

2017/10/14

歴史都市防災研究所 第4回定例研究会

豪雨による土砂災害の危険度予測技術 ～文化遺産防災への適用に向けた課題と展望～

立命館大学 理工学部 都市システム工学科
小林 泰三

平成26年 全国の土砂災害発生状況（国土交通省）

平成26年12月31日現在

土砂災害発生件数

1,184件

土石流等：338件

地すべり：77件

がけ崩れ：769件

【被害状況】

人的被害：死者 81名

負傷者 49名

人家被害：全壊 161戸

半壊 113戸

一部損壊 230戸

8/20 土石流等



7/9 土石流等



8/17 がけ崩れ



8/17 土石流等



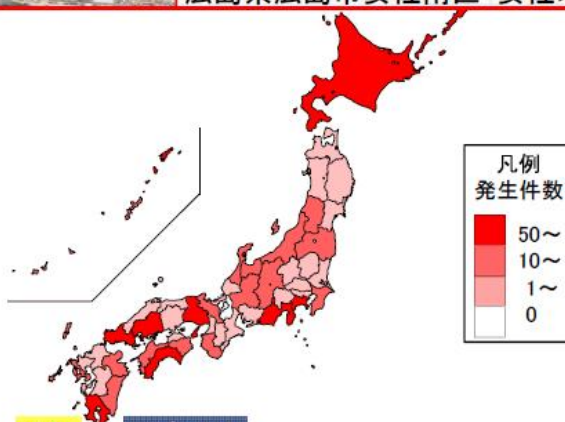
8/6 がけ崩れ



8/3 地すべり

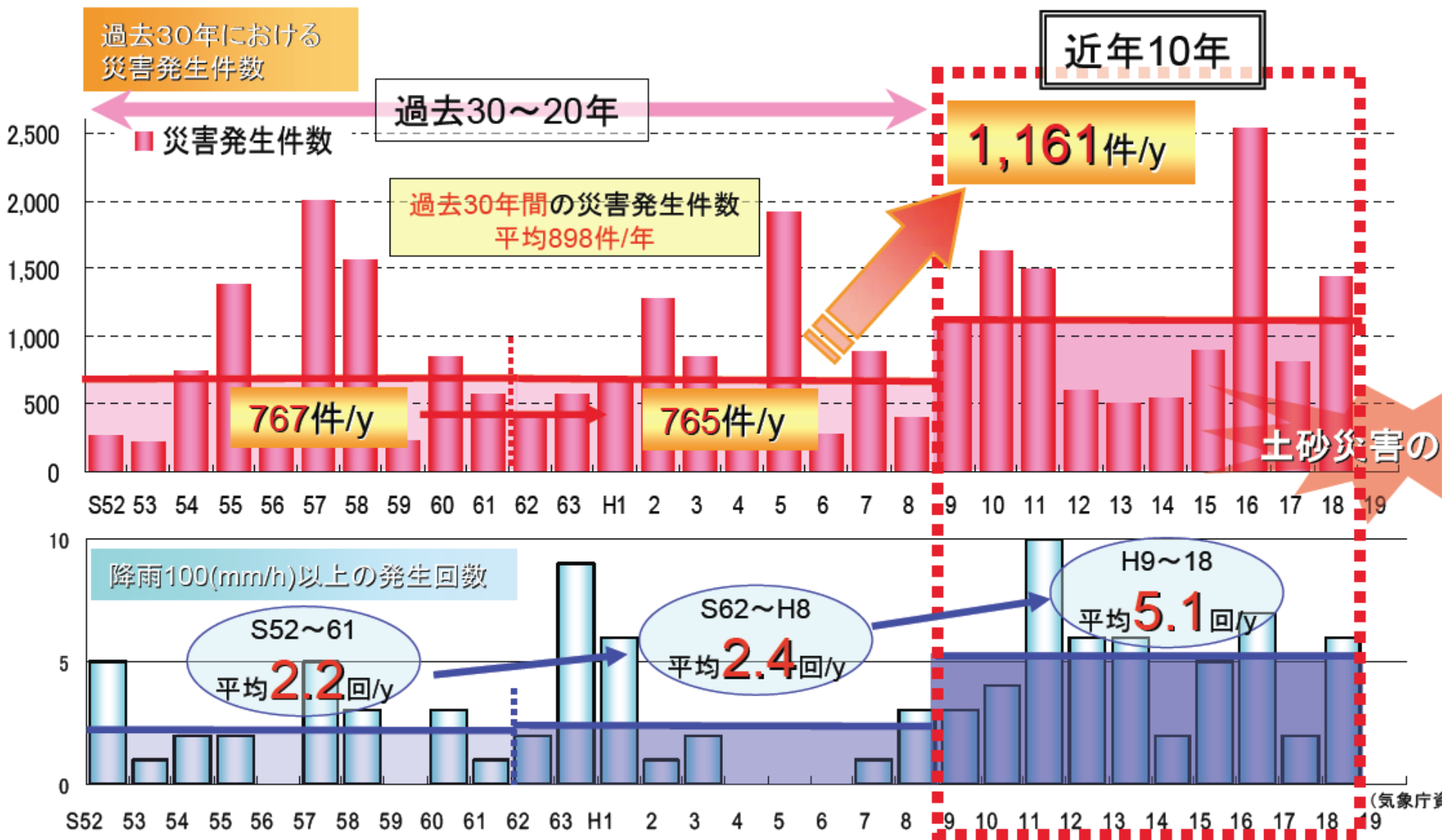


11/22 地すべり

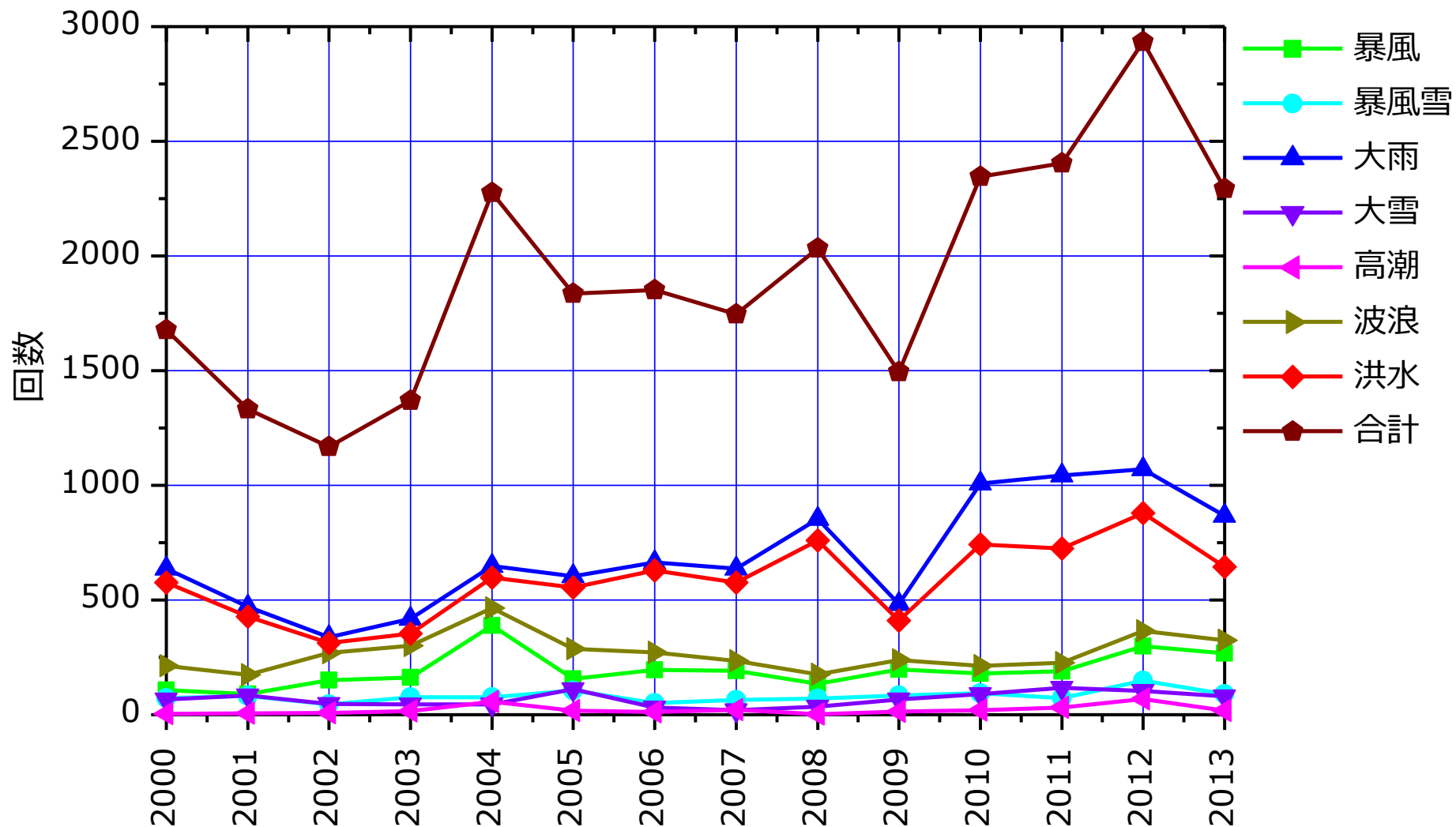


※御嶽山の噴火に関する土砂災害については、件数は「2件」（火砕流1件、土石流1件）。人的被害は無しとしている。

近年の異常気象に伴う災害件数の増加

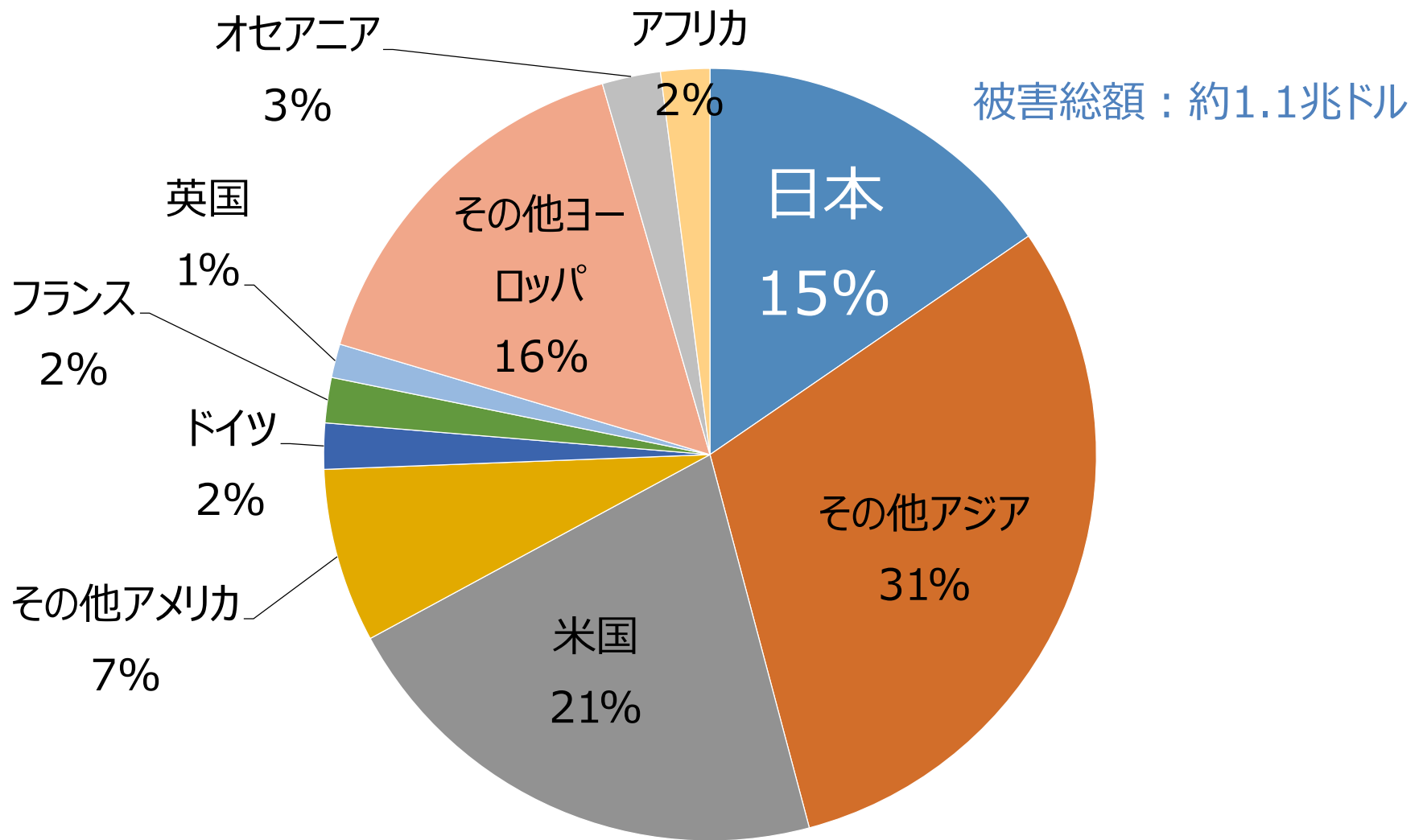


気象等警報の発表回数の推移



「内閣府・防災白書」のデータを元に作成
(～2007までは1～12月、2008～は4月～翌年3月)

世界における自然災害被害額の割合



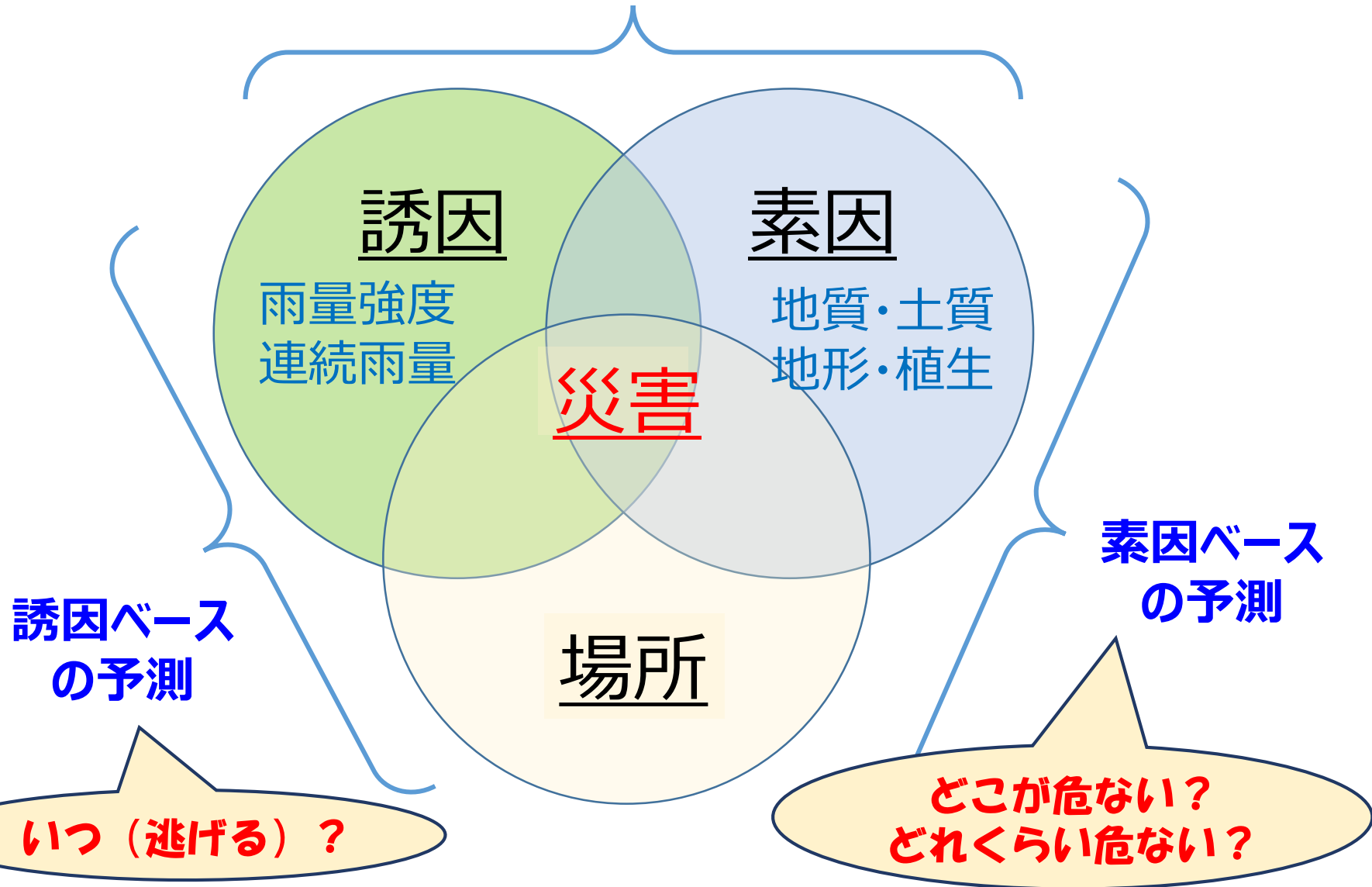
1970-2004年における被害総額
ルーバン・カトリック大学免疫研究所HPより

斜面崩壊の危険度予測技術

現状、課題、展望

危険度評価・崩壊予測のアプローチ

素因×誘因ベースの予測は発展途上！



「どこ」の予測①（土砂災害警戒区域等の指定）

【データ集計2017/5/31】

計順位	都道府県	土石流	急傾斜地崩壊	地すべり	計
1	島根県	13,252	18,250	721	32,223
2	長野県	6,698	18,737	1,515	26,950
3	山口県	9,866	15,408	329	25,603
4	兵庫県	6,954	13,579	271	20,804
5	熊本県	4,458	15,454	100	20,012
6	広島県	7,367	12,394	14	19,775
7	福岡県	5,182	12,243	206	17,631
8	鹿児島県	5,524	11,814	3	17,341
9	長崎県	2,516	14,668	5	17,189
10	京都府	6,671	9,870	57	16,598
46	宮城県	1,298	1,358	59	2,715
47	沖縄県	248	834	78	1,160
39	滋賀県	1,783	2,320	5	4,108
平均		3,482	6,761	192	10,436

「どこ」の予測② (点検による採点方式／統計処理方式)

施設管理番号 N * * * A 0 0 1

部分記号 S-1 N-1

表-4.2.3 安定度調査表(落石・崩壊)の記入例

点検者 防災太郎
所属機関 OOO株式会社

項目		のり面			自然斜面		
		評点区分	配点	評点	評点区分	配点	評点
地 形	G1:崖線地形	G1Hに該当する	3		G2の内 複数地形該当	3	
	G2:崖線地形	G2Hに該当する	0		G2の内 1地形該当	2	
	G3:台地の裾部、脚部浸食、 ハバング、集水型斜面、 土石流跡地など	G2,G3の内 複数地形該当	3		G2の内 1地形該当	2	
	G4:尾根先端の凸型斜面、オーバハング	G2,G3に該当する	0	3	G1,G3の内 1地形該当	2	
土質・地質・構造	浸食に弱い土質	顕著	8		顕著	2	
	水を含むと強度低下しやすい土質	やや顕著	4	4	やや顕著	1	2
	その他	該当せず	0	8	該当せず	0	2
	割れ目や層の密度が高い	顕著	12		顕著	5	
崩壊の性状	浸食に弱い軟岩	やや顕著	6	12	やや顕著	4	8
	風化が早い岩質、その他	該当せず	0	12	該当せず	0	8
	炭れ壁(層理面、割線)	該当する	8		該当する	2	
	不透水性基盤上の土砂	顕著	6		顕著	4	
表層の性状	上部が硬質/脚部が脆弱な岩	やや顕著	4	12	やや顕著	3	5
	その他	該当せず	0	14	該当せず	0	6
表層の状況	表土及び浮石・転石の状況	不安定	12		不安定	24	
	浮石・転石が不安定	やや不安定	6		やや不安定	12	
	湧水状況	安定	0	12	安定	0	12
	表面の被覆状況	湧水あり	8		湧水あり	4	
状 況	勾配(i)、高さ	しみ出し程度	4	0	しみ出し程度	2	0
		なし	0	8	なし	0	4
		裸地・植生主体	5		裸地・植生主体	16	
		裸地(植生・構築物)	3	1	裸地(植生・構築物)	10	10
変 状		構築物主体	1	5	構築物主体	6	16
		H>30m	18		H>50m	10	
		H≤30, i>標準	15		30≤H<50m	8	
		標準, 15≤H<30	10		15≤H<30m	4	10
変 状		i≤標準, H<15	5		H<15m	4	10
		H≥50m	18		i≥70°	10	
		30≤H<50m	16		45°≤i<70°	5	10
		15≤H<30m	12	12	i<45°	5	10
変 状		H<15m	10				
		当該のり面斜面の変状 (崩壊・小落石・ ガリ浸食・浸食ハバング・陥没・はらみ出し・ 根曲がり・倒木・亀裂・開口亀裂・その他対策工の変状)	複数該当・明確なものあり	12	複数該当・明確なものあり	10	
			あり・不明瞭なもの	8	あり・不明瞭なもの	5	10
			なし	0	なし	0	10
変 状		隣接するのり面・斜面等の変状 (落石・崩壊・亀裂・はらみ出し・その他の変状)	複数該当・明確なものあり	5	複数該当・明確なものあり	4	
			あり・不明瞭なもの	3	あり・不明瞭なもの	2	4
			なし	0	なし	0	4
合 計		のり面 : 73 点 (A1)			自然斜面 : 77 点 (A2)		

注()は各項目の満点を示す。

該当する場合は配点欄に○印をつけると共に点数を記入する。

不明な場合は中間的な値を採用する。

[対策工](B1)=(A1)+αまたは(A1)×0

既設対策工の効果の程度	点数(α)	評点
想定される落石・崩壊を十分に予防している、もしくは、それが発生したとしても十分に防護し得る。	×0点	のり面 斜面
想定される落石・崩壊をかなり予防している、もしくは、それが発生した場合かなり防護しているが、 万全ではない。	-20点	
想定される落石・崩壊を一部予防している、もしくは、それが発生した場合一部を防護しているが、 その他の部分に対しては効果がない。	-10点	○
対策がなされていない、もしくは、 なされていても、効果があまり期待できない。	±0点	○
合 計		(B1)のり面 63 点 (B2)斜面 77 点

※最近の対策実施以降、落石・崩壊が当該のり面・斜面等で発生していない場合には、履歴からの評価は実施する必要なし。
→(C)を0点とする。

被災の程度・程度区分	配点	評点
最近の対策以降、道路交通への支障が生じたことあり、(対策工の効果なし)	100点	
交通への支障はないが路面に達する比較的大きな落石・崩壊の履歴あり、 (対策工が万全ではない)	70点	
のり面・斜面先にとどまる程度の小規模な落石・崩壊の履歴あり、(対策工の効果はあるが、追加対策工が必要と思われるもの)	40点	○
	(c) 40 点	

(D)=MAX(B,C)

要因からの評点 (B)=MAX(B1,B2)	77 点
履歴からの評点 (C)	40 点
(B)と(C)の内、大きい方 (D)=MAX(B,C)	77 点

[総合評価]

対 応	判 定
対策が必要と判断される。	○
防災カルテを作成し対応する。	
特に新たな対応を必要としない。	

[地震時の安定性]

安 定	
不安定	○

※地形でG4または浮石・転石が不安定な場合は、不安定欄に○印をつける。

[主な点検対象]

のり面	
自然斜面	○

[主な災害形態]

落 石	○
崩 壊	

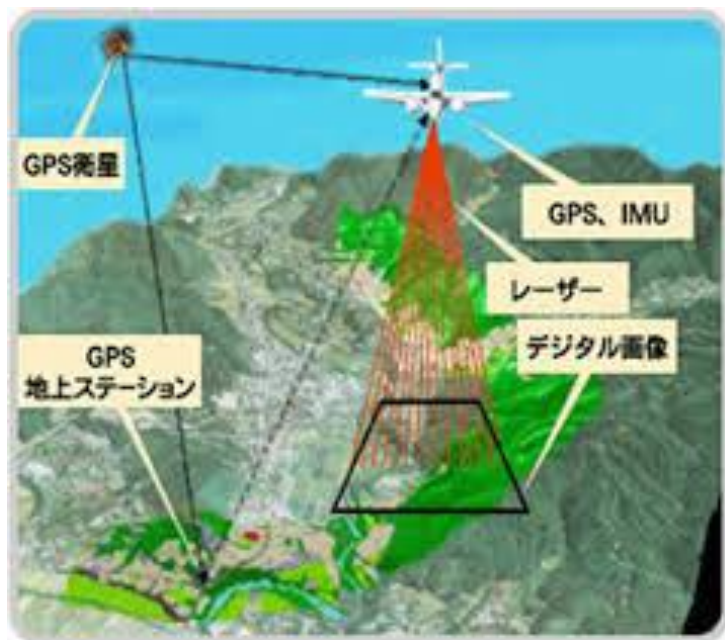
※総合評価で示した判定がのり面部分、自然斜面のどちらかに該当するかを示す。また、想定される主な災害形態が落石か崩壊かを示す。

道路防災点検 (2次点検) 安定度調査表 (道路保全技術センター)

「どこ」の予測③ (リモセン・GIS)

国土交通省

リモートセンシングによる広域調査



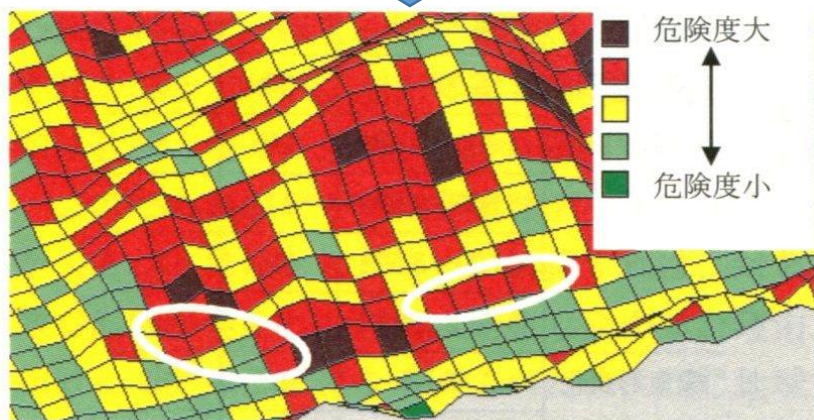
衛星画像／航空レーザ計測

標高・斜面方位、傾斜度など
＋
地形分類、地質、植生など

点数化・数量化 (GIS)

危険地判定モデル
(多変量解析等の
統計モデル)

災害懸念個所の抽出



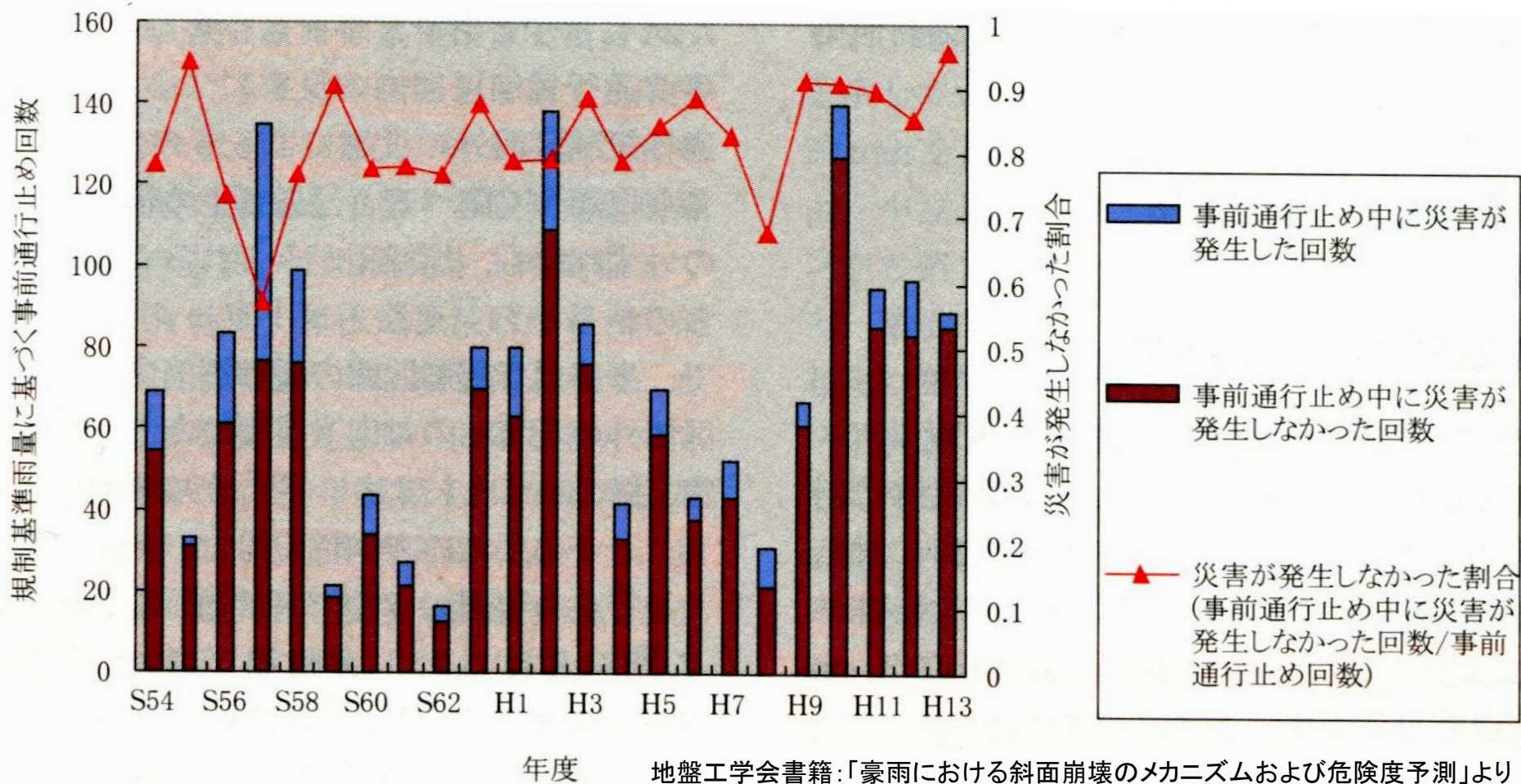
危険度評価結果

「いつ」の予測①（国道：国交省）

連続雨量（時間雨量2mm/h以下が3時間継続すると新たに起算）

福井県の場合：直轄国道200-230mm（6個所）、県管理国道100-150mmが多い

連続雨量が基準値超え⇒「通行止め」



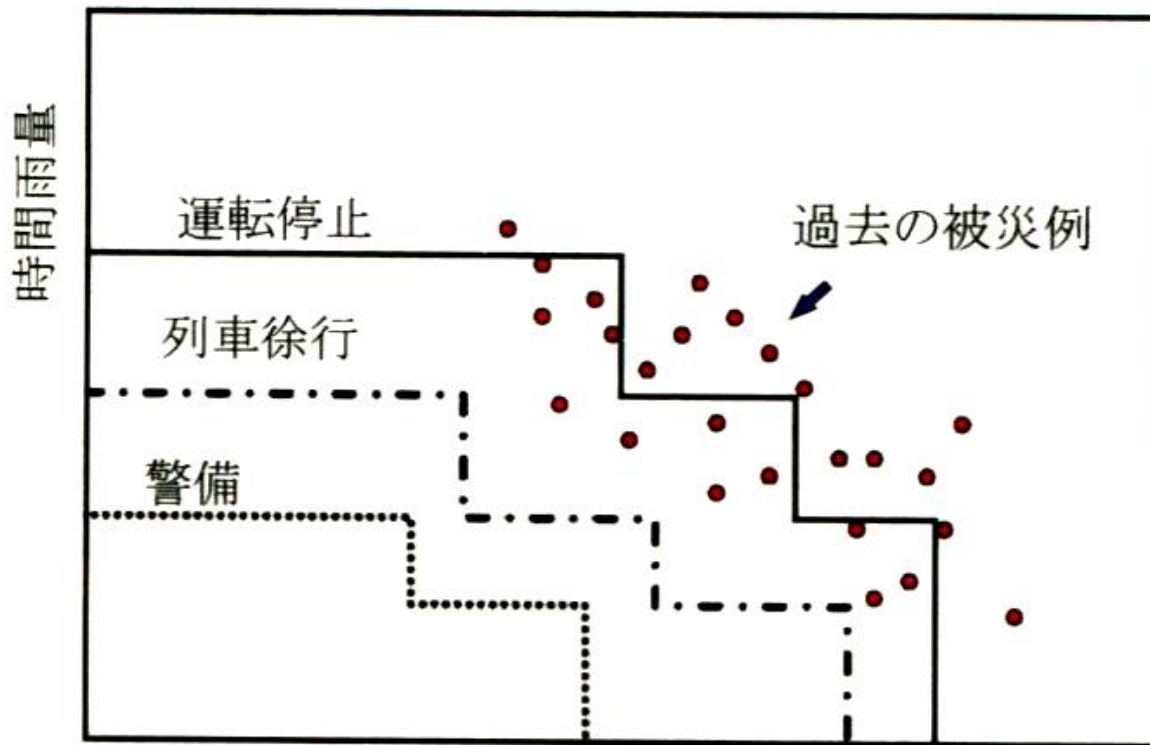
「いつ」の予測②（鉄道：JR）

沿線設置の雨量計による「連続×時間雨量」+アルファ（実効雨量等）

時間雨量：1時間前からその時刻までの降雨量

連続雨量：降り始めから現在まで（12時間以上の降雨中断でゼロクリア）

連続雨量が基準値超え⇒「警備」、「運転規制（徐行・停止）」



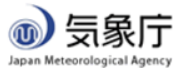
地盤工学会書籍：

「豪雨における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測」より

連続雨量

「いつ」の予測③（土砂災害警戒情報：気象庁）

土砂災害警戒情報：大雨警報が発令されている状況で、土砂災害の危険度が高まったとき。（都道府県と気象庁が共同で発表）



ホーム 防災情報 各種データ

ホーム > 防災情報 > 土砂災害警戒情報

土砂災害警戒情報

その他の情報

府県 全国

印刷 再読込

	発表状況
北海道地方	発表なし
東北地方	福島県
関東地方	発表なし
甲信地方	発表なし
北陸地方	新潟県
東海地方	発表なし
近畿地方	発表なし
中国地方	発表なし
四国地方	発表なし
九州地方	発表なし
沖縄地方	発表なし

※大東島地方は、避難行動の必要となるような土砂災害の発生する危険性が認められないため、土砂災害警戒情報の発表対象地域とはしていません。

■土砂災害警戒情報とは
大雨警報（土砂災害）が発表されている状況で、土砂災害発生の危険度がさらに高まったときに、市町村長の避難勧告や住民の自主避難の判断を支援するよう、対象となる市町村を特定して警戒を呼びかける情報で、都道府県と気象庁が共同で発表しています。

■早期避難をお願いします
対象市町村内で土砂災害発生の危険度が高まっている詳細な領域については「土砂災害警戒判定メッシュ情報」でご確認ください。周囲の状況や雨の降り方にも注意し、土砂災害警戒情報等が発表されていなくても、危険を感じたら、躊躇することなく自主避難をお願いします。

新潟県土砂災害警戒情報 第2号

平成29年7月3日 8時15分

新潟県 新潟地方気象台 共同発表

警戒対象地域】

長岡市 三条市* 柏崎市 小千谷市 加茂市* 十日町市 見附市* 糸魚川市 五泉市* 阿賀町* 出雲崎町* 刈羽村*

*印は、新たに警戒対象となった市町村を示します。

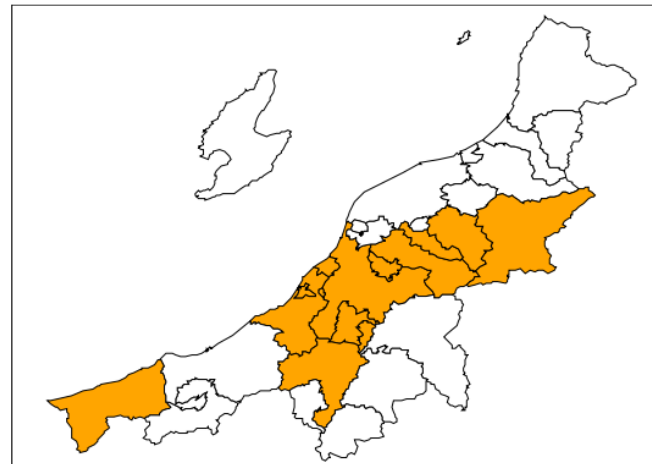
警戒文】

〈概況〉

降り続く大雨のため、警戒対象地域では土砂災害の危険度が高まっています。

〈とるべき措置〉

崖の近くなど土砂災害の発生しやすい地区にお住まいの方は、早めの避難を心がけるとともに、市町村から発表される避難勧告などの情報に注意してください。



警戒対象地域

2017/7/3/08:15

問い合わせ先
025-280-5424（新潟県土木部砂防課）
025-281-5871（新潟地方気象台）

「いつ」の予測③'（土砂災害警戒情報：気象庁）

土砂災害警戒判定メッシュ情報

ホーム

防災情報

各種データ・資料

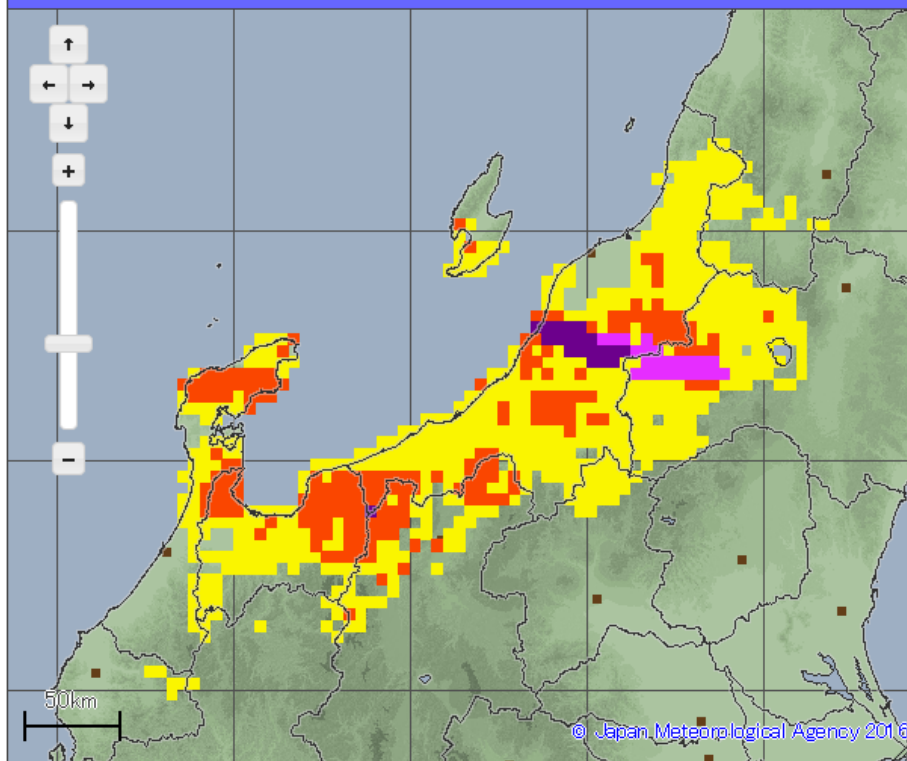
ホーム > 防災情報 > 土砂災害警戒判定メッシュ情報



土砂災害警戒判定メッシュ情報

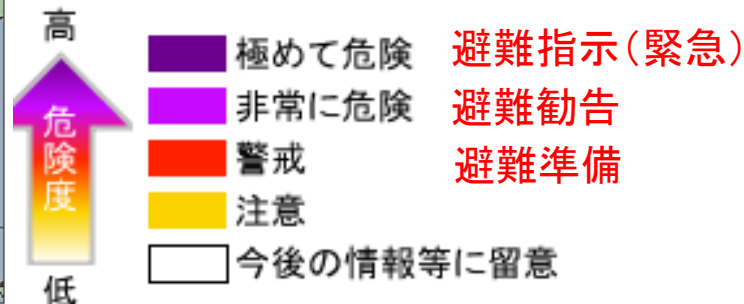
表示時間 < 07/03 08:20 > 最新 画像保存 印刷
動画方法 6時間前から最新まで 動画表示 動画開始 動画停止
動画速度 遅く ■■■■■□□□□□ 速く 使い方

2017年07月03日08時20分



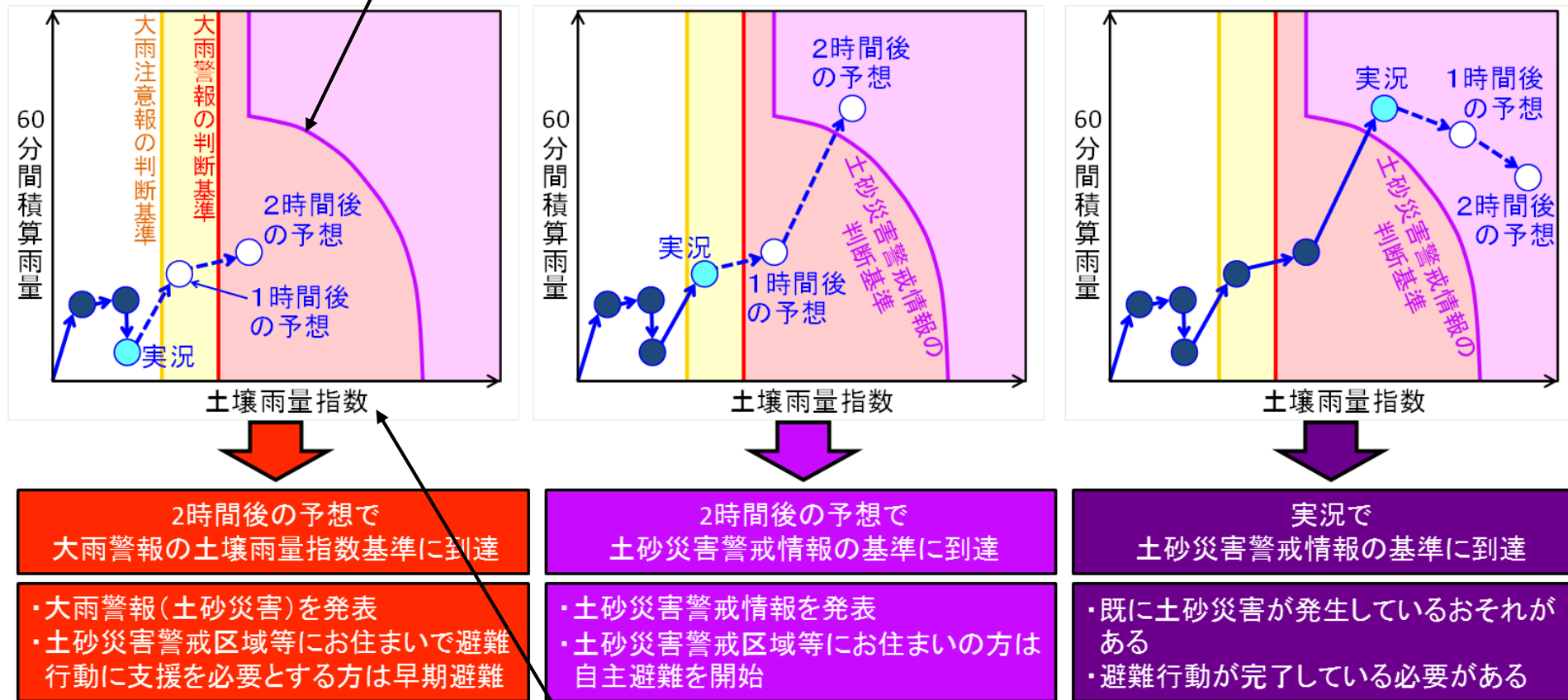
2017/7/3/8:20

土砂災害警戒情報を補足するために、**5km四方メッシュ**ごとに、土砂災害の危険度を**5段階**に判定。



「いつ」の予測③'' (土砂災害警戒情報：気象庁)

過去の土砂災害発生時の雨量データを調査したうえで設定。
この曲線に到達＝すでに土砂災害が発生している恐れのある状況

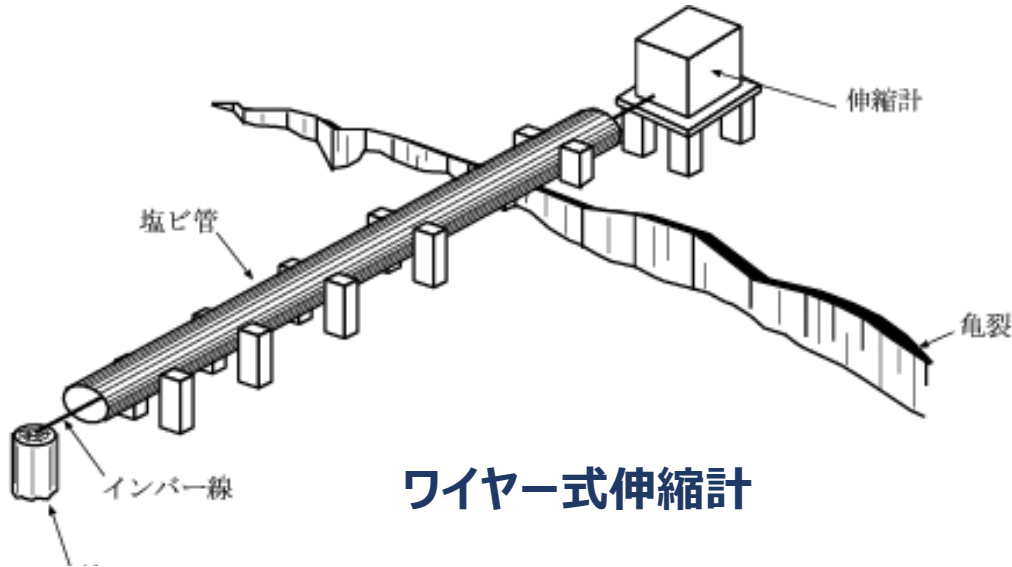


原図：気象庁HPより

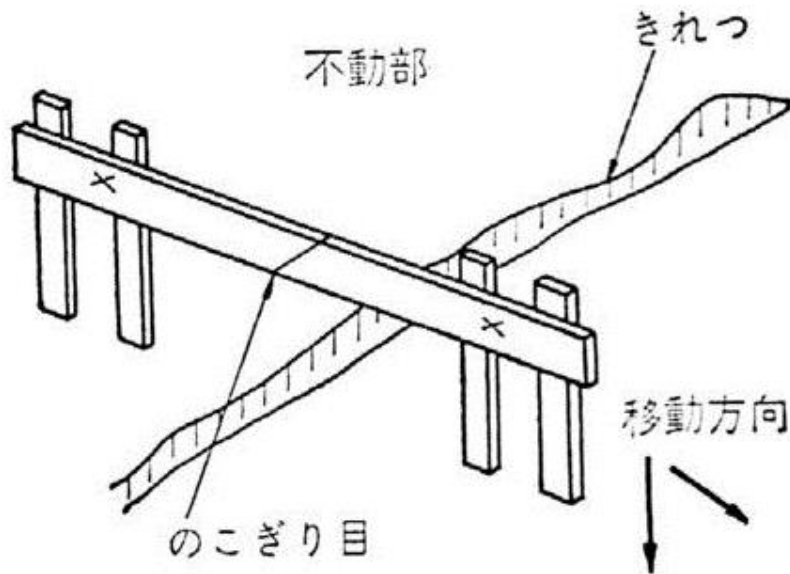
土中の水分量を示す指標。「タンクモデル」による計算結果。
アメダス雨量を用いて計算。

「動いているのか？」の判定

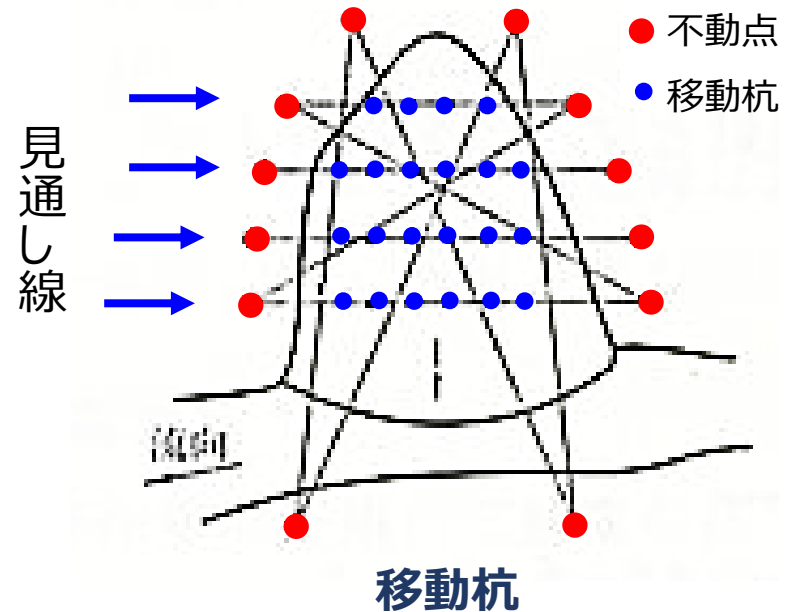
原図：日本道路協会：道路土工 切土工・斜面安定工指針より



ワイヤー式伸縮計



抜き板による簡易計測



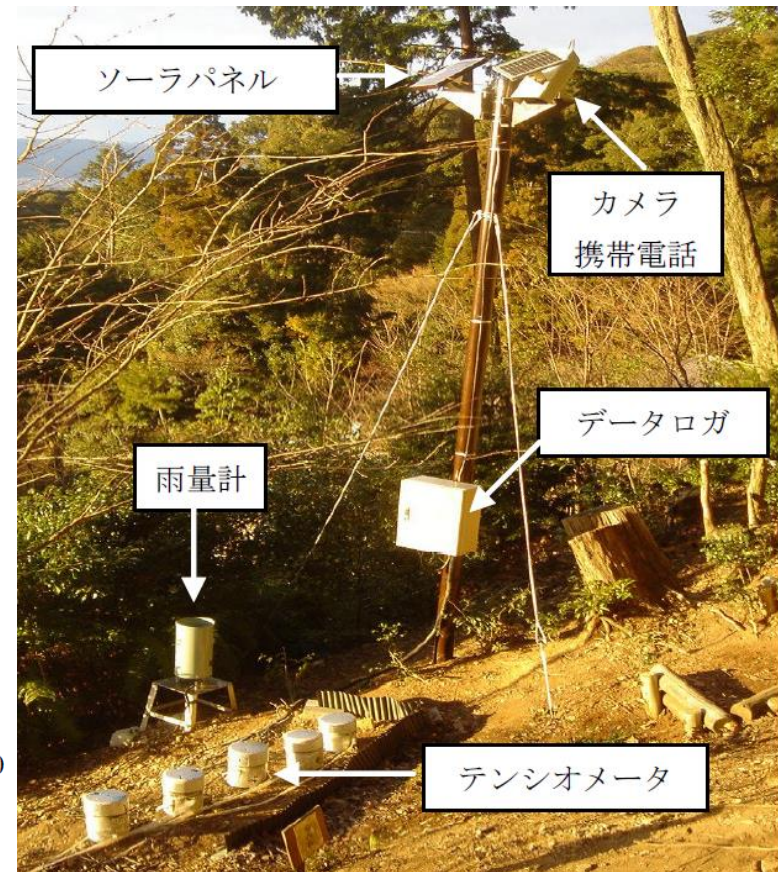
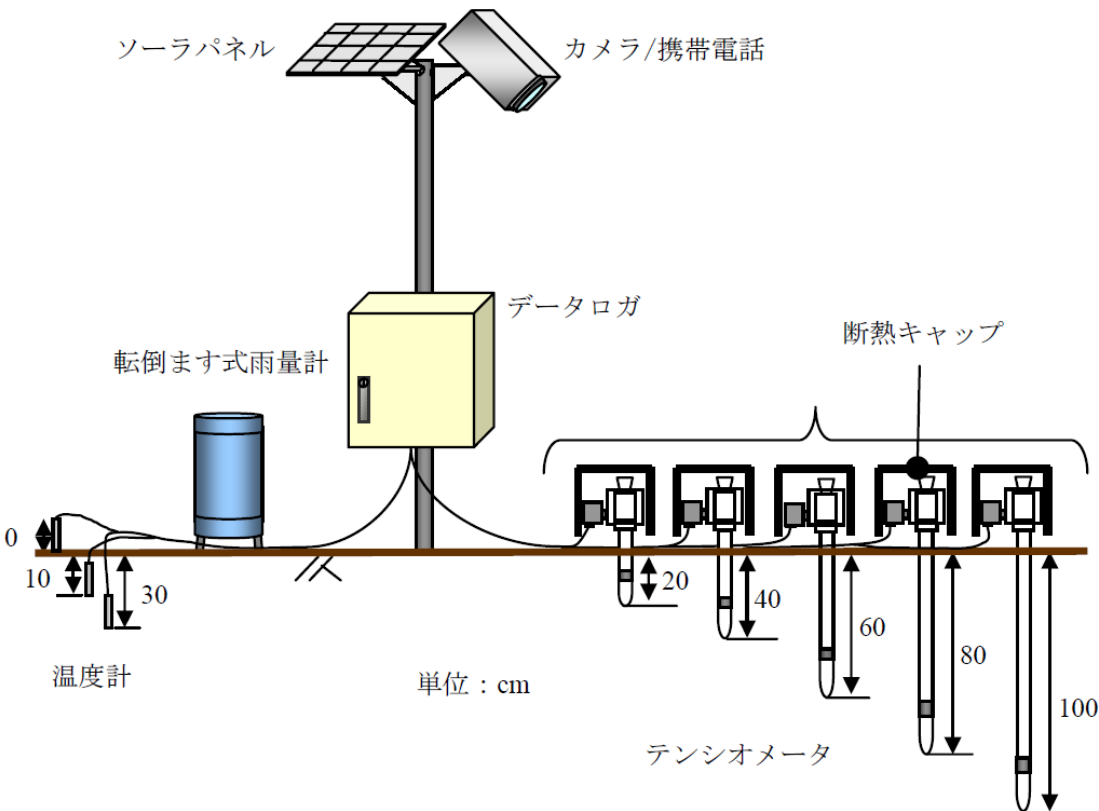
ICT/IoTを活用した斜面監視技術

気象データ（その場雨量計、温度計）
土質条件データ
（テンシオメータ、土壌水分計）
カメラなど

無線

リアルタイム安定解析
安定性評価

避難勧告
／解除



【立命館大学・深川研究室グループ@清水寺】

文化遺産を含む民有地を対象とした場合の課題

◆コスト！

- － 公共事業で行われる調査・監視業務の費用：個人レベルでは負担が高すぎる。
- － 住民を対象とした調査会社・コンサルタント業者は少ない（最近、増えつつあるが・・・）。

◆素因／誘因の両者を考慮した予測手法が発展途上

- － 「どこ」と「いつ」の両方を同時に予測する必要性は高くないかもしれない。
- － 重要なのは精度・確度の向上。素因だけ、誘因だけでは精度が確保できず空振りが多い。

◆合理的な調査技術、低コストの斜面監視技術が発展途上

- － 現状は、ボーリング（高コスト）か簡易貫入試験（指標試験）のいずれかのみ。
- － 監視技術も専門性が高く、住民目線では敷居が高い。

◆調査～分析～評価～監視（管理）のシステム化？

- － 民有地（住民）を対象とした斜面危険度予測手法は、あるようでない。
- － 調査～監視（管理）までのシステム化、ハードとソフトのパッケージ化。
- － 誰がどこまでのことをやるのか？（役割分担）

清水寺等の文化財周辺斜面への 適用に向けた展望



清水寺：舞台から眺めた後背斜面

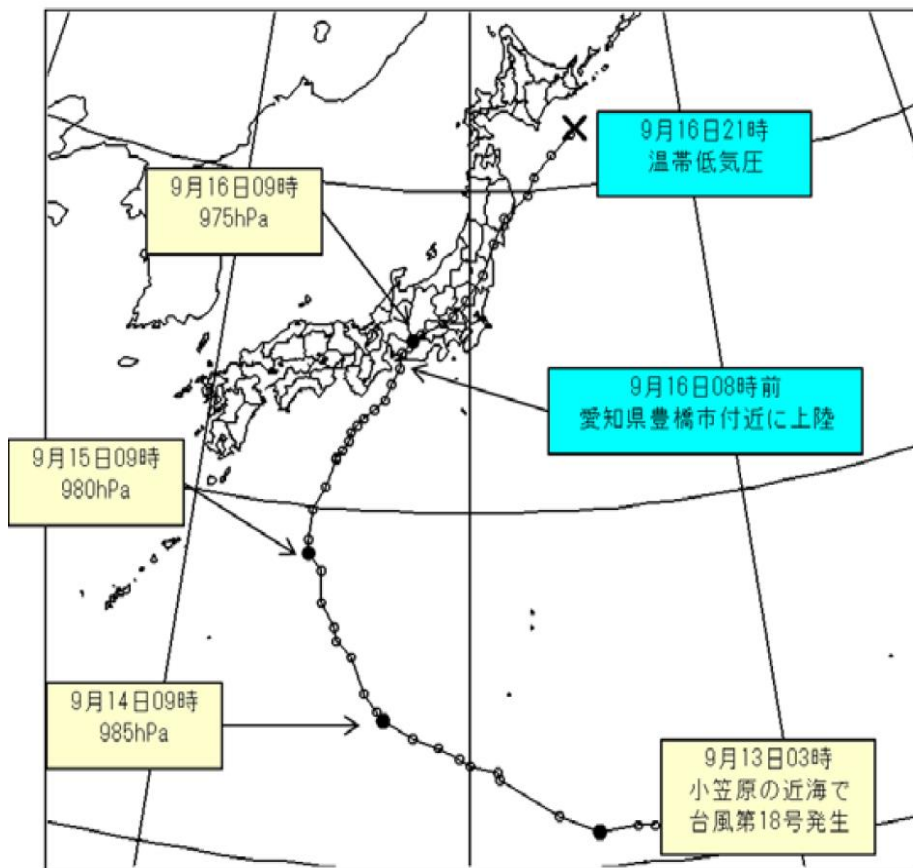


安国寺@京都府綾部市

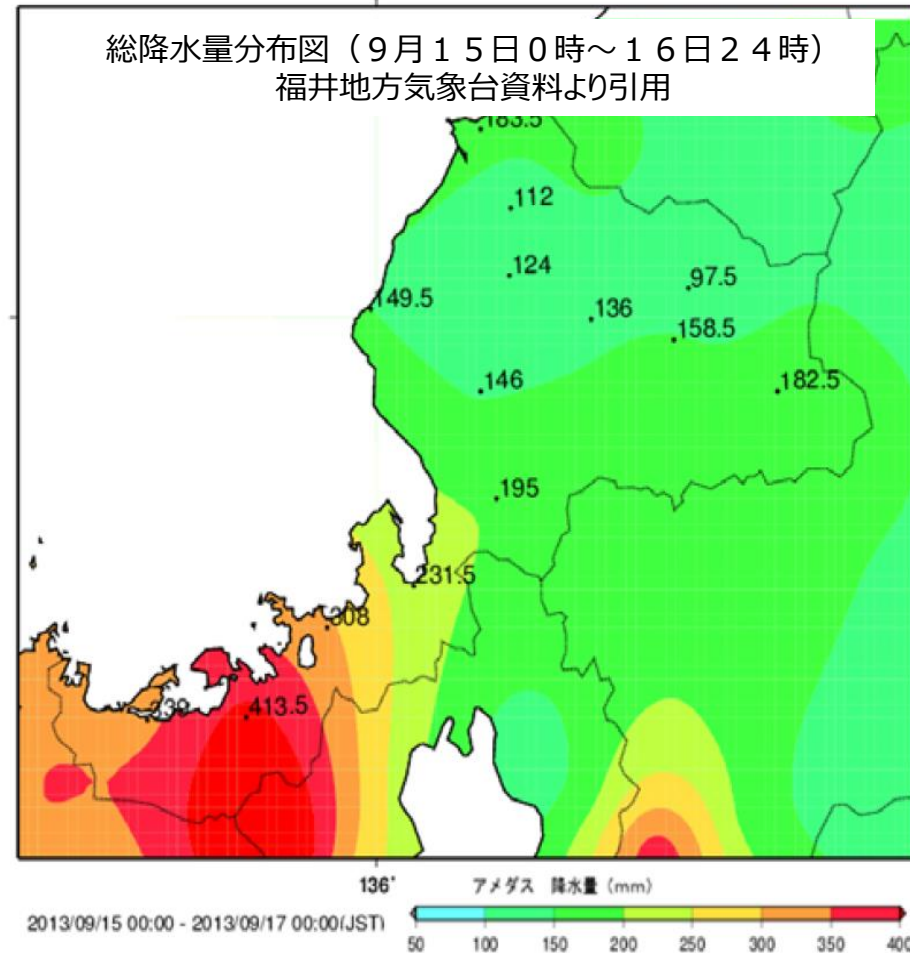
モデル実証サイト（予定）

- 崩壊の可能性がある斜面の抽出
- 降雨による斜面安全率の変化をリアルタイム監視できるシステムの構築

平成25年台風18号



台風18号の進路経路図（日時、中心気圧）
—福井地方気象台資料より引用



24時間雨量観測史上最多 小浜市(384mm) 南越前町今庄(179mm) 敦賀市(215mm)

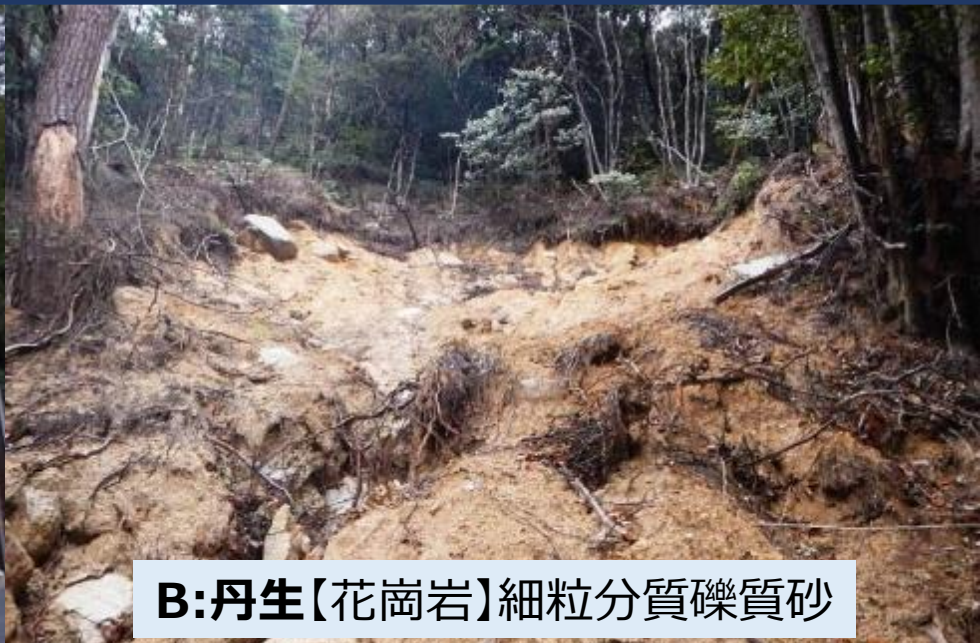
8/30に運用開始の大雨特別警報(9/16、5:05)

京都府・福井県・滋賀県で第1号。福井では解除されたのは約30時間後のこと。

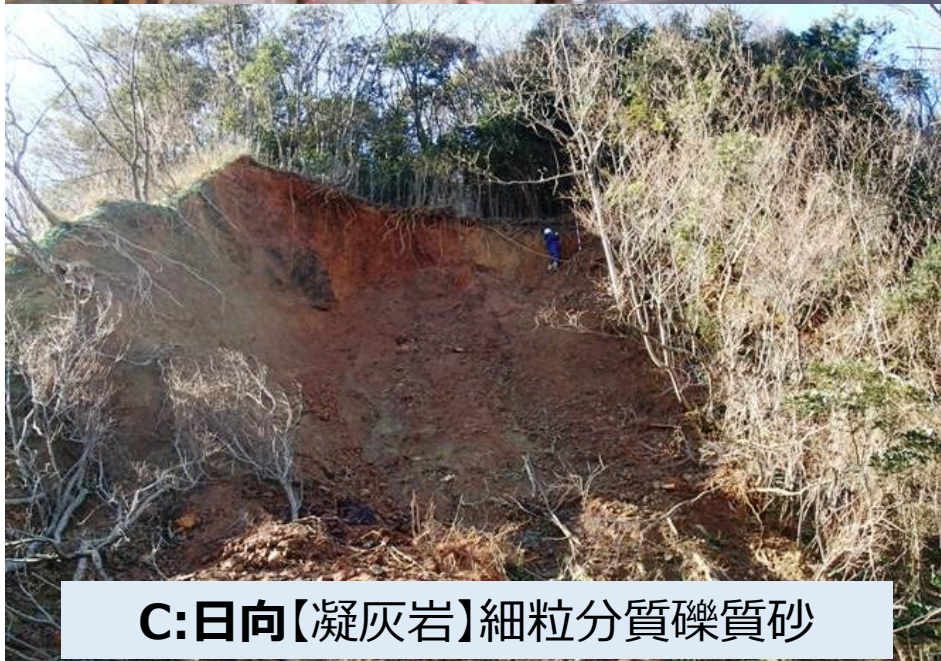
調査・研究対象とした斜面崩壊



A: 杉津【花崗閃緑岩】細粒分礫まじり砂



B: 丹生【花崗岩】細粒分質礫質砂

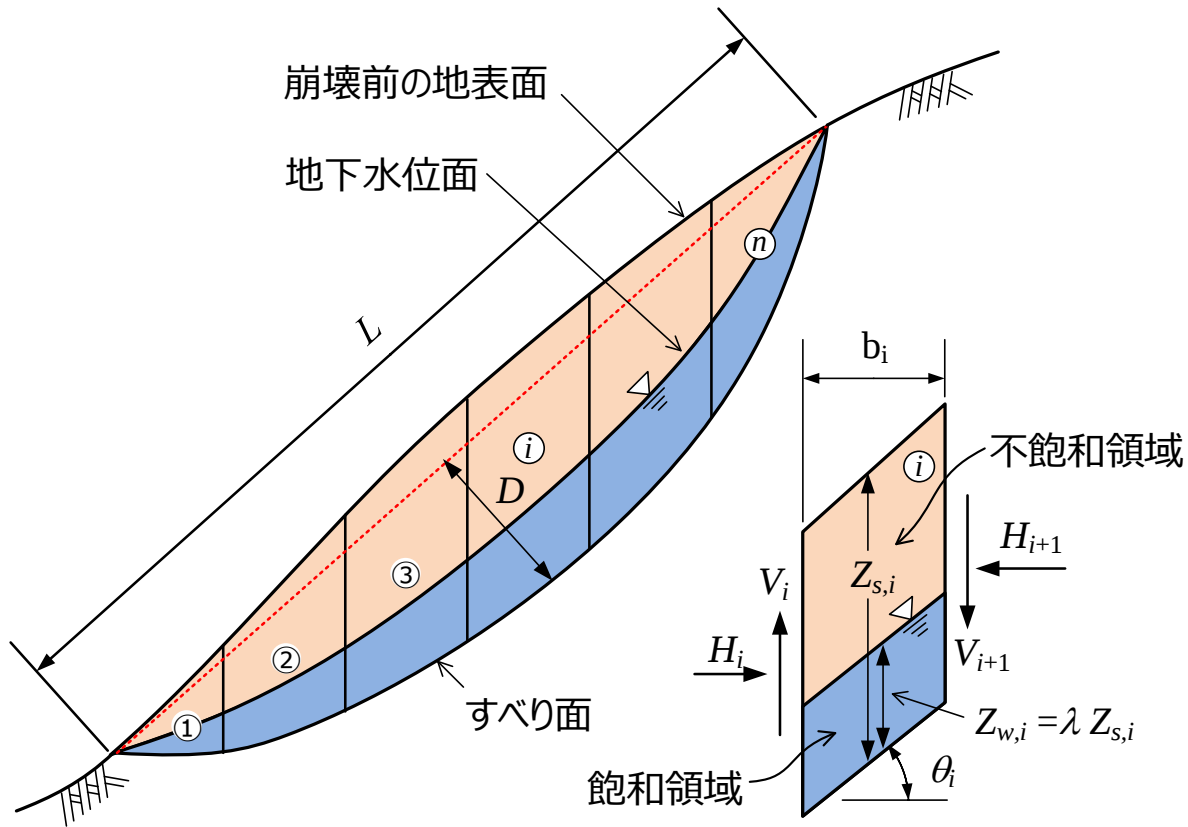


C: 日向【凝灰岩】細粒分質礫質砂



D: 遊子【砂岩頁岩互層】粘性土

降雨による斜面の不安定化要因



①吸水による自重増加

② 水圧発生による有効荷重の低下

③含水による強度定数 (粘着力) の低下

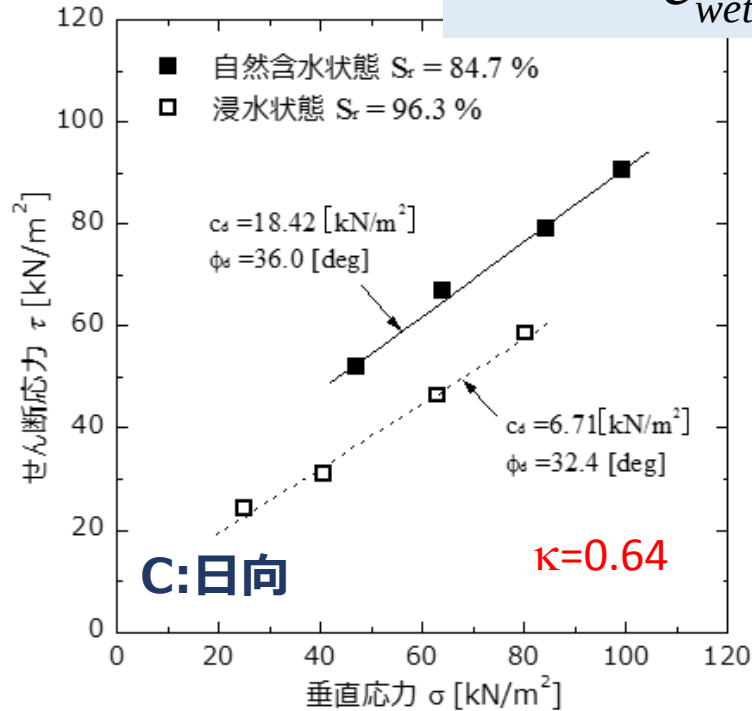
安全率 $F = \frac{1}{\sum W_i \tan \theta_i} \sum \left\{ \frac{cb_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi}{\cos^2 \theta_i (1 + \tan \theta_i \tan \phi / F)} \right\}$

$m_{ai} : \cos \theta_i + (1/F_s) \sin \theta_i \tan \phi_i$ 、 q_i : スライス底面の傾斜角、 b_i : スライス幅、 W_i : スライスの土塊自重、 ΔV_i : スライス側面に作用する鉛直方向の力増分 (= $V_{i+1} - V_i$)、 u_i : スライス底面に作用する水圧である。

不安定化要因の分離評価は可能か？

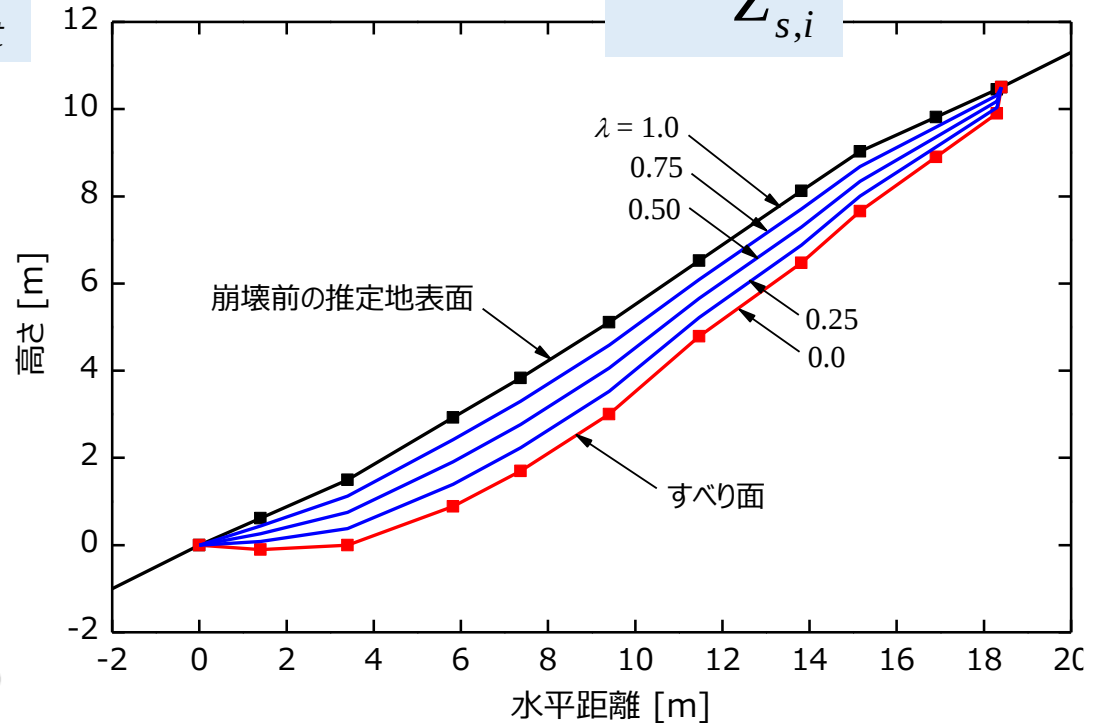
粘着力係数

$$\kappa = 1 - \frac{C_{sat}}{C_{wet}}$$



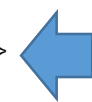
水位高係数

$$\lambda = \frac{Z_{w,i}}{Z_{s,i}}$$



安全率

$$F = \frac{1}{\sum W_i \tan \theta_i} \sum \left\{ \frac{cb_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi}{\cos^2 \theta_i (1 + \tan \theta_i \tan \phi / F)} \right\}$$



$$c_{sat} = (1 - \kappa) \cdot c_{wet}$$

$$u_i = \gamma_w \cdot \lambda \cdot Z_{s,i} \cdot \cos^2 \theta_i$$

$$W_i = \{ \gamma_{sat} \cdot \lambda + \gamma_{wet} \cdot (1 - \lambda) \} Z_{s,i} \cdot b_i$$

崩壊に及ぼす3要因の影響度合い

粘着力低下の影響度合い

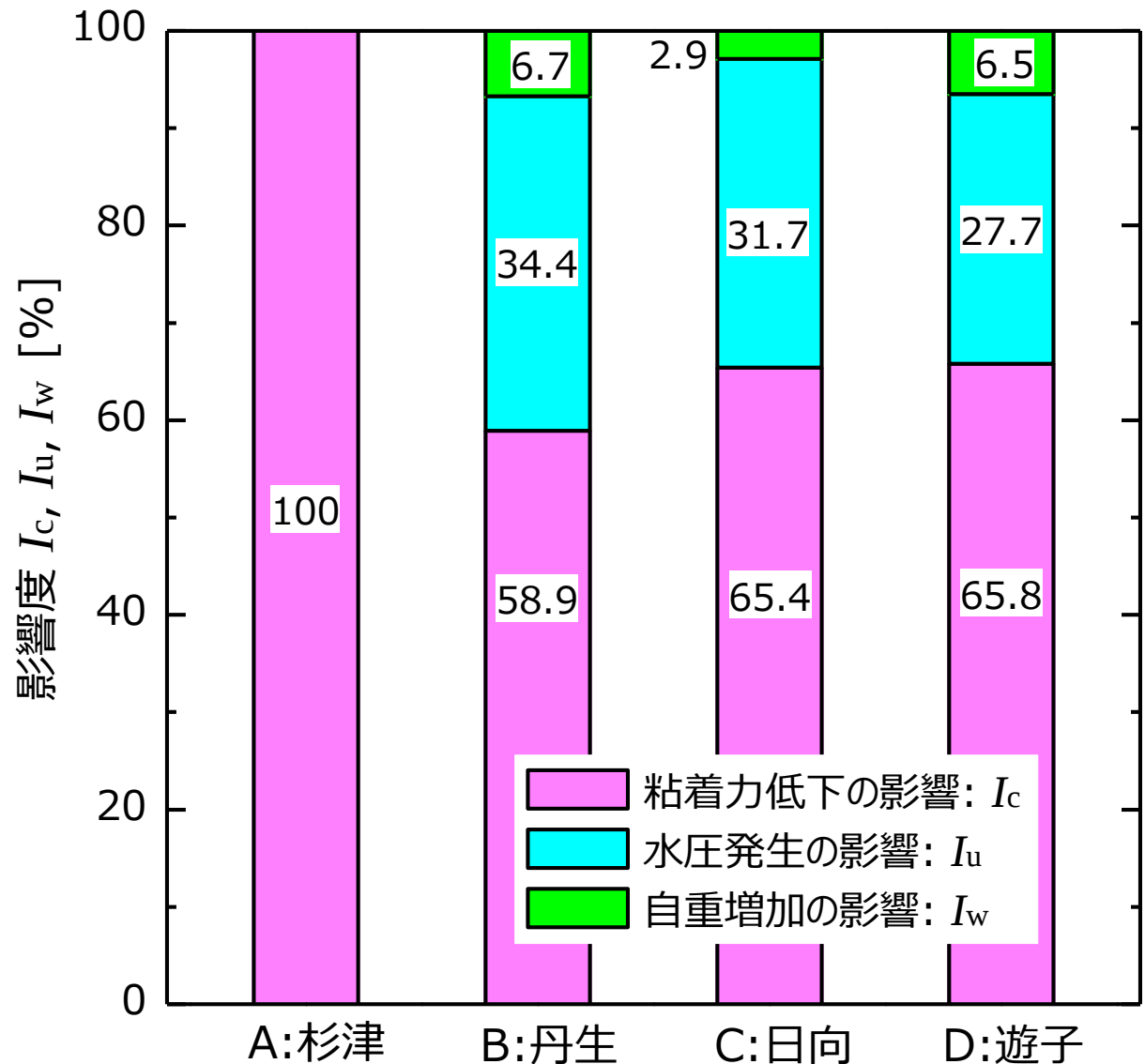
$$I_c = \frac{F_0 - F_c}{F_0 - 1} \times 100$$

水圧発生の影響度合い

$$I_u = \frac{F_0 - F_u}{F_0 - 1} \times 100$$

自重増加の影響度合い

$$I_w = \frac{F_0 - F_w}{F_0 - 1} \times 100$$



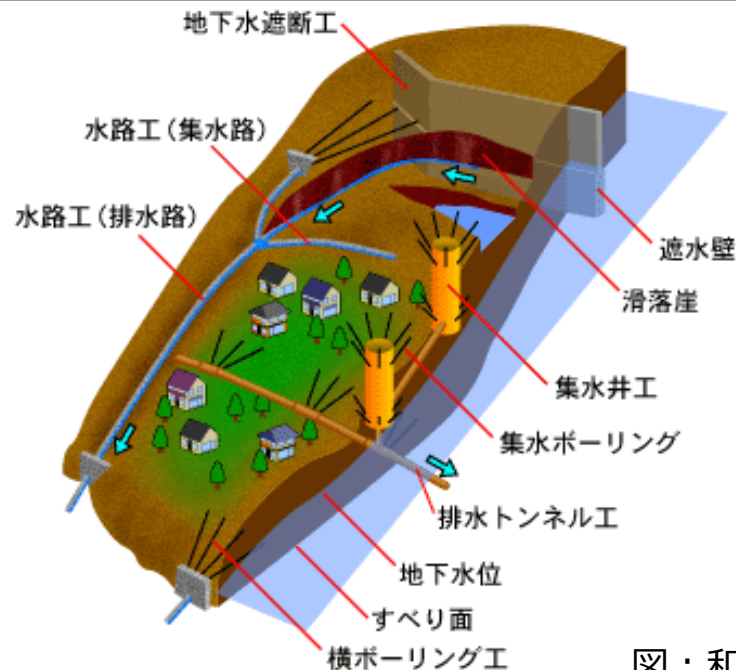
有効な対策工の選定に貢献？

地すべり対策工

抑制工

地形・地下水状態等の自然状態を変化させて地すべり活動を停止・緩和させる工法

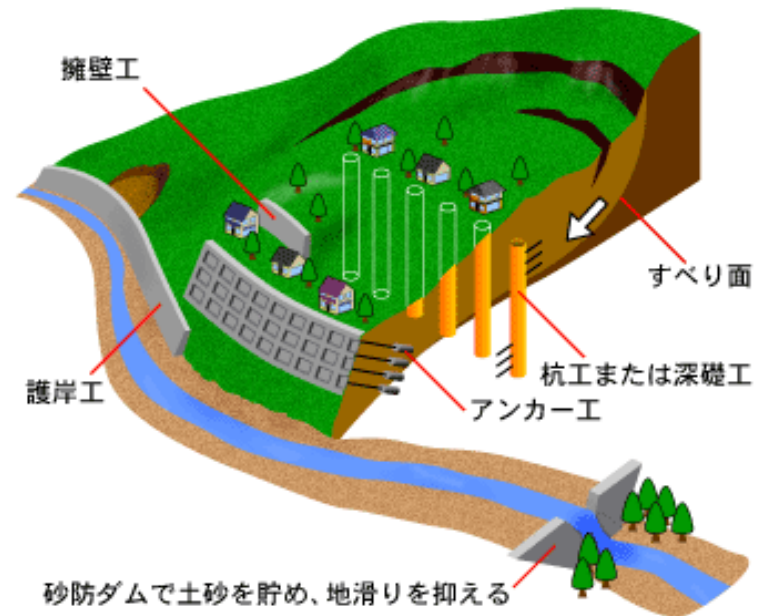
地表水排除工、地下水排除工
排土工、押え盛土工など



抑止工

構造物を設けることによって構造物のもつ抑止力により、地すべりの一部または全部を停止させる工法

杭工、アンカー工、シャフト工



図：和歌山県砂防課HPより

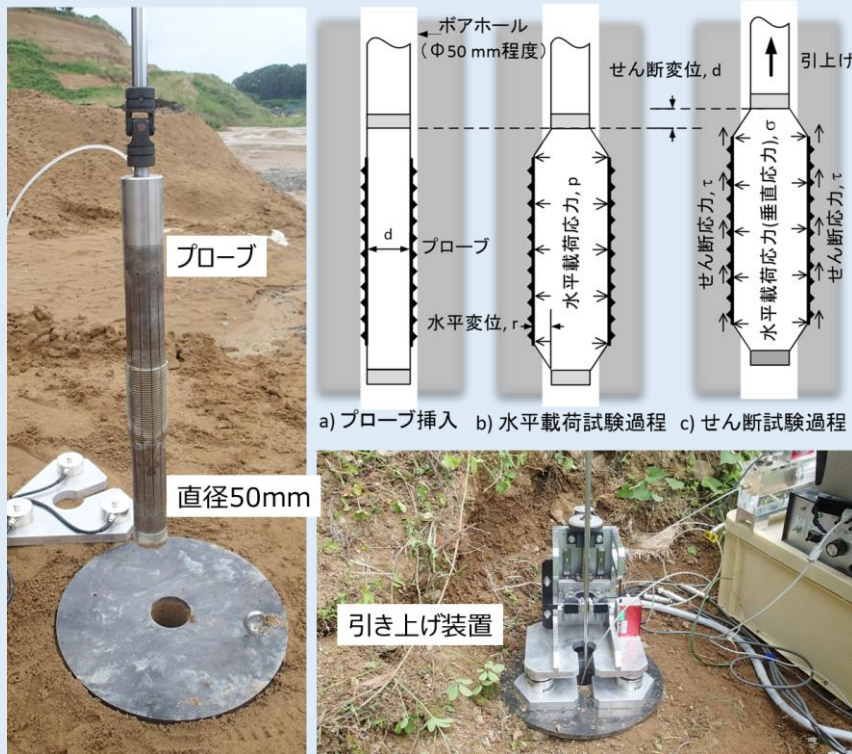
リアルタイム安定解析手法の提案

$$F = \frac{1}{\sum W_i \tan \theta_i} \sum \left\{ \frac{cb_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi}{\cos^2 \theta_i (1 + \tan \theta_i \tan \phi / F)} \right\}$$

強度定数 : c, ϕ

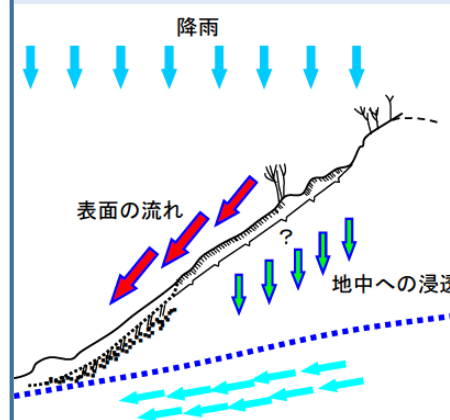
粘着力係数 : κ

$$\kappa = 1 - \frac{C_{sat}}{C_{wet}}$$

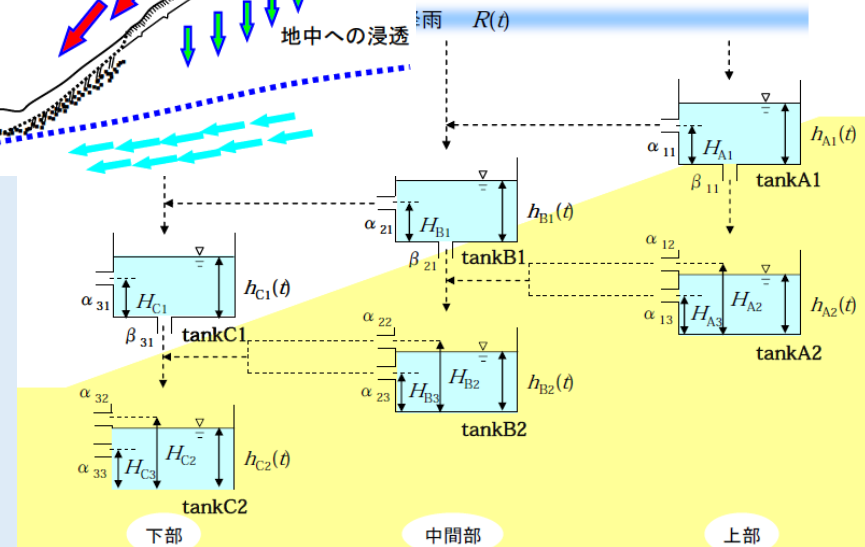


孔内せん断試験ツール

水位高係数 : $\lambda = \frac{Z_{w,i}}{Z_{s,i}}$

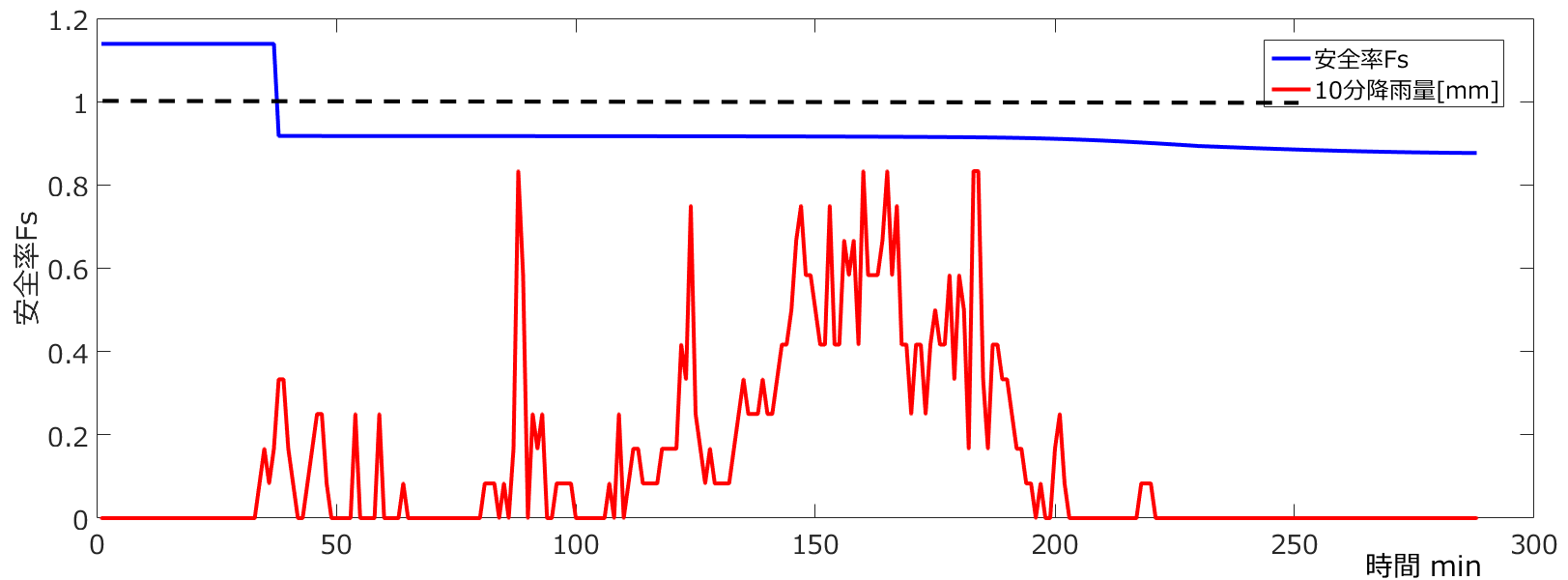
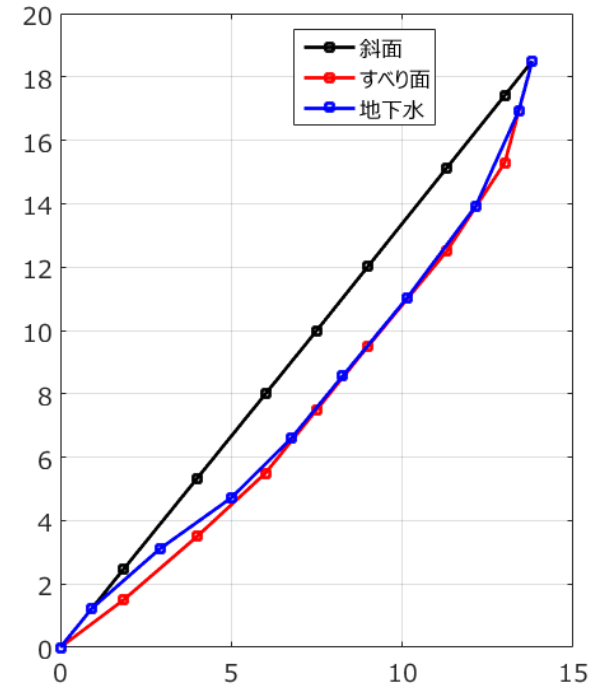


赤井 舞様 (京都大学大学院)
2008年修士論文より抜粋



マルチタンクモデルの応用

降雨量と安全率変化（計算結果）：A斜面：杉津



調査～解析～監視のシステム



現地調査
(大学・住民)



解析プラットフォーム
(大学研究室?)



クラウドサーバー?

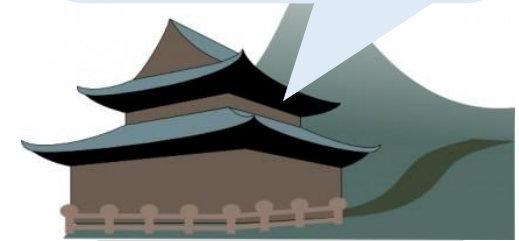


Web サイト提供 アラートメール



雨量データ
(雨量計の設置/気象庁アメダス)

危険な斜面の抽出
ハザードマップ



安全率の監視
(住民)