



# 斜面崩壊検知センサーの紹介 —その活用に向けて—

土木研究所  
土砂管理研究グループ  
火山・土石流チーム

## 背景

・近年大規模な土砂災害が発生している。これらの災害の発生をいち早く察知し住民を避難させるには斜面や河道に機器を設置し災害の発生をいち早く検知することが重要。



斜面崩壊



土石流

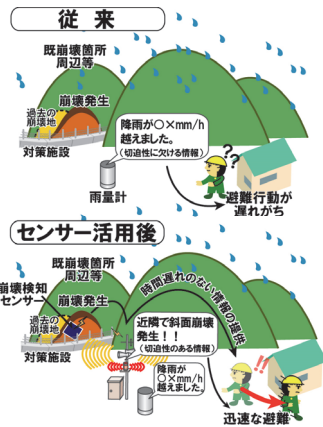
土木研究所では、安価かつ実用性に優れた機器として、①斜面崩壊検知センサー、②振動検知式土石流センサーを企業と共同開発した。

## 斜面崩壊検知センサーの目的

土砂災害に対する警戒避難は、降雨量を指標として運用が進んでいるが、思うように避難に結びついていないのが実態

降雨量を指標とした場合、切迫性を感じにくいという背景がある。  
逆に、その地域周辺で土砂災害が発生し始めているという危険情報を入手できれば、避難行動につながりやすいことが考えられる。

土砂災害が発生していることを知る具体的手法のひとつを提案  
→崩壊を検知できるセンサー開発



## 主な仕様

1. 検知機能：崩壊した事だけを検知する。
2. 耐用年数：約10年間を想定
3. 電源：バッテリー駆動（電池寿命5年間以上）
4. 伝達方式：無線通信（特定小電力無線）
5. 想定価格：センサ1台数万円程度
6. 設置条件：容易かつ人力で設置可能
7. 耐環境性：気象条件や環境等により機能障害が生じない

## [技術の概要]

5

●転倒検知タイプ…斜面崩壊によって、センサーが倒れる際に、検知信号を発生する形式→構造が単純、消費電力が少ない



通常はスリープ状態であり、内蔵タイマによる定期起動（自己診断）または内蔵転倒センサによる起動でIDと傾斜の発生及び傾斜発生時刻を送信



センサーが30度以上傾いたときに検知



内蔵する傾斜検知装置により斜面崩壊を検知し、特定小電力無線により受信機にデータを伝送

●傾斜角測定タイプ…崩壊検知だけでなく、傾斜角を常時測定する形式→崩壊の前兆をとらえることが可能



内蔵するセンサにより傾斜角度を測定するとともに、外付けの土壌水分計により土壌水分を測定し、一定時間毎に特定小電力無線によって受信機にデータを伝送

●斜面変位測定タイプ…斜面の変位から崩壊を検知する形式→センサー部への電源がまったく必要ない



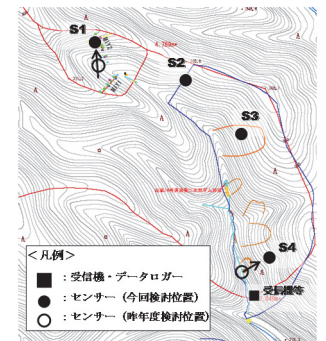
内蔵する鉄球がパイプのズレによりパイプ内部に放出されることで斜面崩壊を検知し、鉄球の自由落下により信号機を作動させ、複数の鉄球落下時刻をデータロガーに記録

## 設置事例

管内：国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所

場所：荒谷地区・宮内地区

目的：土砂災害警戒避難体制の強化



＜凡例＞  
 ■：受信機・データロガー  
 ●：センサー（今回検討位置）  
 ○：センサー（昨年度検討位置）

**[適用の効果]**

- リアルタイムな情報伝達
 

斜面崩壊の恐れが高い代表的な斜面にセンサーを予め設置しておくことで、管内全域の概略的な状況を、リアルタイムかつ広域的に監視することが可能
- 斜面崩壊前兆現象把握への活用
 

斜面崩壊発生をコントロールする土壌水分量や、斜面崩壊発生直前に出現すると考えられる斜面の傾斜変化や変位量を、容易に、連続的かつ定量的に把握することが可能であり、斜面崩壊に先立って注意喚起や警戒避難の判断材料とすることができる
- 工事の安全管理
 

工事現場付近で危険な箇所が複数ある場合、崩壊検知センサーを用いれば、面的に監視が可能。振動検知センサーやワイヤーセンサーなどの土石流監視機器を併設することで工事現場の安全確保の高度化を図ることが可能。
- 落石や鉄砲水、土石流検知への活用
 

落石の恐れがある巨礫等に設置すれば、巨礫の移動や衝突によるセンサの傾斜変化から落石発生の検知が可能。渓流の高位に設置すれば、水位上昇によりセンサが傾斜・転倒した場合、鉄砲水や土石流発生を判断することも可能。

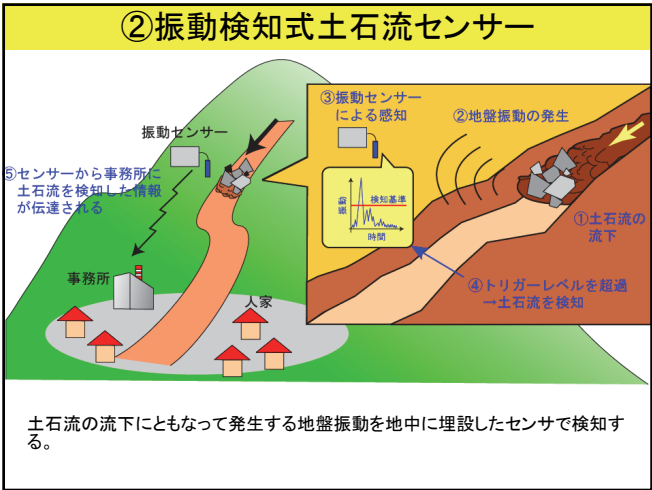
**[適用の条件と留意点]**

**適用の条件**

- 監視対象区域を設定する際は、土地占有の可否、アクセシビリティ、受信機側における商用電力受電の可否、検知データの遠方伝達手段等を確認・検討する必要がある
- センサ設置の際に、現地の地表状態等に適した固定方法がある
- 無線により情報を伝送するタイプのセンサを設置する場合、設置予定箇所において通信が可能

**適用上の留意点**

- 斜面が崩壊しても、落石等による衝突でセンサが破損した時は検知できない可能性がある。
- 動物がセンサに接触し、センサが傾くような衝撃を受けた場合、誤検知する可能性があるため、防護策を設けたり、地中に埋設するなどの対策を施す必要がある。
- 植生や地形の状況により、センサと受信機の見通しが悪い場合は無線が減衰する可能性がある。



**開発した振動センサー**

| 既存の振動センサー  | 土石流検知特化型  |
|--|---|
| <p>特徴: 土石流等の振動を検知して信号を発するセンサ。</p> <p>価格: 約230万</p> <p>閾値: 振幅値</p> <p>状況: 全国で100基以上が設置・運用</p>                                       | <p>特徴: 閾値に波形の形状を判別するアルゴリズムを組み込んだセンサ。インターネットを介して振動データをダウンロードできるため、現地に行かなくても波形記録を取得できる</p> <p>価格: 約150万</p> <p>閾値: 振幅値+波形形状</p> <p>実績: 桜島で運用中</p> |
| 現場汎用型  | 無線運用型   |
| <p>特徴: 閾値に継続時間を組み込んだセンサ。警報値を6段階設置でき、警報の経時状況から、発生規模の推定が可能</p> <p>価格: 約100万</p> <p>閾値: 振幅値+継続時間</p> <p>状況: 桜島・霧島で運用中(土石流の検知実績あり)</p> | <p>特徴: ヘリ等で空中から投下・設置できることを目的に開発。センサーから受信部までは無線で伝達</p> <p>価格: 10~20万</p> <p>閾値: 振幅値</p> <p>状況: 桜島で試験運用中(土石流の検知実績はなし)</p>                         |

**設置事例**

溪岸に振動を観測できるセンサーを設置する。土石流が発する地盤振動をとらえて検知する。

**崩壊発生時刻予測モデル**

H-slider法における無限長斜面安定の式(内田ら, 2009)

$$F_s = \frac{C + (\gamma h \cos^2 \theta - \bar{u}(t)) \tan \phi}{\gamma D \cos \theta \cdot \sin \theta}$$

不飽和へ拡張した地下水位の式 (Rosso et al, 2006)

$$h(t) = \frac{ArD}{K_s \sin \theta} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{1+e}{e-S_r} \frac{K_s \sin \theta}{A} t \right) \right] + h_0 \exp \left( -\frac{1+e}{e-S_r} \frac{K_s \sin \theta}{A} t \right)$$

$$r = \frac{K_s \sin \theta [c(1+e) + \gamma_w D \cos \theta (G_s + eS_r) (\cos \theta \tan \phi - \sin \theta)]}{A \gamma_w \cos \theta [(1+eS_r) \cos \theta \tan \phi + (e - eS_r) \sin \theta]} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{1+e}{e - eS_r} \frac{K_s \sin \theta}{A} t \right) \right]$$

C: 土の粘着力,  $\theta$ : 斜面勾配,  $\gamma$ : 土の単位体積重量, A: 集水面積, r: 降雨強度, D: 土層厚,  $\phi$ : 土の内部摩擦角,  $K_s$ : 土の飽和透水係数, e: 含水比,  $S_r$ : 飽和度, t: 時間, h: 水深,  $h_0$ : 初期水深

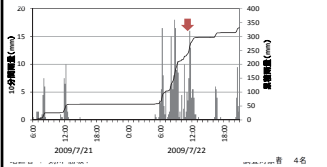
採用した土質定数

| 等価透水係数   | 0.05 cm/s              | 観測結果     |
|----------|------------------------|----------|
| 土の粘着力    | 6.00 kN/m <sup>2</sup> | 崩壊実績より逆算 |
| 土の内部摩擦角  | 35.0°                  | 土質試験結果   |
| 飽和単位体積重量 | 18.1 kN/m <sup>3</sup> | 同上       |
| 遷滲単位体積重量 | 15.2 kN/m <sup>3</sup> | 同上       |
| 飽和度      | 0.3714                 | 同上       |
| 間隙比      | 0.8893                 | 同上       |
| 水の単位体積重量 | 9.8 kN/m <sup>3</sup>  | 一般値      |
| 土層厚      | 簡易貫入試験結果より逆算           | 12       |

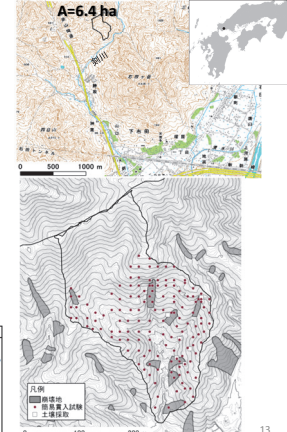
### 検証事例の概要

- 山口県防府市剣川**
- パラメータの不確実性をできるだけ排除するためにHslider実施箇所
  - 簡易貫入試験: 140地点
  - 土質試験: 7地点
  - 崩壊箇所: 8箇所/137箇所(剣川全体)

#### 災害発生事例: 2009年7月21日

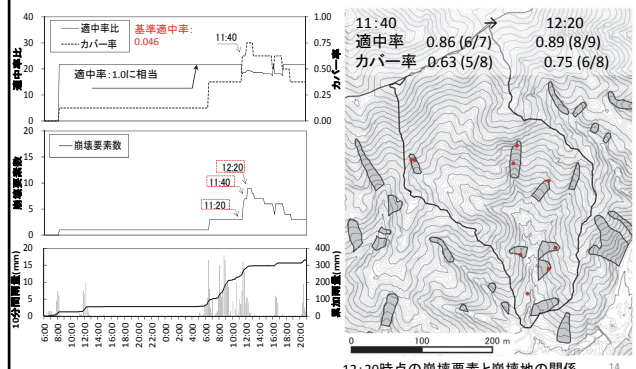


| 崩壊時刻   | 崩壊位置 | 崩壊原因             |
|--------|------|------------------|
| 午前10時頃 | 子ノ   | 8時10分頃、雨雲262号されい |
| 11時頃   | 崩壊箇所 | 崩壊箇所             |
| 12時頃   | 崩壊箇所 | 崩壊箇所             |



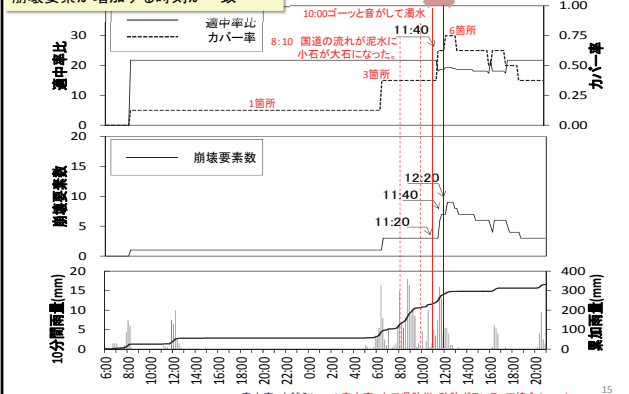
### 再現性の検証(1)位置の検証及び時刻の検証

- ・ハイトと比較するため適中率などが時系列的に変化する。
- ・崩壊箇所の増加率が大きい時刻はヒアリング調査結果と一致していた。
- ・従来のHslider等で指摘されるカバー率の増加に伴う空振り率の上昇はみられない。



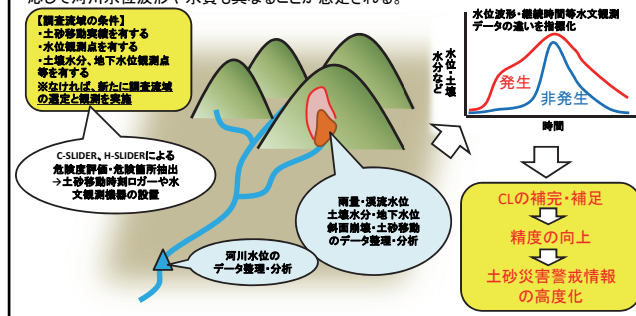
### 再現性の検証(2)発生時刻の検証

#### 剣川一帯の土石流の目撃時刻と崩壊要素が増加する時刻が一致



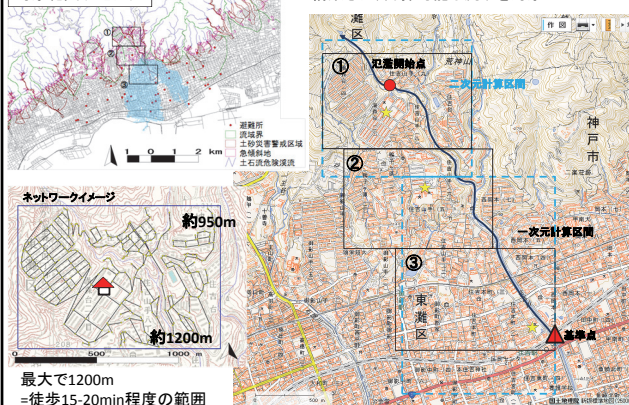
### 溪流流量の観測(災害発生時の切迫性の把握)

- 土砂災害発生の危険度を判断する指標として、雨量以外に河川流量(水位)や土壌水分・地下水位等を導入し、斜面崩壊(表層崩壊)発生の危険度を適切に判断することを目指す。
- 斜面崩壊の発生と非発生で、斜面の水分状態(土壌水分・地下水位)は異なり、それに応じて河川水位波形や水質も異なることが想定される。



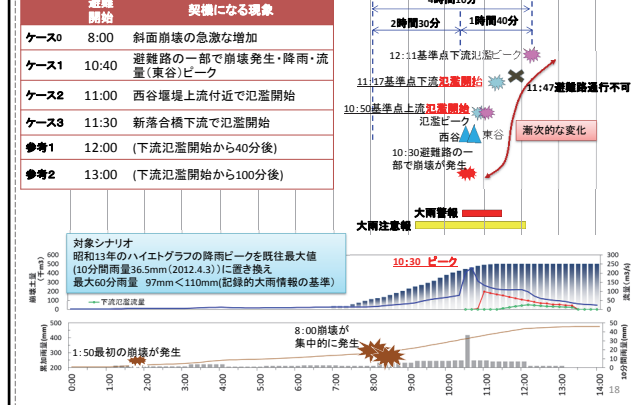
### 災害時の避難行動の分析 一六甲山系住吉川流域の3地区

→すでに、崩壊発生～土砂氾濫のモデルが構築され、計算可能な流域を対象



### 土砂災害の時系列シナリオ

✓ 崩壊が集中して発生し始めるタイミングと氾濫被害の生じるタイミングは2時間以上の差

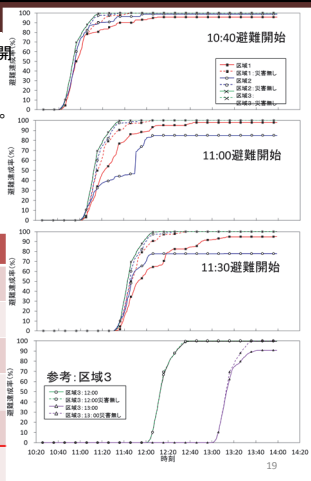


計算結果

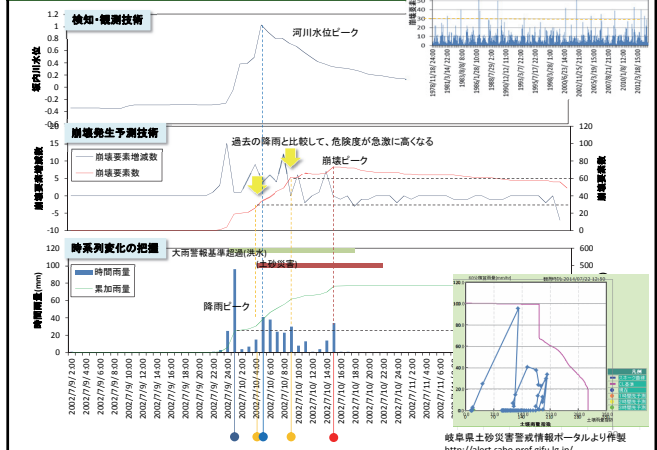
- ✓ 崩壊が集中して発生し始める時間帯の避難開始では避難遅延なし。
- ✓ 降雨ピーク後の避難開始では、避難遅延あり。
- ✓ 区域2では全体の20%の避難者が経路途絶
- ✓ 区域1と区域3では、避難遅延時刻に1時間半以上ある。

表. 配置した住民の80%が避難を達成するまでの時間

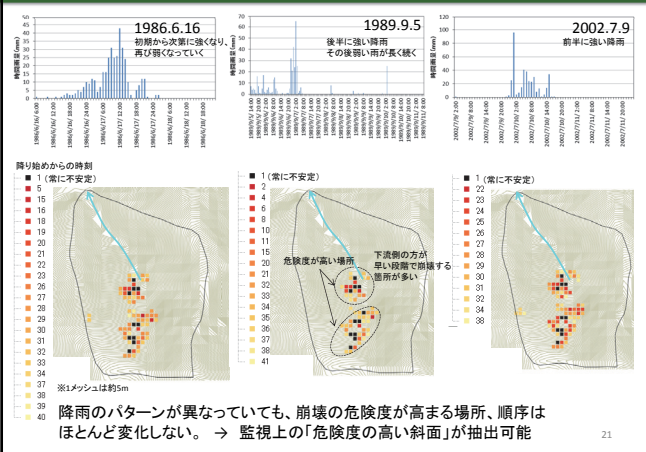
| 開始時刻 | 区域1   | 区域2                | 区域3     |
|------|-------|--------------------|---------|
| ケース0 | 8:00  | 0:27:10            | 0:21:10 |
| ケース1 | 10:40 | 0:31:40            | 0:21:10 |
| ケース2 | 11:00 | 0:41:30            | 0:21:10 |
| ケース3 | 11:30 | 0:51:20 (80%に満たない) | 0:21:10 |
| 参考1  | 12:00 | -                  | 0:21:10 |
| 参考2  | 13:00 | -                  | 0:26:20 |



過去の降雨による災害シナリオ作成例



崩壊発生予測計算例: 土砂災害危険度の高い3降雨



[適用実績と問い合わせ先]

適用実績

- 国土交通省（北海道開発局、東北地整、関東地整、中部地整、近畿地整、中国地整、四国地整）の11事務所管内に適用済み（H25.3調べ）

問い合わせ先

- (独) 土木研究所 土砂管理研究グループ 火山・土石流チーム  
TEL.029-8798-6785

ご静聴ありがとうございました

