

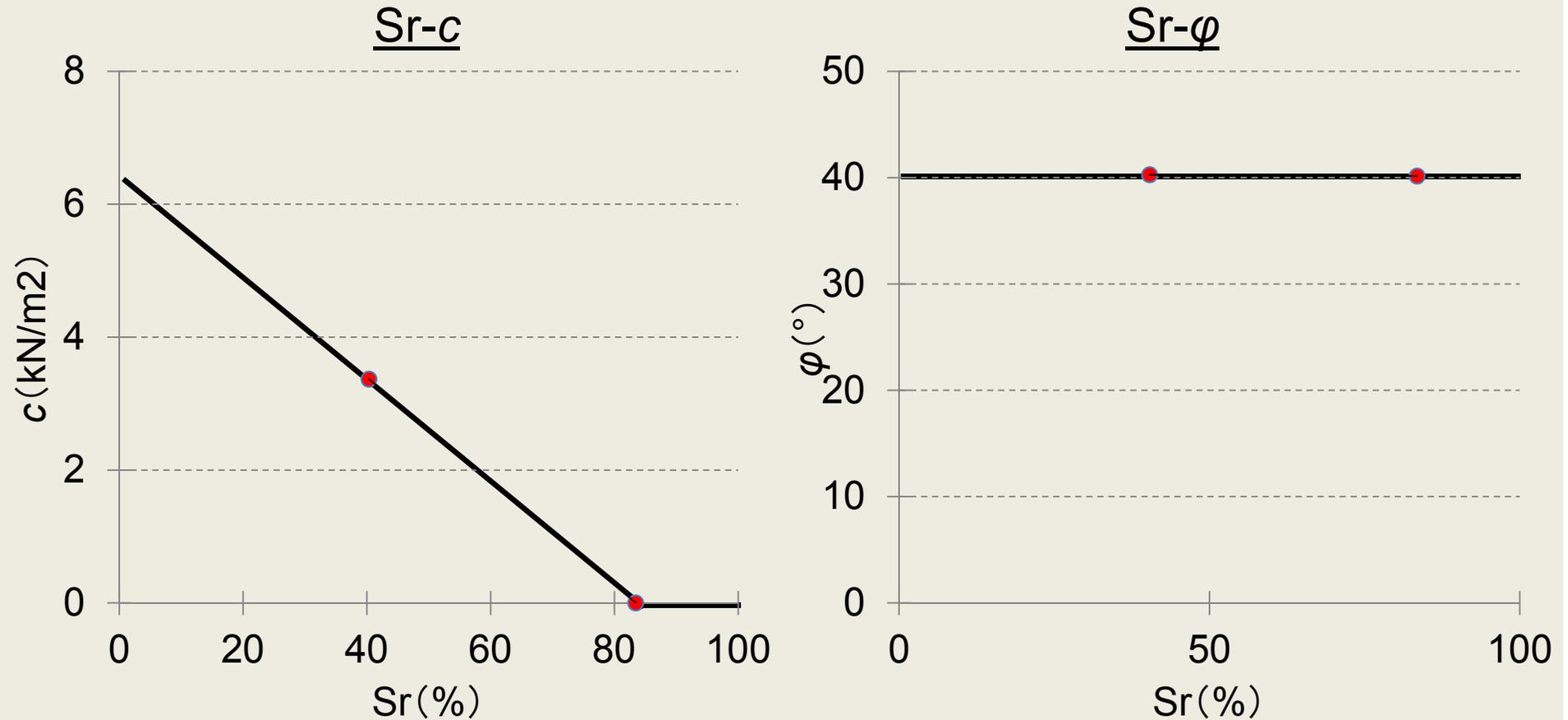


➤ 吸水過程と排水過程の間を通るようにVGモデルによりフィッティング

→ 降雨中だけでなく降雨終了後も解析を継続するため

## 各層の物性値

### 表土の強度定数



➤ 表土の強度定数については、一面せん断試験を行い、飽和度依存性を考慮

## 実効雨量とは

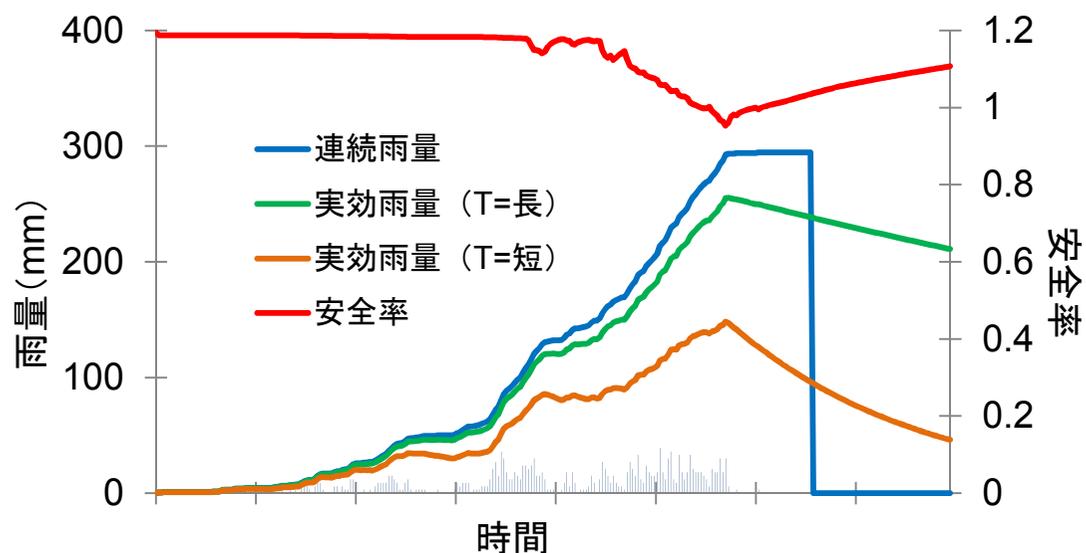
これまでに降った雨や現在降った雨が、地中にどの程度残存しているかを便宜的に示した値

### 計算式

$$R_G = R_0 + \alpha^1 R_1 + \alpha^2 R_2 + \dots + \alpha^n R_n$$

$R_G$ : 実効雨量 (mm),  $R_n$ :  $n$ 時間前の雨量 (mm)

$\alpha$ : 1時間単位の減少係数 ( $0 < \alpha < 1$ ) =  $(0.5)^{1/T}$ ,  $T$ : 半減期 (hour)

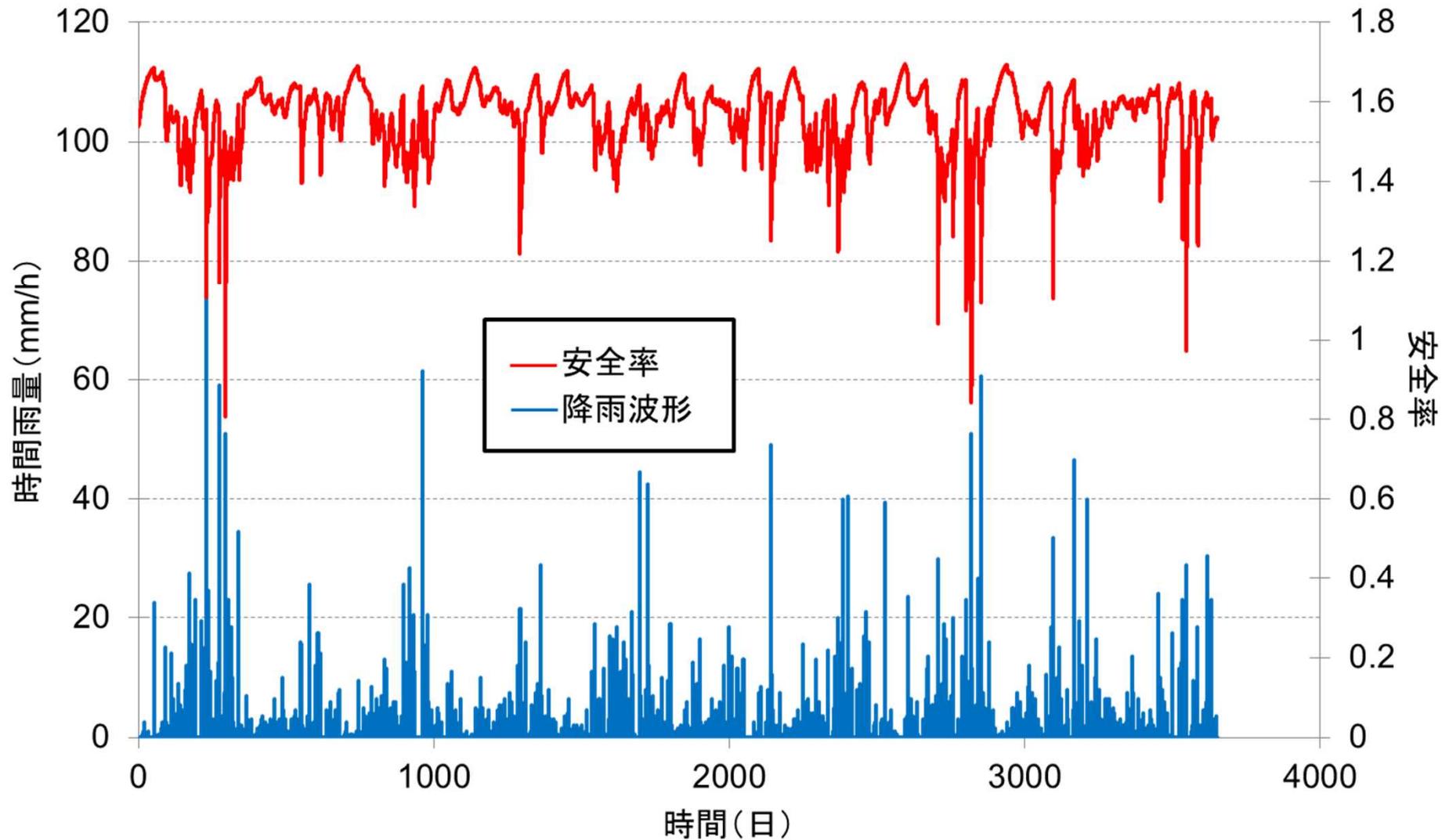


安全率の経時変化を実効雨量で表す

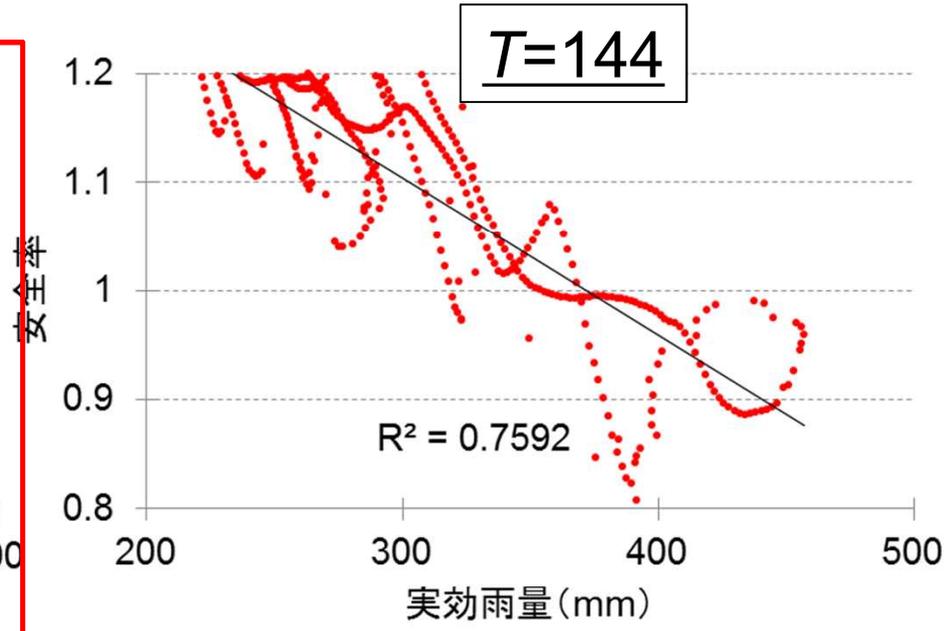
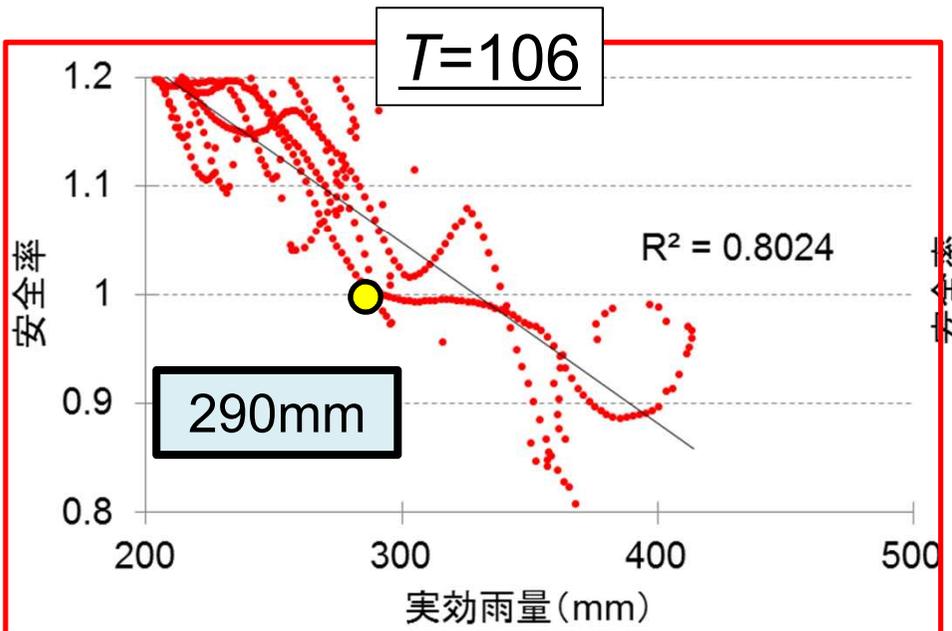
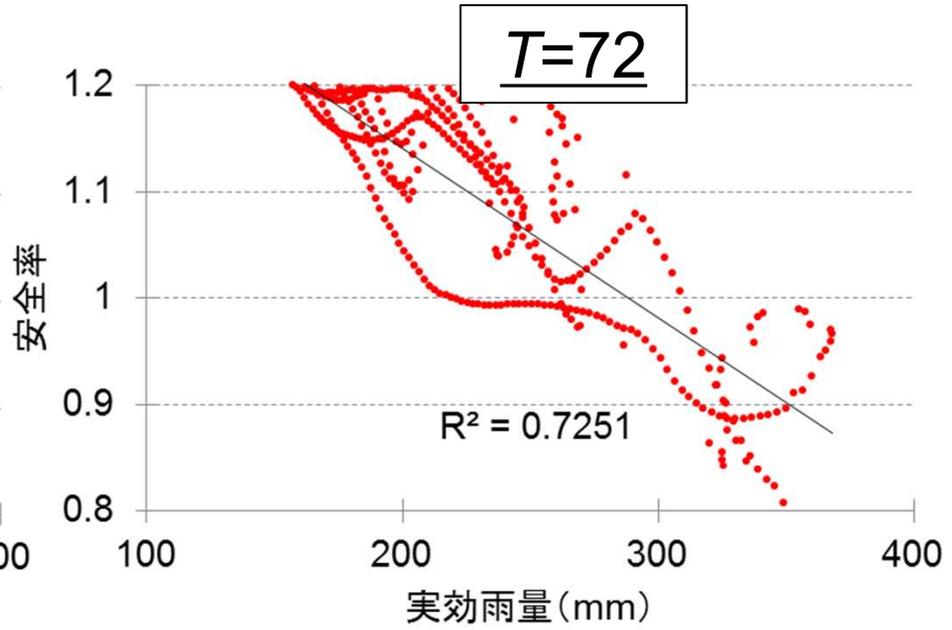
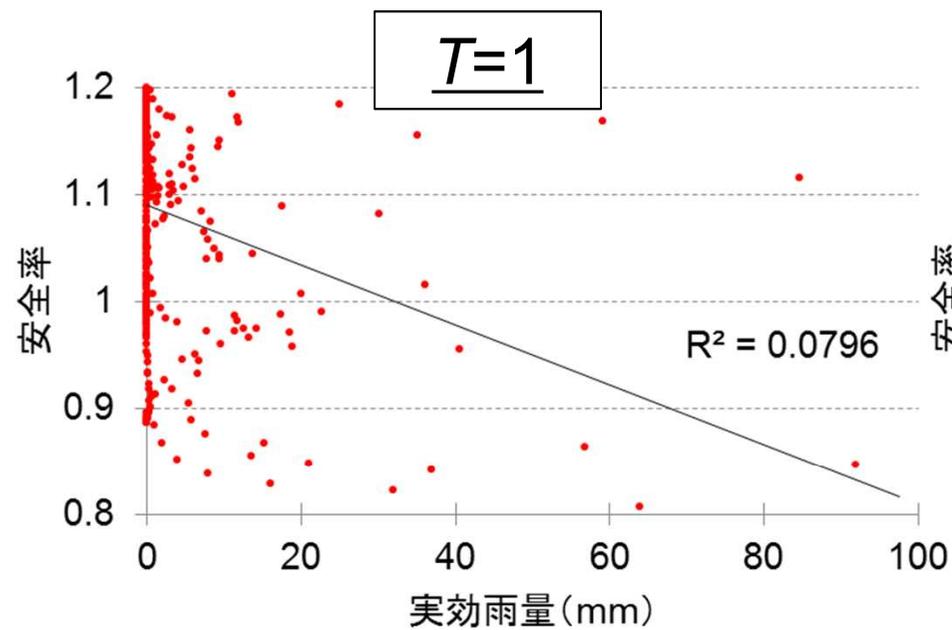
実効雨量のパラメータである半減期  
(水の抜け具合)を決定する必要がある

## 解析の概要

- 2004年1月1日0:00～2013年12月31日24:00までの10年間を解析
- 降雨外力は1時間雨量として与えた

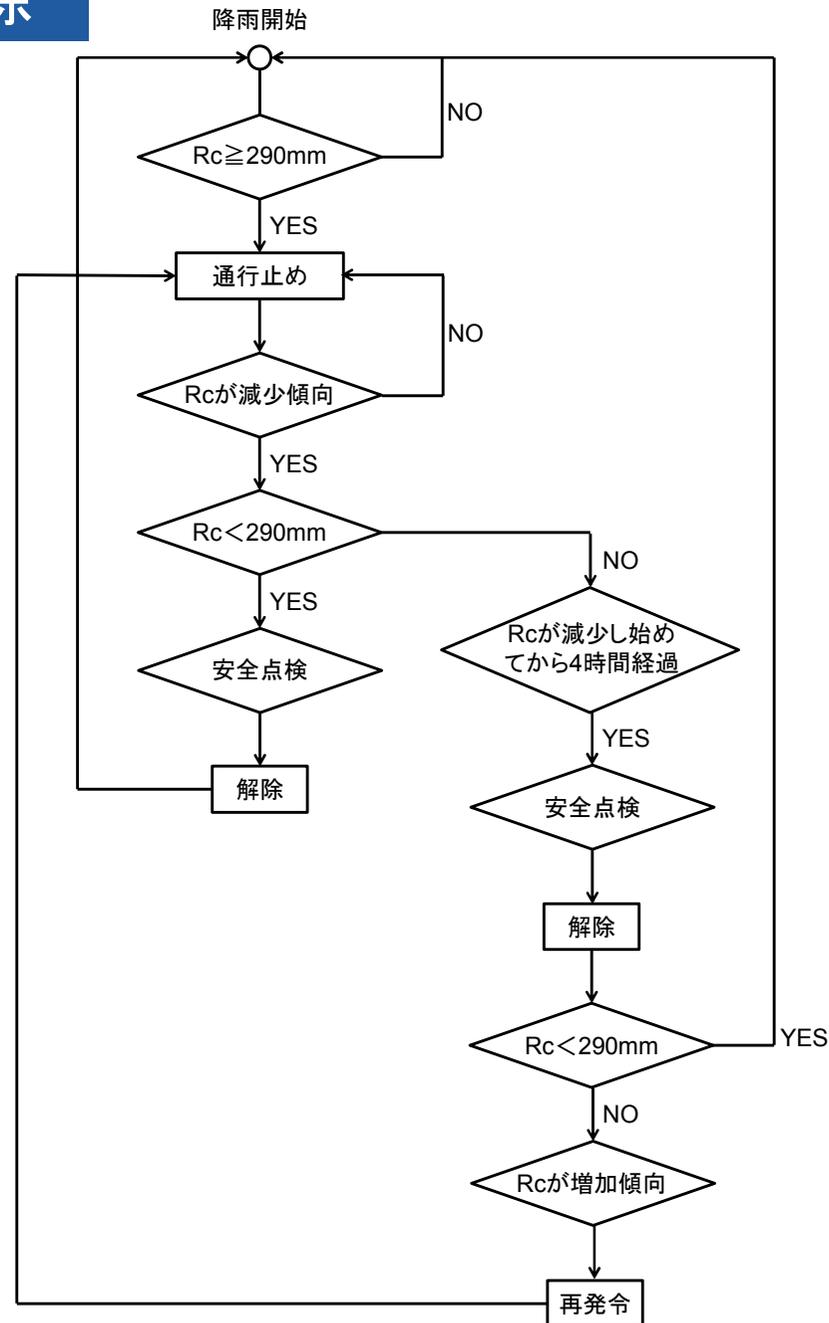


# Fsと実効雨量の関係



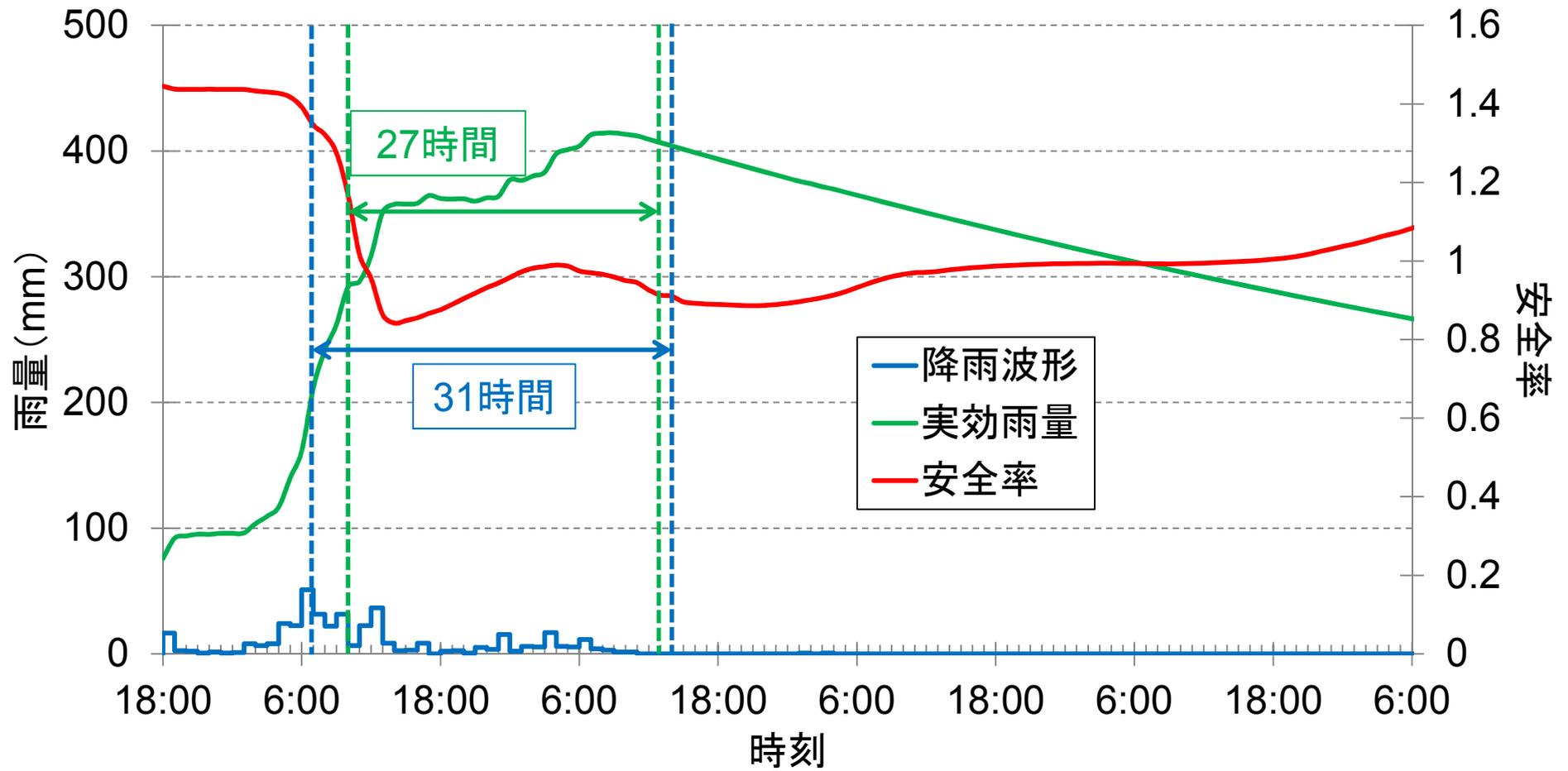
# 規制の発令・解除

## 通行規制発令・解除 のフロー



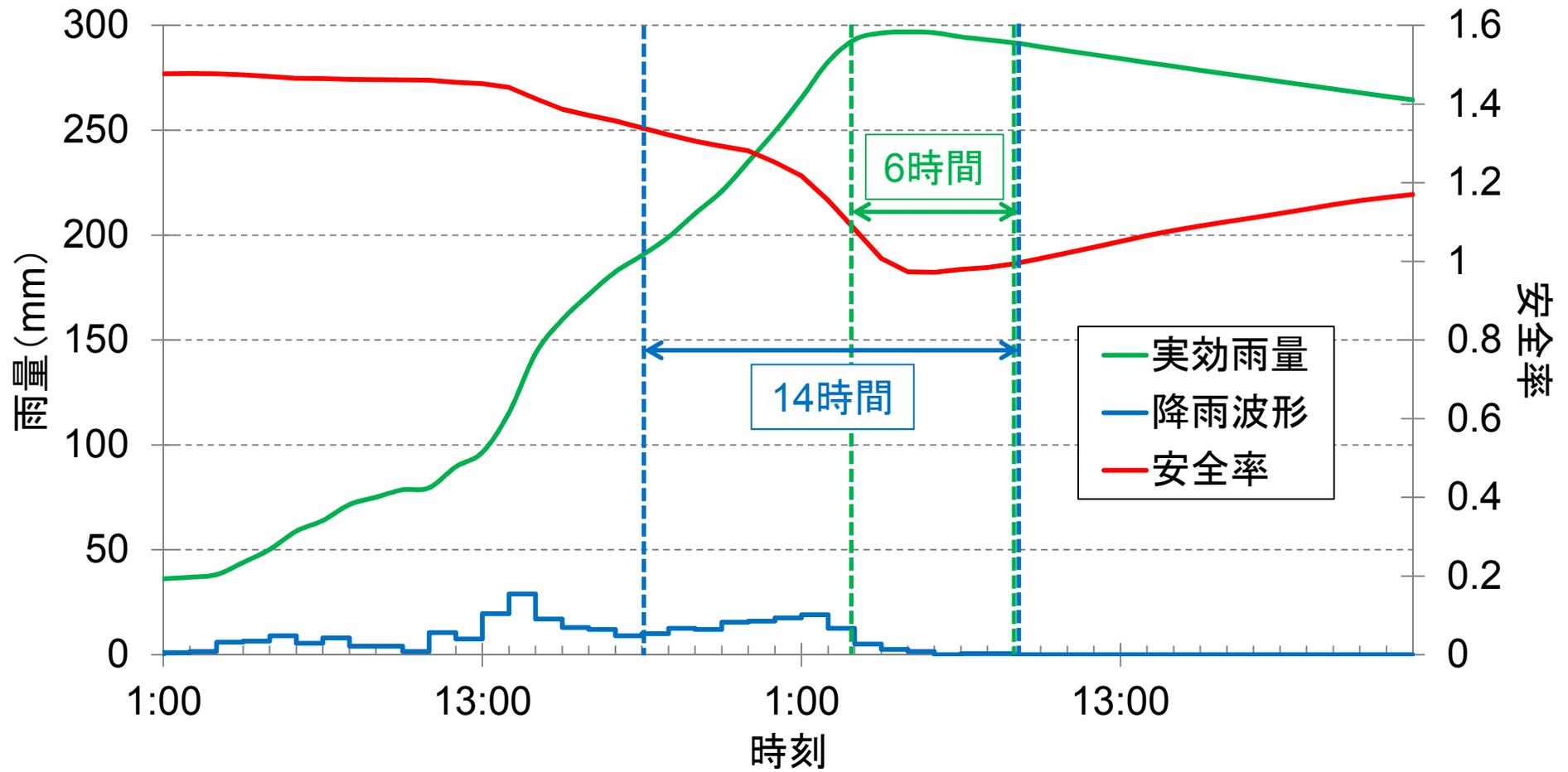
# 規制の発令・解除

2011.9.20~9.23



# 規制の発令・解除

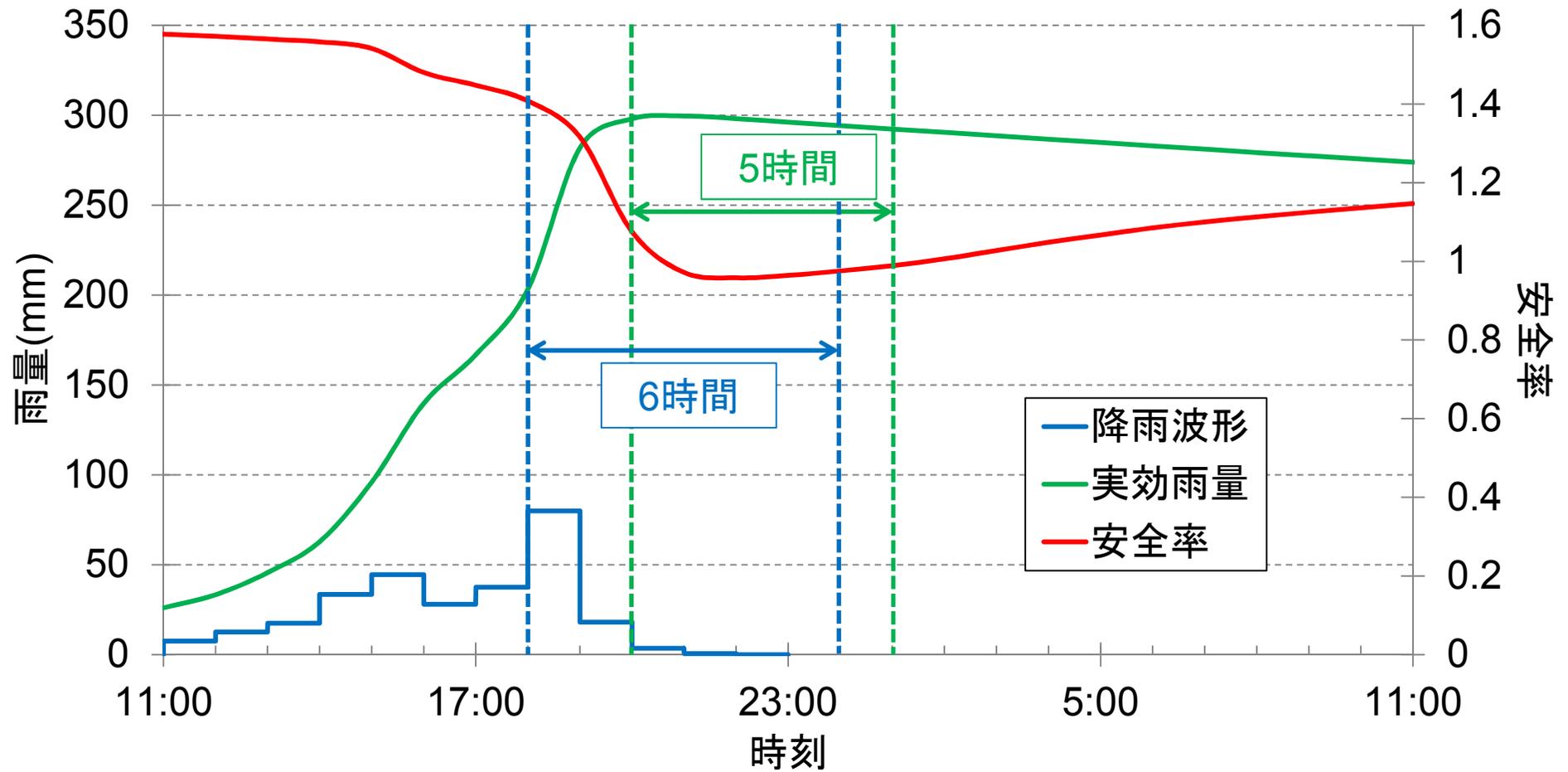
2013.9.16



# 規制の発令・解除

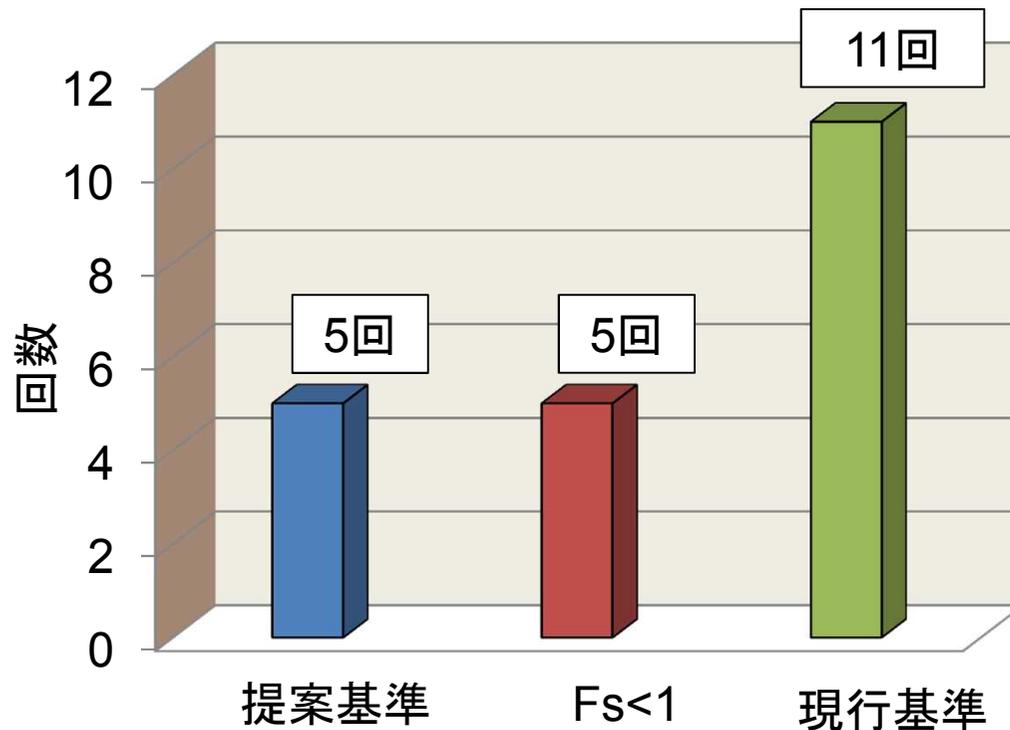
2014.10.13~10.14

※1週間降雨なし



## 規制の発令・解除

### 2004年～2014年の間の 規制発令回数



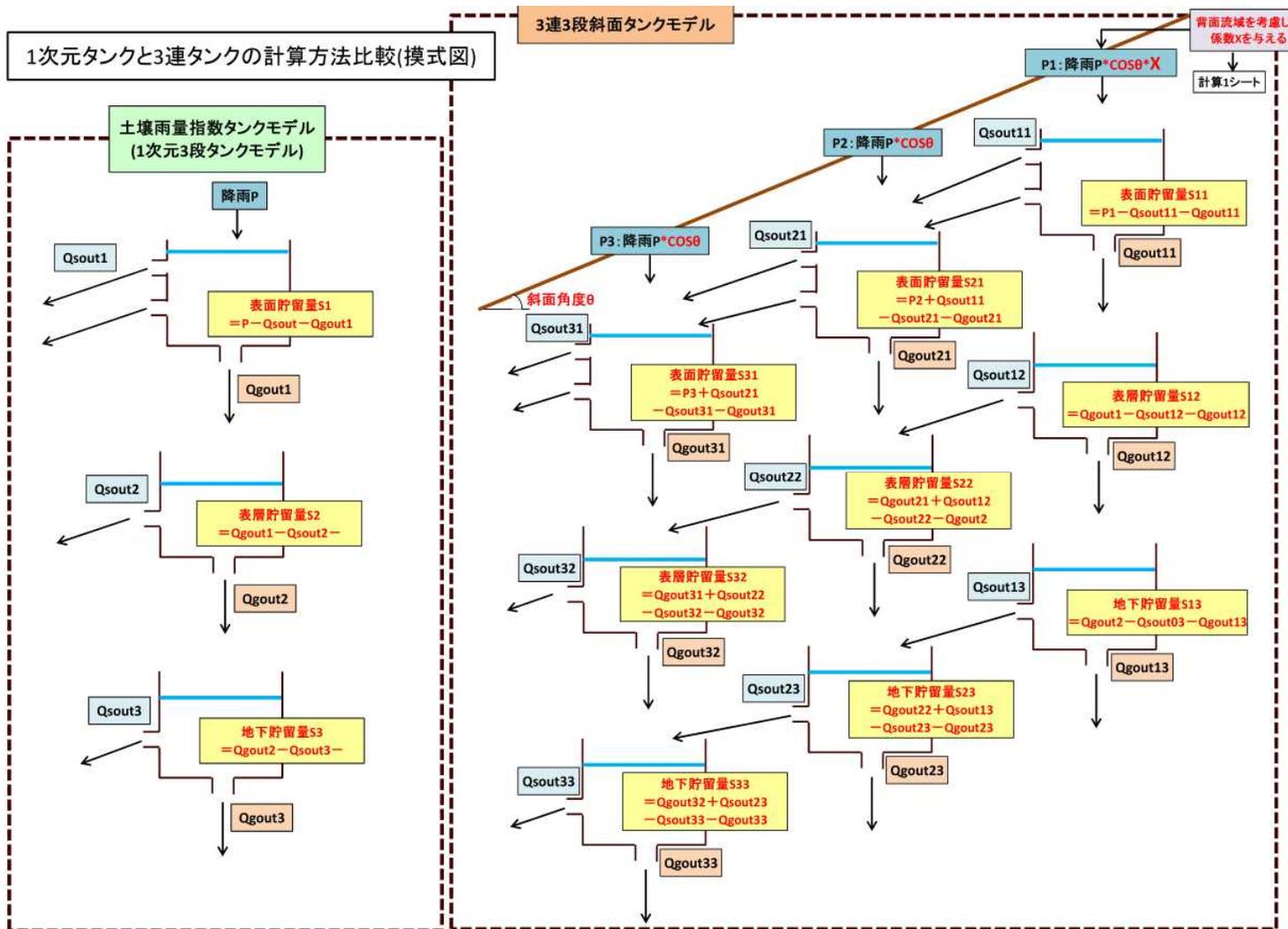
提案基準は、**先行降雨の影響**が反映されているため、**斜面が比較的乾いた状態**で発生した降雨では、規制を発令する必要がない場合がある



現行の基準よりも規制の発令回数を減らすことができる

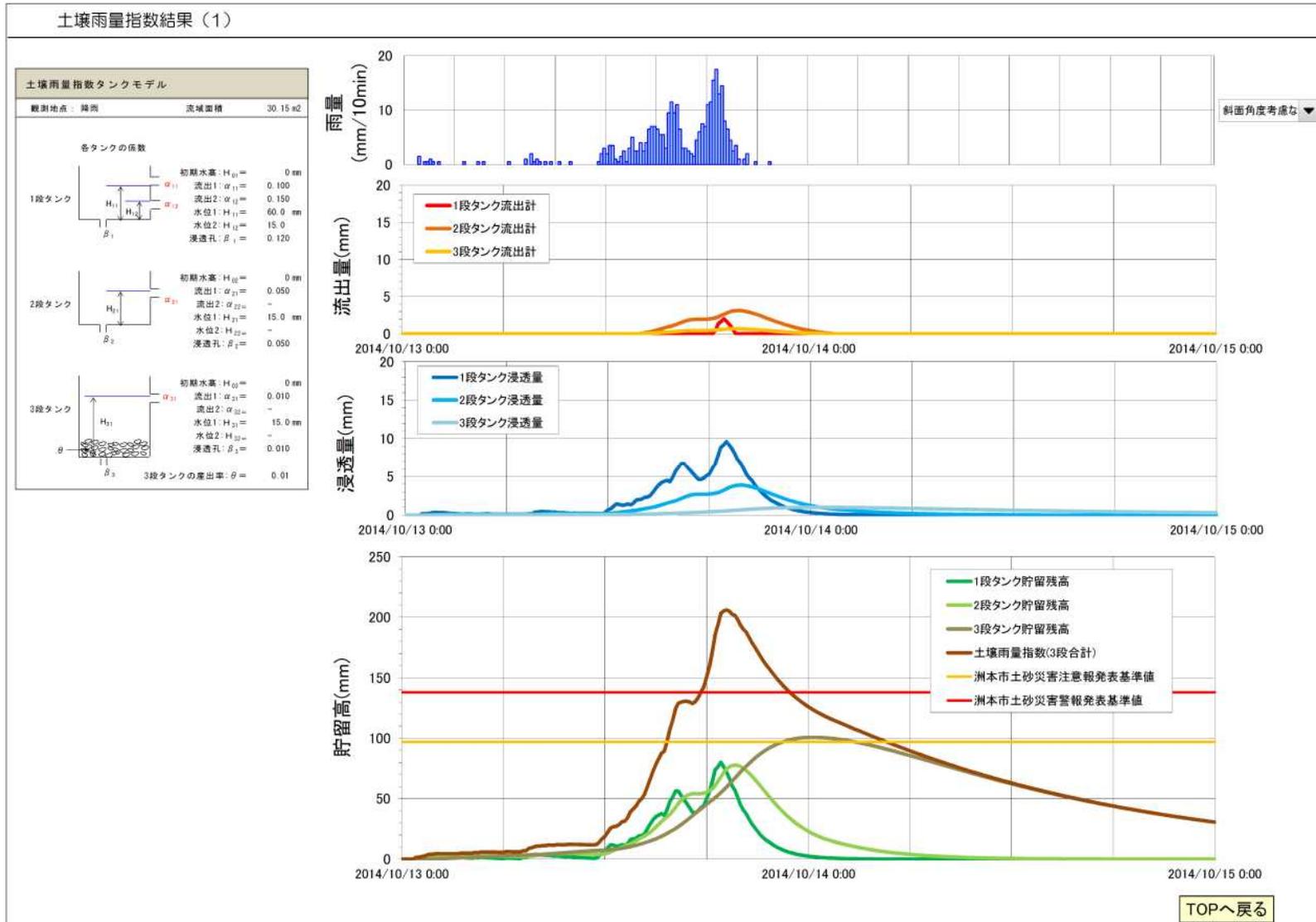
→ 通行規制発令・解除の空振り率改善が見込まれる

# マルチタンクモデル(国道28号当該斜面)



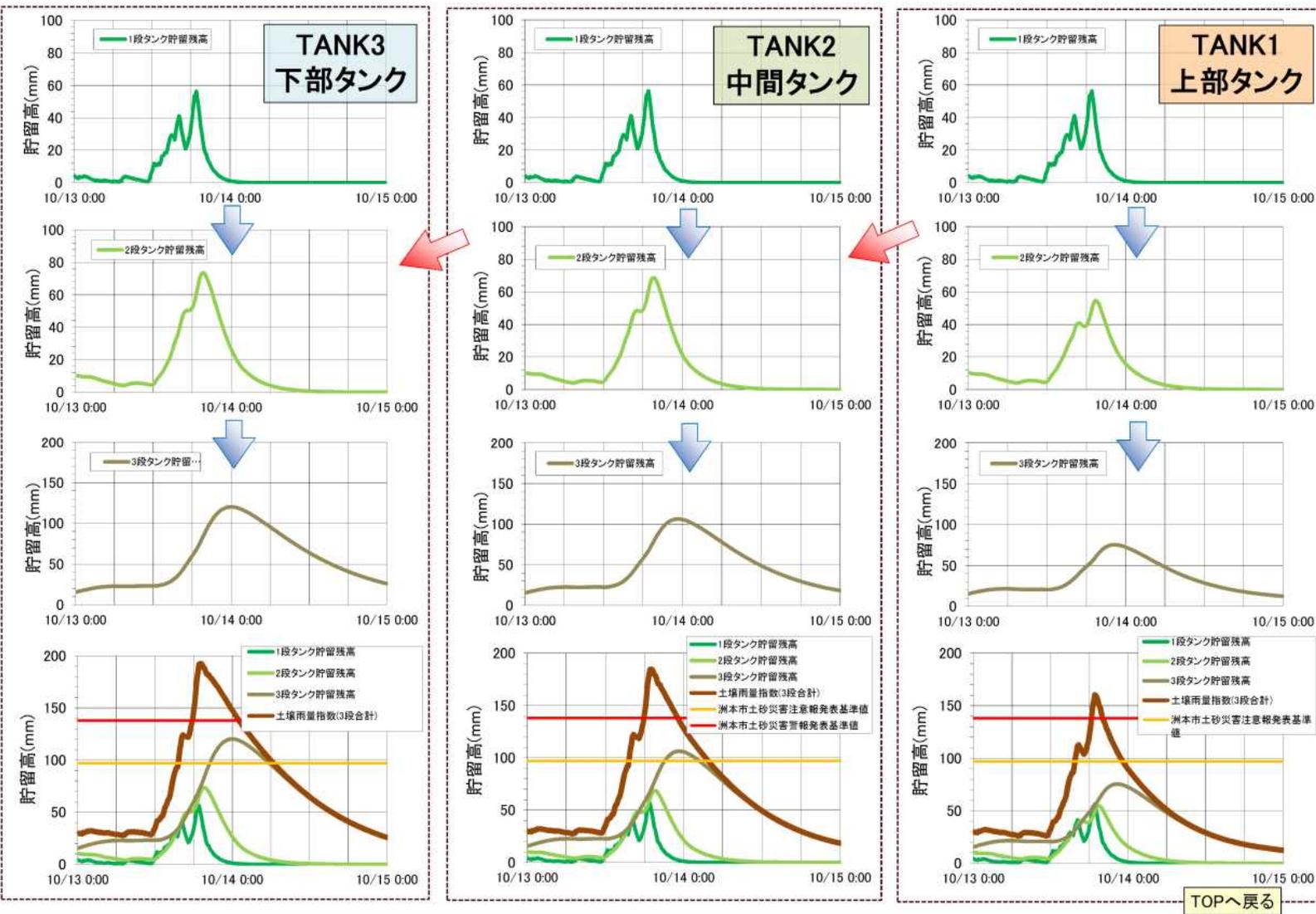
3連3段タンクモデルの構造

# マルチタンクモデル(国道28号当該斜面)



# マルチタンクモデル(国道28号当該斜面)

3連3段タンクモデルの各タンク貯留高グラフ



## まとめ

### 目的

特定の通行規制区間に対して、地形・地質、  
降雨特性に応じた雨量通行規制基準を提案する

### 結果

- **実効雨量**を用いることで、**先行降雨の影響**を考慮することができる。また、実効雨量は降雨終了後も引き続き計算が可能であることから、**雨量通行規制解除**の判断基準としても用いることができる。
- **実効雨量**と**数値解析**結果より得られる安全率の相関関係より、実効雨量で用いる半減期を設定し、**実効雨量による斜面安定度評価**が可能となり、**安全率の経時変化を概ね表すことができる**。
- 先行降雨の影響が残った状態で次の降雨がくる場合には規制発令から解除まで比較的時間を要する傾向があり、規制解除に当たっては、実効雨量のみの規制以外の方法を検討する必要がある。
- 本研究で提案する手法では、斜面の安定性評価を考慮することにより、従来の雨量通行規制発令規制と比較して、**規制発令回数を大幅に減少させることが可能となった**（**「きめ細やかで勝つ必要最小限の規制発令」**）。

## まとめ(続き)

- 国道28号当該斜面において、**マルチタンクモデル**(3連2段あるいは3連3段タンクモデル)を用いて**斜面内の雨水浸透**および**水収支**をモデル化した。
- タンクモデルのパラメータは現場計測値(斜面内の間隙水圧, 土壌水分および水位)に基づいて**データ同化**(**計測結果と解析のマッチング**)を行い決定した。
- 構築したタンクモデルを用いて、あらゆる降雨に対する斜面内の雨水浸透・水収支を分析することで、**実効雨量の半減期**を決定することができると思われる。
- 個々の斜面に対するタンクモデルが構築できれば、それぞれにおいて**土壌雨量指数**(各タンクの水位の合計値)が算出できる。