

博 士 論 文

斜面災害防止のための早期警報システムの開発と運用

瀬 古 一 郎

目 次

	頁
1．既往の研究および資料	1
1．1 はじめに	1
1．2 斜面崩壊のメカニズムに関して	2
1．3 崩壊を検知するためのモニタリング機器に関して	2 5
1．4 警戒警報や住民の避難に関して	4 3
2．研究開発の動機と概要	6 3
2．1 背景と動機	6 3
2．2 研究開発の内容と目標	6 5
2．3 研究開発に対する社会的ニーズ	6 8
2．4 技術開発成果の実用化に関する新規性と応用性	6 9
3．研究開発の内容	7 1
3．1 開発の経緯	7 1
3．2 双方向無線通信システムの開発	7 4
3．2．1 通信系の開発の概要	7 4
3．2．2 システム構成	7 4
3．2．3 通信系（親機・子機）の仕様	7 5
3．2．4 無線通信試験	7 8
3．2．5 短距離無線を用いたセンサーノードの開発	8 2
3．2．6 まとめ	9 0
3．3 斜面崩壊検知センサーの開発	9 1
3．3．1 開発の概要	9 1
3．3．2 斜面崩壊センサーの仕様	9 1
3．3．3 動作確認試験	9 4
3．3．4 神戸市六甲砂防斜面における長期動作確認試験	9 8
3．3．5 まとめ	1 0 3
3．4 小型孔内傾斜計の開発	1 0 5
3．4．1 開発の概要	1 0 5
3．4．2 小型孔内傾斜計の仕様	1 0 5
3．4．3 小型孔内傾斜計の試作	1 0 6
3．4．4 神戸市六甲砂防斜面における確認試験	1 1 0
3．4．5 まとめ	1 1 4
4．実証実験	1 1 5
4．1 概要	1 1 5
4．2 中国・都江堰市における斜面崩壊実験による検証	1 1 6

4 . 2 . 1	実験の概要	．．．．．	1 1 6
4 . 2 . 2	実験箇所と機器設置	．．．．．	1 1 7
4 . 2 . 3	人工降雨試験結果	．．．．．	1 2 1
4 . 2 . 4	まとめ	．．．．．	1 3 5
4 . 3	中国・都江堰市における地すべりへの適用	．．．．．	1 3 6
4 . 3 . 1	現地および設置の状況	．．．．．	1 3 6
4 . 3 . 2	試験結果	．．．．．	1 3 8
4 . 3 . 3	まとめ	．．．．．	1 4 0
4 . 4	中国・三峡ダム湛水区域における地すべりへの適用	．．．．．	1 4 1
4 . 4 . 1	概要	．．．．．	1 4 1
4 . 4 . 2	地すべりの状況と観測システムの構成	．．．．．	1 4 1
4 . 4 . 3	地すべり崩壊時におけるモニタリング結果	．．．．．	1 4 4
4 . 4 . 4	まとめ	．．．．．	1 4 6
4 . 5	国道脇の斜面崩壊における二次災害防止への適用	．．．．．	1 4 7
4 . 5 . 1	斜面崩壊現場と斜面崩壊検知センサー設置の状況	．．．．．	1 4 7
4 . 5 . 2	観測結果	．．．．．	1 5 0
4 . 5 . 3	まとめ	．．．．．	1 5 2
4 . 6	国道脇の斜面崩壊における二次災害防止への適用	．．．．．	1 5 3
4 . 6 . 1	現地の状況	．．．．．	1 5 3
4 . 6 . 2	調査・観測機器の設置状況	．．．．．	1 5 5
4 . 6 . 3	観測結果	．．．．．	1 5 6
4 . 6 . 4	地すべりの滑動メカニズム	．．．．．	1 6 2
4 . 6 . 5	斜面崩壊検知センサーと他の観測機器との比較	．．．．．	1 6 2
4 . 6 . 6	まとめ	．．．．．	1 6 6
4 . 7	切土工事における安全確保への適用	．．．．．	1 6 7
4 . 7 . 1	現地状況	．．．．．	1 6 7
4 . 7 . 2	傾斜角変位の異常と対策	．．．．．	1 6 8
4 . 7 . 3	施工中の斜面監視の有用性	．．．．．	1 6 9
4 . 7 . 4	まとめ	．．．．．	1 7 0
4 . 8	設置実績	．．．．．	1 7 1
5	斜面災害リスクのリアルタイム評価手法の検討	．．．．．	1 7 3
5 . 1	概要	．．．．．	1 7 3
5 . 2	傾斜角変位速度による異常値検出	．．．．．	1 7 3
5 . 2 . 1	傾斜角変位速度と崩壊（安定）までの残余時間	．．．．．	1 7 3
5 . 2 . 2	傾斜計の監視基準（案）の設定	．．．．．	1 7 6
5 . 2 . 3	伸縮計の監視基準との比較	．．．．．	1 7 8
5 . 2 . 4	まとめ	．．．．．	1 7 9
5 . 3	体積含水率（降雨量）による異常値検出	．．．．．	1 8 0

5.3.1	体積含水率と傾斜角変位との対応	180
5.3.2	土壌雨量指数との関係	181
5.3.3	降雨関連データによる異常値検出	183
5.3.4	まとめ	183
5.4	設置位置および手法による異常値検出	184
5.4.1	実証実験における設置手法	184
5.4.2	工事法面における設置位置	186
5.4.3	家屋被災範囲に応じた設置位置	187
5.4.4	設置手法	189
5.4.5	まとめ	191
5.5	ノイズ低減（分解能の改善）による異常値検出	191
5.5.1	MEMSセンサーの温度補正	191
5.5.2	シールドによるノイズ低減	193
5.5.3	時間移動平均処理によるノイズ低減	194
5.5.4	まとめ	195
5.6	リアルタイム・サンプリングに関する考察	196
5.6.1	傾斜角変位の加速度	196
5.6.2	サンプリング間隔	197
5.6.3	まとめ	199
5.7	種々の斜面に対する適用性	200
5.7.1	斜面崩壊メカニズムへの適用性	200
5.7.2	斜面観測機器の比較	203
5.7.3	まとめ	204
5.8	斜面災害リスクのリアルタイム評価手法の活用	204
5.8.1	総合的災害リスクマネジメント	204
5.8.2	海外の現場への適用性	205
5.8.3	まとめ	207
6	結論および今後の課題	208
6.1	目標に対する評価	208
6.2	結論	209
6.3	今後の課題	211
7	謝辞	214
8	参考文献	215
9	発表論文リスト	224

1．既往の研究および資料

1．1 はじめに

土砂災害を誘発する集中豪雨は近年、激甚化している。平成 25 年 10 月伊豆大島で 24 時間降雨量 800 mm 超の豪雨により、平成 26 年 8 月広島市では時間 115mm の豪雨により土石流災害が発生し、いずれも多数の死者・行方不明者を出した。これらの災害では豪雨が深夜に及び、警報を出すタイミングが難しく避難が容易でない状態で大きな被害に至った。広島市豪雨災害の場合、斜面近傍まで宅地開発が進んでおり、夜間に停電も発生して事態をさらに悪化させたとみられる。近年、土砂災害が激甚化し、それが毎年繰り返される状況になってきており、より有効な対策を必要としている。

土砂災害のおそれのある箇所は全国に 52 万ヶ所、土砂災害警戒区域 33 万ヶ所、土砂災害は年平均 1100 件発生⁷³⁾⁷⁴⁾している。警戒区域のうち急傾斜地警戒区域は 21 万ヶ所⁷²⁾あるが、その整備率は 2 割程度で、事業費のかかるハード対策では被害に追いつかない状況になっている。国土交通省と気象庁は 2007 年から土砂災害警戒警報⁵⁵⁾を運用した。これは、既知および予測の降雨量に基づいて、土壌雨量指数と 1 時間積算雨量でスネークラインを引き、5 km メッシュ毎に災害危険予測を行うものである。ただし、斜面毎の危険度を判定するものではないし、雨量以外の要因を考慮していない。また、国土交通省は土砂災害警戒避難ガイドライン⁵⁶⁾により、前兆現象⁵⁸⁾に留意することを付記した。つまり、人の経験や直感に頼らざるをえない部分がいまだに大きいということでもある。

前兆現象は斜面内部の変形に応じて発生⁵⁷⁾するものである。斜面内の微小な応力ひずみ状態を計測できれば斜面の危険性を数値で評価できる。同じような飽和度（90% 程度）と間隙水圧で崩壊すると報告¹⁰⁾¹¹⁾され、斜面のひずみ速度と崩壊までの残余時間の関係⁵⁾⁶⁾⁷⁾が明らかになっている。すなわち、降雨量あるいは土壌水分（体積含水率）とひずみ（傾斜量）を計測することにより、斜面の変状を予測しえるのではないかということである。斜面の微小な変状や異常値をいち早く検出することができれば、素早い警報や避難、対策工の施工に結びつき、2 次災害防止や、復旧工事の安全も確保できる。

計測については、米国などで 2002 年頃からセンサーネットワークが開発⁴⁹⁾され、日本でも東京ガスで SUPREME⁵¹⁾などの実施例がある。斜面計測用の機器^{28)~48)}は概して精度に反比例して高価になり専門性を必要とし取り扱いが難しくなるのが実情である。このため、数多くある危険斜面をモニタリングするためには、第 1 に、安価で扱いやすく判定基準が明確でわかりやすい計測機器を開発する必要が生じる。IT の進展により MEMS 素子の傾斜センサーが開発され、インターネット、ZigBee などの新たな通信系が普及している。こうした新たな技術を利用して、リアルタイムで遠隔地から斜面の傾斜を計測し、早期警報に結びつけるシステム構築を目指す。

様々の崩壊メカニズム^{1)~27)}があるが、まずは数が多い急傾斜地や浅層崩壊を対象として検討する。他の崩壊メカニズムについては実証実験などを通して逐次検討するものとする。その上で、次のような点に着眼し、目標としてとらえ、早期警報システムを開発し斜面防災に役立てていくものとする。

安価で、簡便に設置・移動でき、僻地でも維持管理を容易にでき、かつ、監視基準が明確なこと
メッシュなどの地域毎ではなく、斜面毎に前兆現象に通じる斜面内部の変状を観測できること
亀裂や滑落崖の有無に関わらず、崩壊メカニズムや法面の状況に即して設置できること
リアルタイム、かつ、直接、住民へ通知でき迅速な避難に資すること

1.2 斜面崩壊のメカニズムに関して

斜面災害は、地形や地質的な素因の上に、降雨・融雪や地震などの誘因が働き、あるいは、それらが複合的に起こって発生する。

東畑¹⁾は、斜面に沿った土塊の動きを図1-1のように単純化し、斜面と土塊との間の摩擦角 ϕ により、 $H/L = \tan \phi$ になるとした。これは2次元の直線的な斜面の場合であり、実際の谷地形は曲がっていて、エネルギーが衝突により消失するためLを決めるのは難しいが、斜面の高さ(H)と長さ(L)という地形の状態が斜面崩壊に関する第1の素因としている。

現存する最も大規模な崩壊として、イラン・イースラム州 Seymareh 地すべりを紹介し、これは幅16km、長さ(L)5km、高さ(H)300m、傾斜角(ϕ)3.4度とある。崩壊土量が多いほど、 H/L 値は小さくなる傾向とされ、 ϕ が小さい場合でも崩壊することを示唆している。

一方、土砂災害防止法(正式名称は「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」、平成13(2001)年4月1日施行)の施行令の「崩れ」の警戒区域の指定条件は次の通りである。すなわち、傾斜角度(ϕ)で30度以上、高さ(H)で5m以上の急傾斜で、また、傾斜地の上端から10m以内、傾斜地の下端から傾斜地高さHの2倍(最大50m)までの区域を指定するもので、地形的条件の中でも高さ(H)と傾斜角度(ϕ)に応じて指定される。

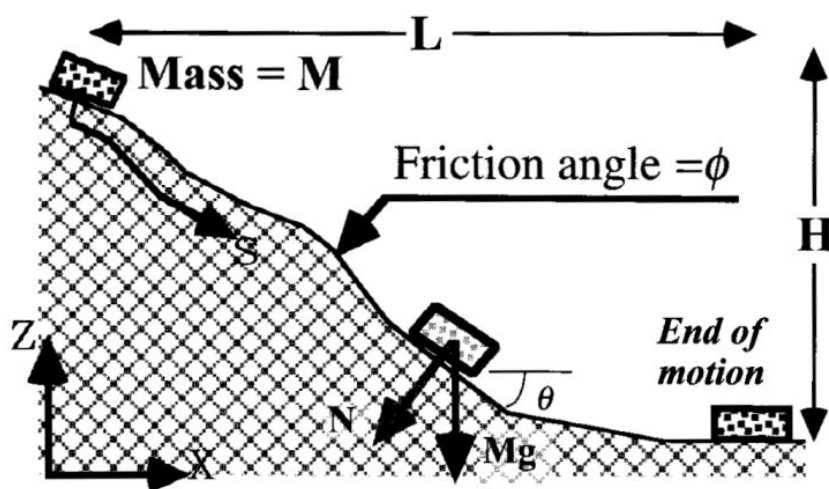


図1-1 斜面に沿った土塊の動き¹⁾

千木良²⁾は、近年の斜面災害の傾向や地質的な特徴について述べている。それらを表1-1にまとめた。

地質的には、流れ盤、火山灰や降下火災物の堆積物や透水性に差のある地層境界面、山火事による堆積物、炭酸塩岩の溶食と破断、古い地すべり面、また、地形的には、すべり面となるような地層末端部での切断、谷埋めや谷中谷の構造、滑落崖の存在などを、斜面崩壊を引き起こす地盤的な素因としてあげた。その上で、地震や降雨によって斜面崩壊が誘発されるとした。

表 1 - 1 近年の斜面災害²⁾

誘因	分類	地質的・地形的な特徴（および事例）	すべり面・地域
地震	谷を埋める降下火砕物の崩壊	水の集まりやすい地形、斜面に平行な構造、地層が下部で切断（2009 年パダン地震、2011 年東日本大震災）	表層崩壊（すべり面深さは 2～9m）
	逆断層の上盤、炭酸塩岩、谷埋め堆積物、谷中谷	炭酸塩岩が溶食によって凹凸に富み、地震動により破断（2008 年汶川地震）	谷中谷は西南日本外帯に広く分布し、古い地形面末端を切断
	対岸衝突地すべりの下部切断	古い地すべりが対岸に衝突し停止し不安定化したもの（2008 年岩手宮城内陸地震・荒砥沢地すべり）	深層崩壊
	地震前の降雨の影響	地震前の降雨が多いと谷の堆積物が飽和し地震で液化化、崩壊する。（2007 年能登半島地震、2007 年新潟県中越沖地震）	
降雨	山体重力変形	発生前に将来の冠頂に小崖を形成（事前に重力変形）（2011 年台風 11 号）	深層崩壊。紀伊山地・四国山地・九州山地など
	火山灰斜面	高透水性の暗灰色火山灰が低透水性かつ弱い褐色風化火山灰の上に載り、すべり面を形成（2011 年 7 月九州北部豪雨）	
	特殊な地質構造	斜面中腹から下部で褐色土を覆う山火事で形成堆積されたと思われる黒色土との境界上で発生（2010 年広島県の豪雨）	表層崩壊

平成 26(2014)年、国土交通省は土砂災害警戒区域における基礎調査結果を報告³⁾した。昭和 47(1972)年～平成 19(2007)年までのがけ崩れ災害 約 19,000 件から、多様な降雨確率規模のものを含め、土砂災害警戒区域の指定条件を含んだ形で、崩土の到達距離は斜面高さの 2 倍までで最大 50m と報告した。図 1 - 2 に示すように、崩土の到達距離 50m 未満は 98.2%、崩土の到達距離 / 崩壊高さ < 2 は 96.2%、崩壊の約 9 割は崩土の到達距離が 15m 程度以内、崩土の到達距離 / 斜面高さは 1 程度以内であった。

同省は、平成 24(2012)年度九州北部豪雨における阿蘇地域の土砂災害発生メカニズムを整理し、火山地域における表層崩壊リスクを評価する手法を検討³⁾した。阿蘇地域の災害の土砂移動現象のイメージは図 1 - 3 のように整理され、(1)火山灰を主体とした表層土が滑り落ちる表層崩壊、(2)カルデラ壁の中腹から脚部にかけて発達する崖錐斜面の崩壊、(3)カルデラ壁の裾野に厚く堆積した降下火砕物斜面の崩壊、(4)中央火口丘の草地や林地の急斜面の表層崩壊に分類された。斜面崩壊は、地形的および地質的な違いにより発生メカニズムが異なり、それに応じて、被害の程度も異なってくるとした。

(1)の場合は、降雨によって表層土が斜面上部から浸食され、流動化して、立木などを巻き込み土石流化していくと考えられる。(2)(3)(4)については、降雨によって地下水位の上昇とすべり面における有効応力の低下をきっかけとして、表層すべり、円弧すべり、あるいは、深層すべりなどの崩壊の形態の差があるにしても、せん断抵抗の弱い部分からすべり面に沿って変形していくものと考えられる。

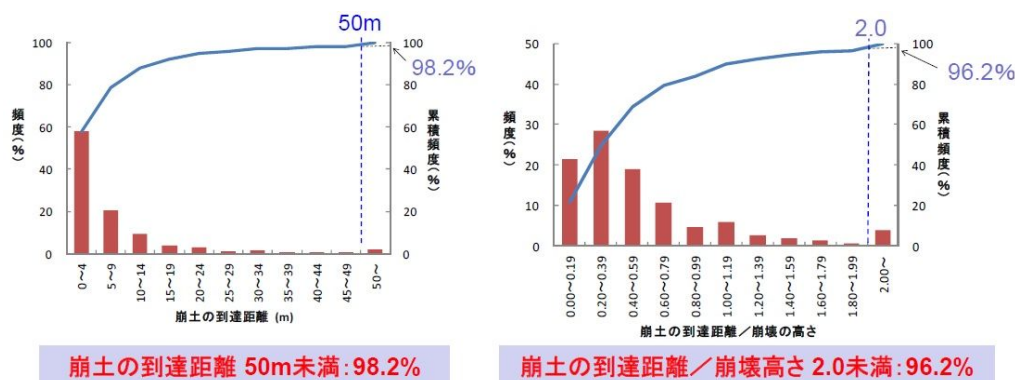


図 1 - 2 土砂の到達距離と崩壊高さの関係³⁾

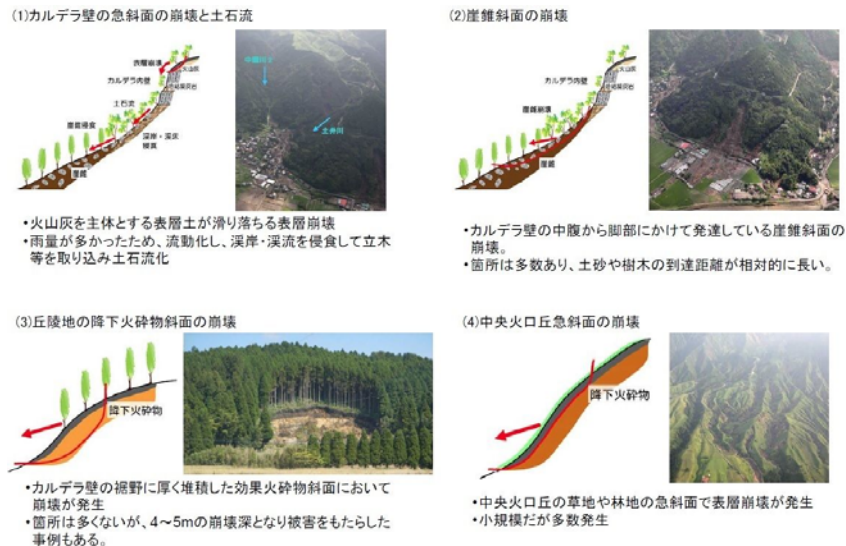


図 1 - 3 阿蘇地域での崩壊発生メカニズム³⁾

国土交通省⁴⁾によれば、図 1 - 4 に示すように、平成 20 (2008) 年～24 (2012) 年にかけて 3～5 月の融雪期、6～8 月の梅雨期、8～10 月の台風期に多くの土砂災害が発生し、地形や地質的な素因に加え、降雨や地下水などによって斜面崩壊が誘発されることがわかる。

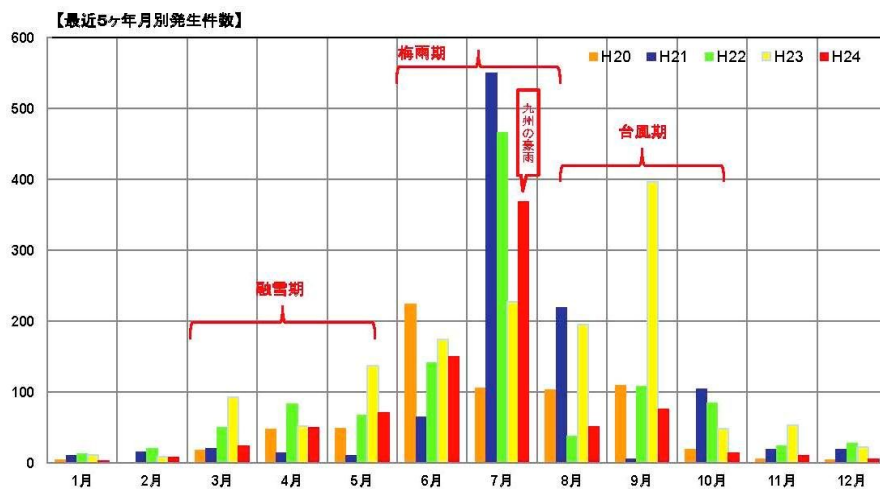


図 1 - 4 最近 5 カ年の土砂災害の月別発生件数⁴⁾

斎藤ら⁵⁾は、昭和 24 (1949) 年～昭和 26 (1951) 年と昭和 33 (1958) 年～昭和 34 (1959) 年にかけて、人工降雨による崩壊実験を行い、地表変位、地中変位、地表ひずみ、地中ひずみ、地表傾斜、土圧、含水量、間隙水圧などを測定した。土圧は崩壊数分前に初めて変化するが、ひずみと傾斜は崩壊 30 分以上前から著しく変化し、特に、傾斜の変化が漸移的なのに対しひずみは急変した。筆者としては、傾斜がひずみと同様に早期に変化した点、および、ひずみよりも漸移的に変化する点に注目し、傾斜を用いた斜面内の応力状態の把握に努めたい。

ここで、傾斜については室内試験で確認できないため、室内試験で確認できるひずみを予測因子として採用し、昭和 41 (1966) 年に、斜面のひずみ量を測定することによって斜面崩壊時期を予知できる可

能性を示唆した。

クリープ破壊試験では、ひずみ速度がしだいに減少する1次クリープ、ひずみ速度が一定の2次クリープ、ひずみ速度がしだいに増大する3次クリープの段階を経て破壊する。2次クリープの勾配である（定常）ひずみ速度とクリープ破壊時間との関係は、図1-5にみられるように、両対数図表上で帯状に分布した。その関係式として、

$$\text{Log}_{10} t_r = 2.33 - 0.916 \times \text{Log}_{10} \dot{\epsilon} \pm 0.59 \quad \text{式(1)}$$

を示した。ここで、

t_r : クリープ破壊時間（分）

$\dot{\epsilon}$: 二次クリープのひずみ速度（ 10^{-4} /分）

である。

この関係は土の種類や試験方法が異なっても成立し、国内だけでなく海外の試験結果に対しても適合したとされる。実測例が少ないが、いずれの場合でもこの関係に適合するので、斜面のひずみ速度を測定することにより斜面崩壊時期を予知することは可能と結論づけた。

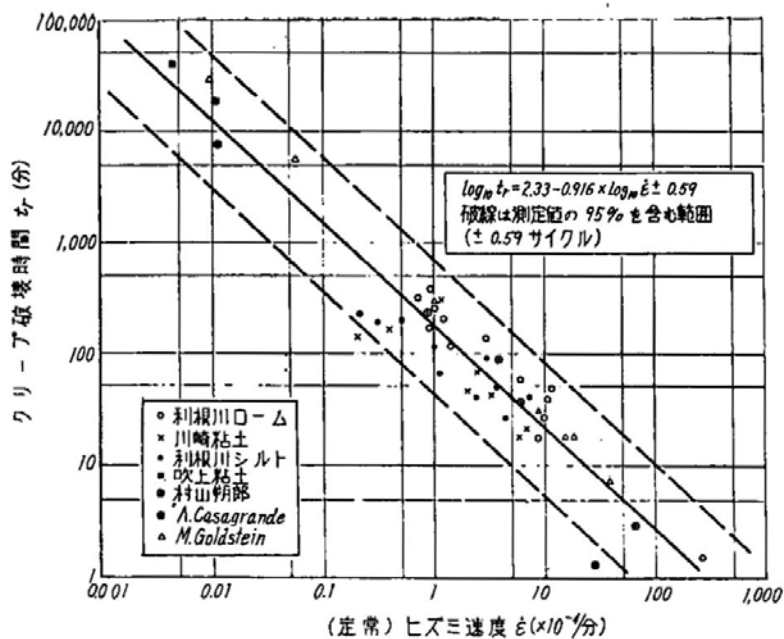


図1-5 ひずみ速度とクリープ破壊時間との関係⁵⁾

次いで、1968年に斎藤⁶⁾は、昭和41年7月に東北本線浅虫で発生した地すべり記録から3次クリープのひずみ速度と崩壊までの残存時間（ $t_r - t$ ）との関係を整理し、図1-6に示すように2次クリープの場合と同様、両対数図表上で直線的に表されることを示した。

3次クリープの場合、現時点を t 、クリープ破壊時点を t_r 、 $\dot{\epsilon}$ を時間 t のときのひずみ速度とすると、

$$\text{Log}_{10} (t_r - t) = a - b \times \text{Log}_{10} \dot{\epsilon} \quad \text{式(2)}$$

となり、 a 、 b を3次クリープ段階の移動曲線に適合するように決める必要があるとした。

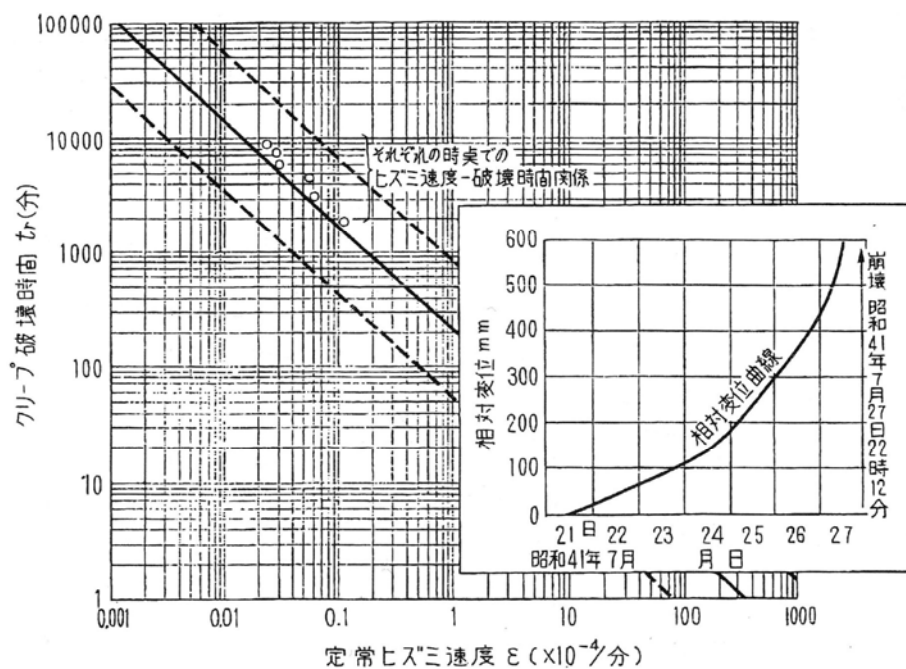


図1 - 6 浅虫地すべりにおける観測記録（自記装置による）⁶⁾

斜面の変状が進んで崩壊に近づいていくとき、ひずみ速度が漸次増大し、変状の初期においては2次クリープから概略的予測を行い、崩壊に近づいたときに3次クリープから近接的予測を行うことを推奨した。ひずみ量と時間の図から破壊時間 t_r を求める図式解法も併せて呈示した。初期時点をできるだけ早くとして予測を開始し、測定期間を長くとることが、崩壊日時の予測を実際の日時に近づけるための最良の方法と述べた。

図1 - 7は、図式解法を用いて警戒中の最新の観測データを入手してプロットしつつ、3次クリープ曲線の形を検討して精度の高い崩壊日時の予知を行った例である。この例では2つの異なる基準線について崩壊時期の予測を行った。

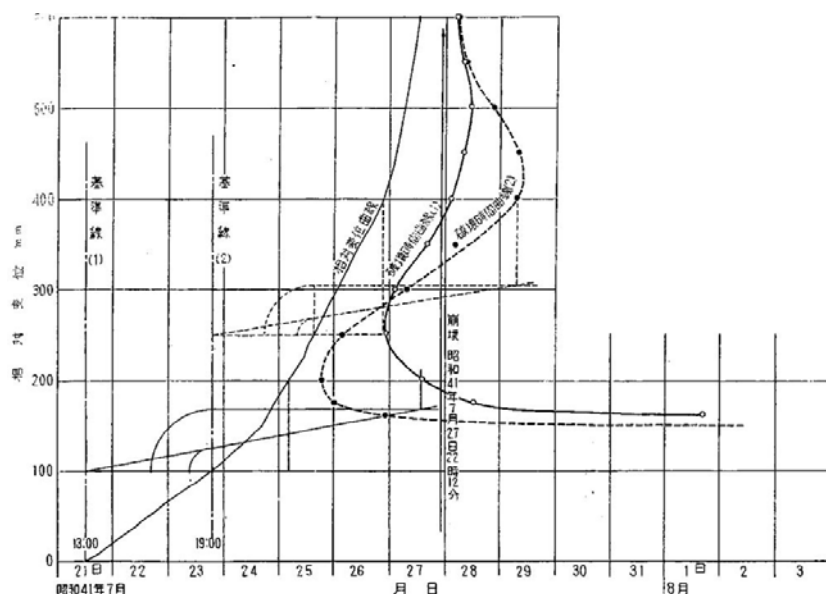


図1 - 7 東北本線・浅虫付近における地すべり(S41年7月)についての図式解法の適用例⁷⁾

さらに、斎藤⁷⁾は昭和 62 (1987) 年に、崩壊予測についての批判に答える形で論文発表した。この中で、クリープ段階を 3 つに分けたが、常に 3 段階を経過して破壊に至るわけではなく、1 次クリープの現れないもの、2 次クリープが現れないで第 1 次から直接第 3 次に移行するもの、あるいは、集中豪雨の際にいきなり 3 次クリープが発現してそのまま崩壊に到るものがある、とした。

浅虫 (1966 年)、高場山 (1970 年)、安居山 (1972 年)、柳谷 (1979 年)、地附山 (1985 年)、真名川 (1975 年)、引田 (1974 年) の崩壊事例について、2 次クリープの定常ひずみ速度と計測を始めてから崩壊に至るまでの余裕時間をプロットした。式 (1) の帯状の範囲への適合性について、

- ・崩壊地層の風化が進んでいる場合 (安居山、地附山) は崩壊が予測よりも遅めになる、
- ・岩の風化が進んでおらず摂理が発達し堅いが脆い材質の場合 (真名川)、予測よりも早期に崩壊、
- ・集中豪雨の崩壊ではまた別の条件が加わる、

と説明した。引田地すべりの場合は、2 次クリープ段階にはなくインバール線が破断したため、きわめて短時間の記録となった。

これらをまとめ、各時点のひずみ速度と、その時点から崩壊までの余裕時間とをプロットしたものが図 1 - 8 である。移動曲線は帯状の範囲に集まっており、斜め右下方向へ移動していくが、ひずみ速度 $10^{-1} (\times 10^{-4} / \text{分})$ 付近から急速に下方へ向きを変えるようであると記した。これらのうち、引田と真名川は集中豪雨の際に急激に動き出し崩壊した点が共通とした。

式 (2) において、 $\dot{\epsilon}$ を決めるには、伸縮計のインバール線の長さを予め知っていなければならないが、設置測定方法に大きな変化がないのであればスパン長を 10m 程度に設置し、スパン長が違っていても一律に 10m とすればよいのではないか、と解説している。

斎藤は、斜面を構成する地質や降雨の状況 (風化度、土や岩、集中豪雨かどうか) に応じて警戒方法を変える必要性を説いている。また、崩壊後に変位曲線を辿っても崩壊予測の手法は出てこないし、変異曲線を十分にとれなくても予測や移動の経過を推定できるような案を提示・立証すべきとした。

筆者は、以上の点から次のような示唆を受ける。すなわち、

- ・図 1 - 8 のようなひずみ速度とクリープ崩壊時間 (崩壊までの余裕時間) の関係は、土 (地質) の種類・状態や試験方法によらないし、国内だけでなく海外の試験結果にも適用でき、1 次~3 次のクリープの有無による崩壊 (メカニズム) の違いがあっても、ある程度の幅をもって成立すること、
- ・伸縮計のインバール線の長さについては、ひずみ速度を両対数グラフにプロットするため、スパン長がオーダーで違わない限り大きな差にならない、つまり、計測値の評価法の問題と理解されること、
- ・傾斜量はひずみと同様に崩壊 30 分前から漸移的に変化するが、室内試験で確認できないため予測因子から除かれたとしており、傾斜量と崩壊との関係づけができれば予測因子として利用しえること、
- ・傾斜量 (角) 自体が円周 (360deg) に対するひずみとしてとらえられること、

などであり、崩壊のメカニズムがわからないような場合でも、傾斜量により、斜面の変状を面的にリアルタイムで取得・評価できれば、斜面崩壊の予測精度をより高められる可能性があると考える。

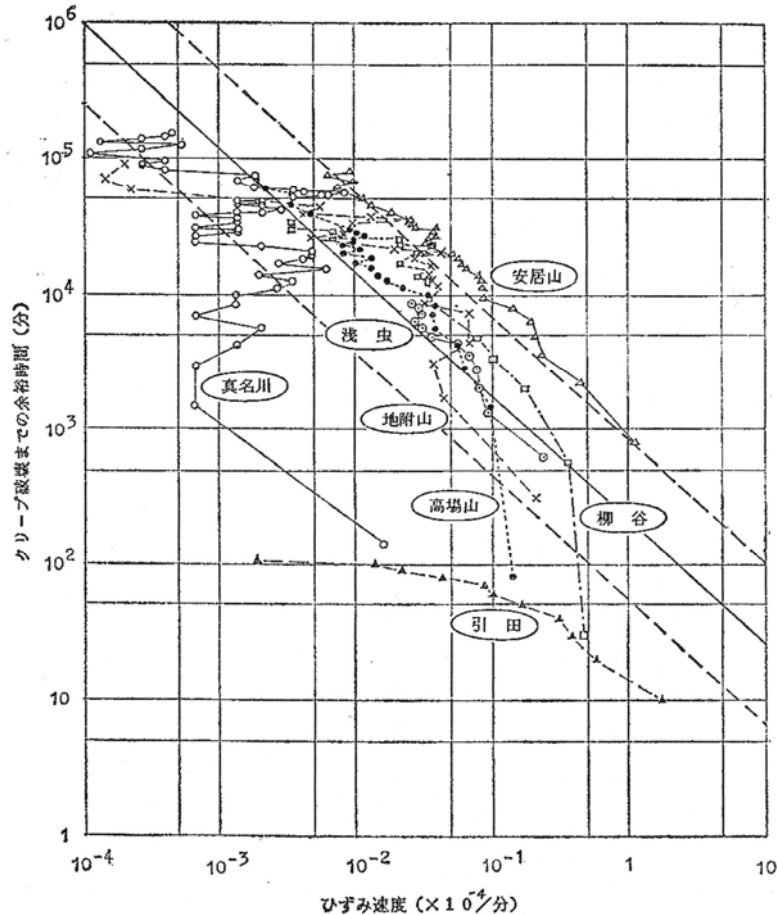


図 1 - 8 両対数表示による実崩壊記録の集積図⁷⁾

福園⁸⁾は昭和 60(1985)年に、粘性土(関東ローム)と細砂を用いて傾斜角度を 30 度と 40 度にし、斜面底面の不透水性基盤面が斜面と平行の場合と斜面中央部が凸面の場合で、幅 4m × 高さ 4m の模型土層に散水し、斜面中央部の表面移動量を計測した。粘性土斜面の崩壊では、図 1 - 9 のように () 速度微増、() 等加速度的、() 等速度的、() 速度累乗的急増の 4 段階を経ること、() 段階においては粘性土でもは細砂でも移動速度の対数と加速度の対数がある範囲で直線になることを示した。

この関係は、表面移動量 = ひずみ量 = d 、 t = 時間としたとき、

$$d^2 / dt^2 = a (d / dt) \quad \cdots \text{式(2)}$$

で表され、模型実験の結果から粘性土と細砂では、 $a = 1.5 \sim 2.2$ と報告した。これを積分すると、

$$\text{Log}_{10}(tr - t) = A - B \times \text{Log}_{10} \quad \cdots \text{式(3)}$$

ここで、 $A = -\text{Log}_{10}\{a(-1)\}$ 、 $B = -1$ であり、 $A = 2.33$ 、 $B = 0.916$ (すなわち 2) のとき、斎藤ら⁵⁾の 3 次クリープ段階の予測式(式(1))に等しくなる。また、切土斜面などの崩壊では、 $B = 1$ の場合があるとされ、一般的に斜面崩壊のある範囲では式(3)が成り立つとした。

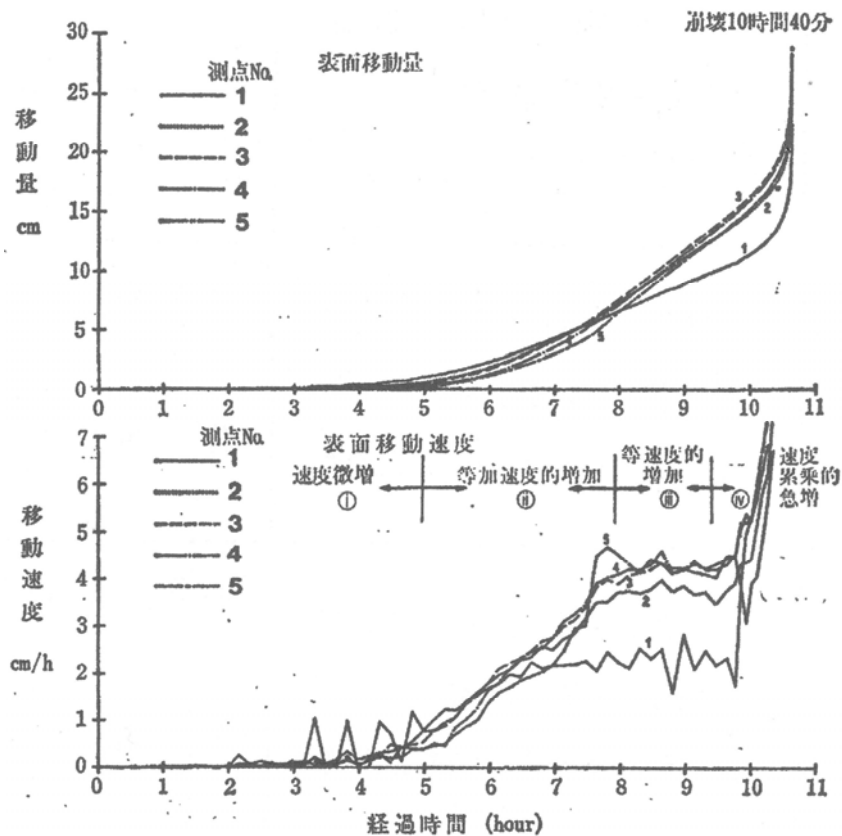


図1-9 経過時間と表面の移動量または移動速度の関係⁸⁾
(勾配40度、斜面底面が平ら、関東ロームの場合)

式(3)を用い、時間と表面移動速度の逆数($1/v$)との関係を作図すると、時間とともに直線的に $1/v$ が下がっていき、横軸と交わる時間が崩壊時刻になる。ここで、 $n=2$ の場合は直線になり、 $n>2$ 、あるいは、 $1<n<2$ の場合は、それぞれ上に凸、凹の曲線になる。

$n=2$ の場合は斎藤⁵⁾の方法と同様になり、斎藤⁶⁾の示した図解方法により崩壊時刻が示される。一方、 $n=2$ の場合には、表面移動速度 v の逆数を延長することにより崩壊時刻を予測することができる。特に、 $n>2$ の場合(上に凸の曲線)では、斎藤⁶⁾の図解方法では崩壊時刻が実際の時刻より遅く求まると指摘した。

図1-10は、表面移動速度の逆数($1/v$)をプロットした図解方法である。ある時刻 T_1 における Q_1 の接線の延長から Tc_1 を求め、 T_1 を中心点にして Tc_1-P_1 をプロットする。曲線上の別の任意点 Q_2 の接線延長から Tc_2 を求め、 T_2 を中心点にして Tc_2-P_2 をプロット、 P_1 と P_2 の延長が崩壊時刻 Tr とする。模型実験によれば、 $n=2$ の場合の Tr と Tc_1 の差は、 $(Tr-T_1)/(Tc_1-T_1)=1/(n-1)=0.83\sim2.0$ としている。

一般に、砂斜面の方が粘性土斜面より崩壊までの時間が短く、模型実験結果でも砂斜面では粘性土斜面が示した()~()の段階とは異なる様式を示し、斜面内部の地下水位の変動による応力変位の傾向が見られるとした。地表面速度とともに、地下水位、土圧なども同時観測すれば、より崩壊メカニズムに即したより早い時期での崩壊時刻予知が可能ではないかと示唆している。

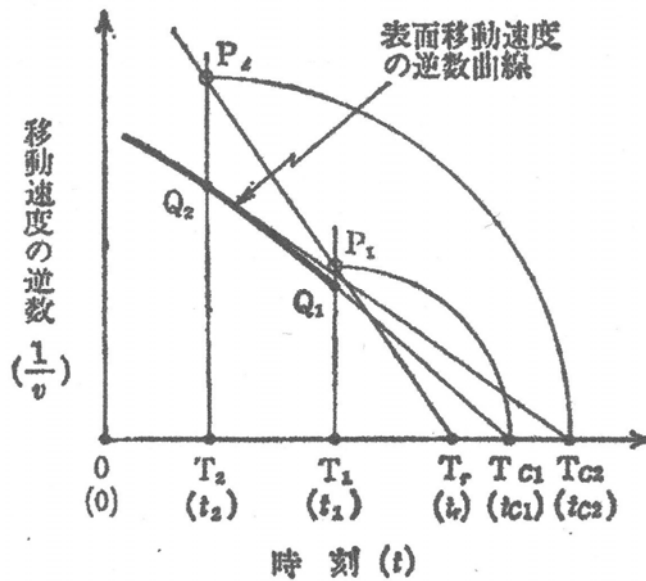


図 1 - 1 0 2 の場合に崩壊時刻を予知する図式解法⁸⁾

黒木ら⁹⁾は平成 7 (1995) 年に、道路改良法面カット工事に伴って 5 月 31 日 15.15 時に崩壊した斜面 (崩壊規模 6 万 m^3) の観測結果を報告した。

観測は、斜面冠頭部に設置した伸縮計 2 機と遠方からのビデオカメラ 2 台などによって 40 日間にわたって行われた。冠頭部の伸縮計 (線長 10m)、および、伸縮計が仮に斜面末端部にあった場合 (線長 100m) のひずみ速度と崩壊までの残余時間をプロットしたところ、図 1 - 1 1 に示すように、岩の崩壊でも斎藤ら⁵⁾の式 (1) に概ね近い結果を得たと報告した。

また、斎藤⁶⁾の図式解法により経過時間とひずみの関係をプロットして、3 次クリープに入った 5 月 21 日時点でのデータを用いて崩壊日時を予測したところ、崩壊は 6 月 1 日 12 時になり実際より遅く出た。

図 1 - 1 2 で、福園⁸⁾の方法により崩壊時間を予測したところ良好な結果を得たとしている。崩壊 2 日前の 5 月 29 日正午から 5 月 30 日午後にかけて、クリープ速度に変化が見られ、5 月 30 日においては 31 日 15 時に崩壊が発生すると予測された。このクリープ速度の変化は崩壊した岩塊の形状が変化したためと推定した。

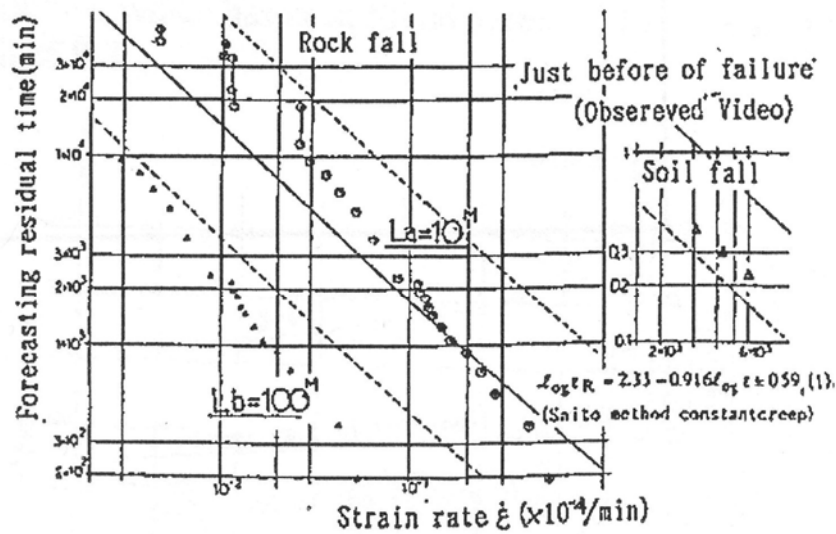


Fig. 6 Relationship between the observed strain rate and residual time

図 1 - 1 1 観測ひずみ速度と残余時間との関係⁹⁾

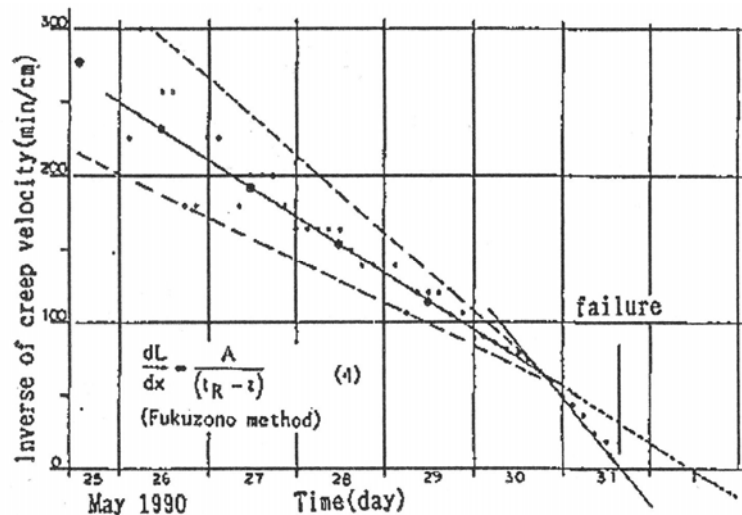


図 1 - 1 2 クリープ速度の逆数の変化⁹⁾

平成 16 (2004) 年、Farooq ら¹⁰⁾ は、降雨による斜面崩壊について不飽和土試料を用いた排水三軸試験によって、初期相対密度 D_r 、初期主応力比 K 、水注入比率 Q 、初期飽和度 S_r などのパラメーターの関係を調べた。これらのパラメーターに対して 3 種類（熊野礫質砂、熊野シルト質砂、小見川砂）の砂を用いた不飽和土試料により、せん断応力一定で排水三軸試験を行った。

その結果、次のような点を明らかにし、土の種類によらず同じような飽和度と間隙水圧で破壊開始するため、斜面の飽和度をモニタリングすれば崩壊を予測できうることを示唆した。

- (1) 間隙水圧が増加し飽和すると土のサクションが消失し破壊が起こる。
- (2) より緩く堆積したものは締まったものより速い破壊の動きを起こす。
- (3) 降雨による斜面崩壊では急な斜面の方が緩い斜面よりも速く変形する。

- (4) 圧縮性の土では間隙水圧が増加すると急激に破壊し、膨張性の土では膨張しながら間隙水圧を失い剪断抵抗が増加するため遅い速度で破壊が発生する。
- (6) 初期飽和度が低いものよりも高いものの方が短い時間で破壊を開始する。

平成 16 (2004) 年、Orense ら¹¹⁾は、実際の災害が発生した場所の小見川砂と熊の平礫混じり砂を利用し、初期相対密度、初期主応力、水の浸透流速度、初期飽和度などの影響を想定して室内せん断試験を行った。さらに崩壊の手法(浸透流と人工雨、相対密度、斜面勾配、及び、地盤形状(不透水層))を変え、合計 10 ケースの模型実験(規模:長さ 197cm×高さ 90cm×幅 80cm)を行い、土砂斜面の豪雨時崩壊を直前検知するロジックを研究した。

図 1 - 13 に、上述したシリーズ試験に異方応力状態 $K=2.5$ 、 $\sigma_3=25\text{kPa}$ の状態で水の浸透速度を変えながら得られた軸せん断ひずみと飽和度の関係を示す。三軸圧縮試験で供試体に常時の斜面に対応するせん断力を作用させ、水分を浸透させて間隙水圧の上昇と有効応力の減少を誘起し、破壊を起させる実験である。ほとんどの試験で、飽和度が 90% に到達してせん断ひずみが急増し破壊した。

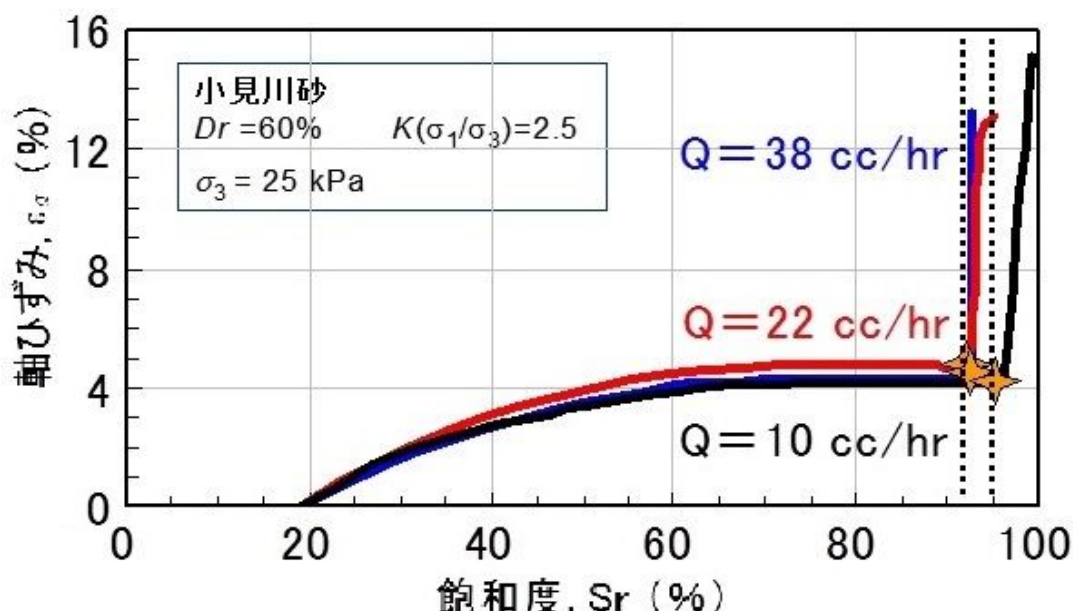


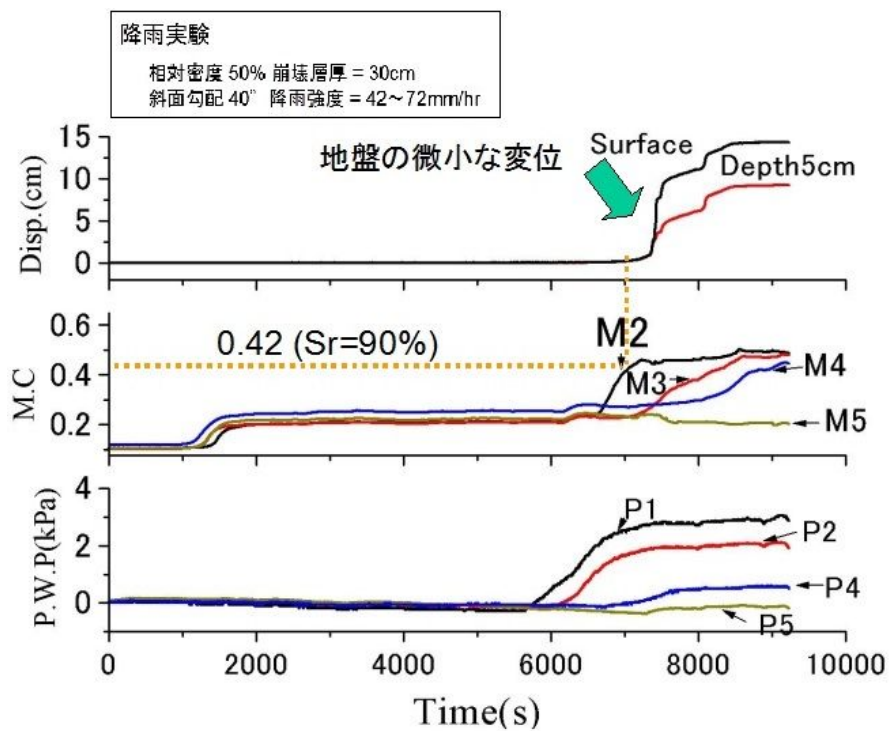
図 1 - 13 三軸剪断実験における水の浸透速度が軸ひずみに及ぼす影響¹¹⁾

図 1 - 14 は、小型の模型斜面に人工雨を降らせて崩壊させた実験の例である。水分含有率が飽和度にして 90% 程度に達したときに崩壊が起こり、その様子を法尻に設置した変位計で計測した。変位記録には崩壊に先立って微小な変位が起こったことが示された。このような実験を積み重ね、現場斜面の飽和度 = 90%、または、微小な先行変位のいずれかが発生した時をもって、斜面の崩壊が切迫していると判定し、警報を発令すべきであるとの考え方が示された。

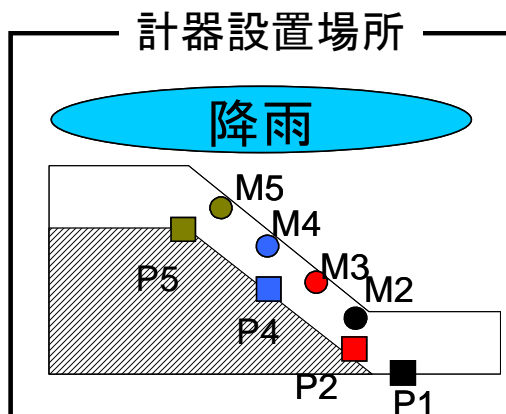
実験を FEM 解析で再現するため、不飽和浸透流解析 (GMS-FEMWATER) を行った結果を図 1 - 15 に示す。実験における地下水位・体積含水率分布結果と不飽和浸透流解析の結果はほぼ一致し、不飽和浸透流解析により実験をほぼ再現することが確認された。

以上から筆者は、土中の含水状態が崩壊に密接に関係すると考え、崩壊斜面において簡便に設置し計

測できる観測機器として土壌水分計を用い、体積含水率によって現場の土中水分をリアルタイムに計測することが重要と考えるものである。



(a) 降雨実験結果



(b) 計器の配置



(c) 崩壊の状況

図 1 - 1 4 小型の斜面型の降雨実験における法尻変位の時刻歴¹¹⁾

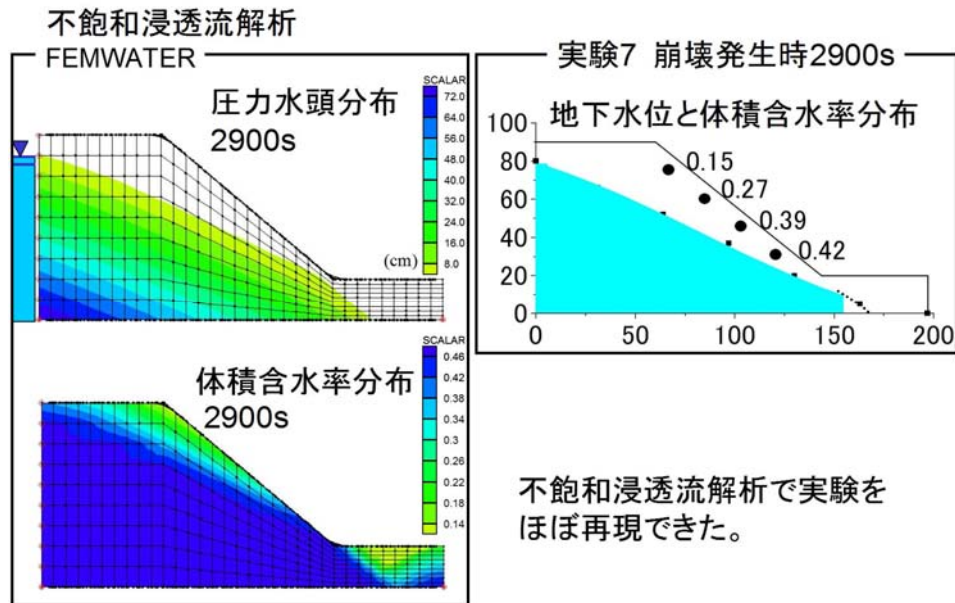


図 1 - 1 5 不飽和浸透流解析 (FEM 解析) による実験の再現¹¹⁾

Orense ら¹³⁾は、平成 16 (2004) 年に 3 つの異なる砂質試料についての定応力ひずみ排水試験 (C S D 試験)、および、三軸試験などの結果から以下の結論を得た。

- (1) C S D 試験では、破壊応力が小さい供試体は、破壊応力がより大きいものに比べて、より突発的な早い破壊を起こす。このことは、降雨によって誘発される浅層の斜面崩壊が急激に、かつ、事前の兆候なしに発生するかもしれないということを示唆するとしており、特に浅層斜面の崩壊の予兆を把握するためにモニタリング技術開発の重要性を意味づけている。
- (2) C S D 試験結果から、圧縮性の土ではせん断により間隙水圧が増加して急激に破壊し、膨張性の土では膨張により間隙水圧が失われ遅い破壊をする。図 1 - 1 6 に示すように、定常状態 (ひずみゼロ) の線より上側なら圧縮性で、下側なら膨張性の破壊モードとなる。

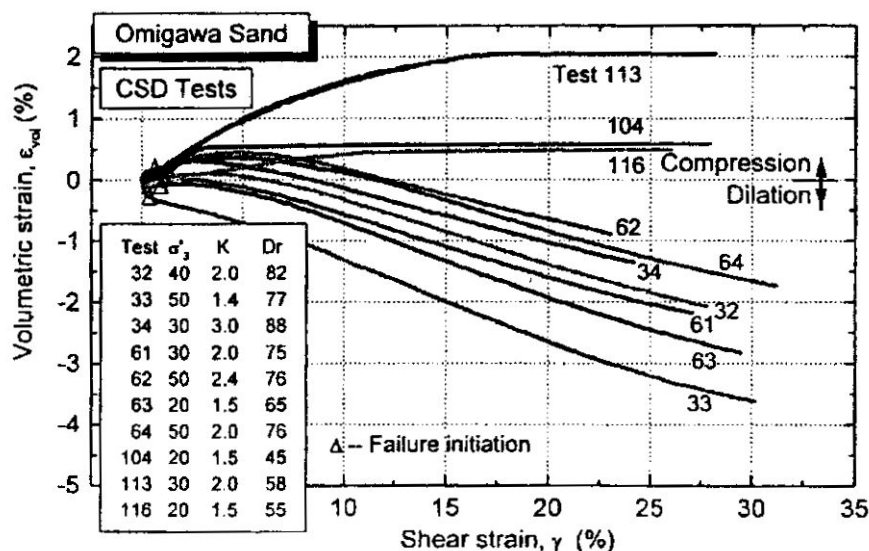


図 1 - 1 6 体積ひずみとせん断ひずみの関係¹³⁾

三浦ら¹⁴⁾は、平成 19 (2007) 年度の「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」において、「凍結融解作用を受ける斜面の崩壊予知・災害危険度評価システムの確立」という研究テーマで、凍結融解環境下での斜面崩壊予知理論の構築を行った。

要素試験と室内模型実験の結果から、凍結融解履歴を受けた滞水斜面は土中水の凍結により凍結層と非凍結層の境界部に弱面が形成され、降雨時に表層崩壊しやすいことを示した。また、地盤の凍結融解現象を再現できる変形・熱伝導・浸透の連成解析手法開発について検討した。北海道内の斜面災害データを収集して、寒冷地地盤情報データベースを作製し、斜面災害発生の要因分析を行って斜面崩壊予知理論によって説明可能であるとした。

常田¹⁵⁾らは平成 20 (2008) 年度の前述の技術研究開発において、「道路機能に基づく道路盛土の経済的な耐震強化・補強技術に関する研究開発」という研究テーマで、新潟県中越地震による盛土被害を受けて、道路盛土等の耐震性能の評価手法および耐震強化・耐震補強の基本概念的構築、また、その設計法と施工法の開発についての研究終了報告を行った。盛土の性能評価のための変形量を算定する数値解析手法として改良 O 型ニューマーク法および極限解析法を提案し、遠心実験、室内静的試験、野外実物大実験を行った。盛土の縦断方向の沈下予測のための数値解析法として静的自重解析、および、強制分布荷重・強制変位による弾塑性有限要素解析を検討した。この研究のフローを図 1 - 17 に示す。

研究成果として、道路盛土の被害特性と危険度評価、道路盛土の性能評価、道路盛土の変形の予測、性能を考慮した耐震強化・補強の設計理念、性能を考慮した耐震強化・補強法の 5 項目について 23 の知見が報告され、盛土のすべり破壊に係わる要因やすべり破壊のマクロ危険度評価法などが報告された。

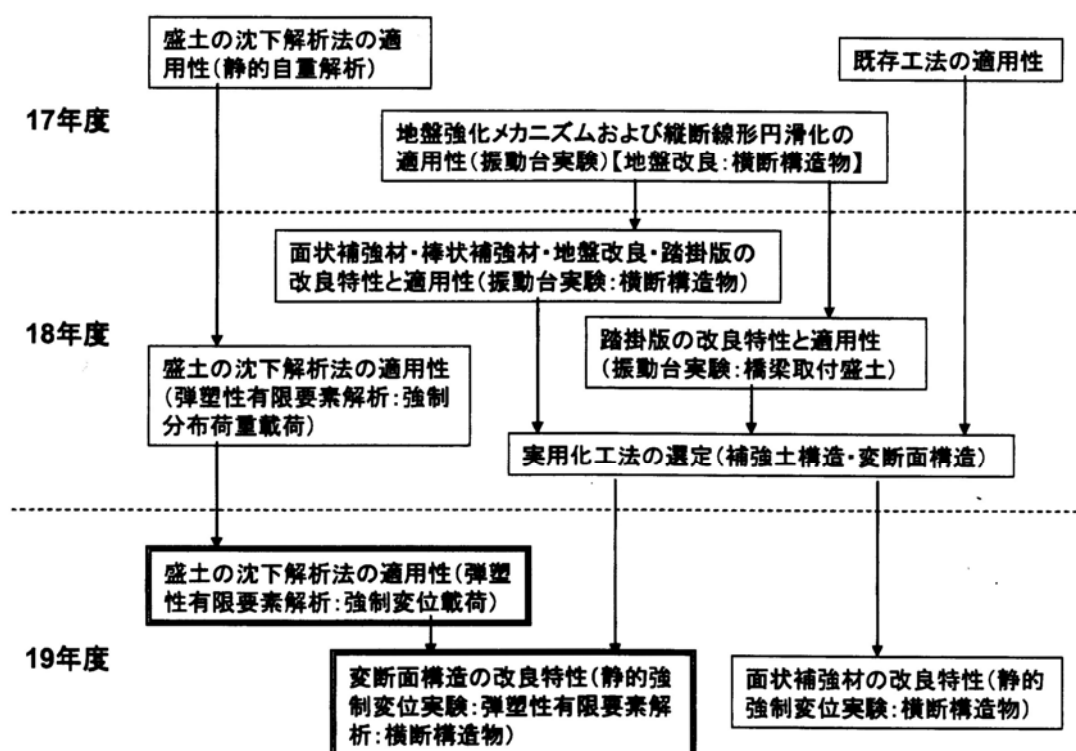


図 1 - 17 研究開発目標、研究項目と成果の経時的変遷¹⁵⁾

玉手ら¹⁶⁾は、平成 19 (2007) 年に斜面表層の飽和度上昇による不安定化に着目して、遠心場降雨実験による崩壊メカニズムの調査を行った。遠心場降雨実験装置では雨滴粒径が $20\mu\text{m}$ 程度になるよう微霧発生ノズルを用いて、図 1 - 18 に示すようにコリオリ力を考慮してノズルを配置した。間隙水圧計、表層ひずみ計、CCDカメラ3台により斜面計測した。

崩壊メカニズムの実験観察について、間隙水圧計によれば透水性が相対的に低い地盤では降雨による閉塞効果が間隙圧力を増加させること、降雨に水を使用する場合では斜面に明確な湿潤の様子がみられず崩壊は斜面表面が薄く群発的に崩壊すること、降雨にシリコンオイルを使用する場合では斜面に湿潤が確認され崩壊規模も相対的に大きいこと、などが確認された。

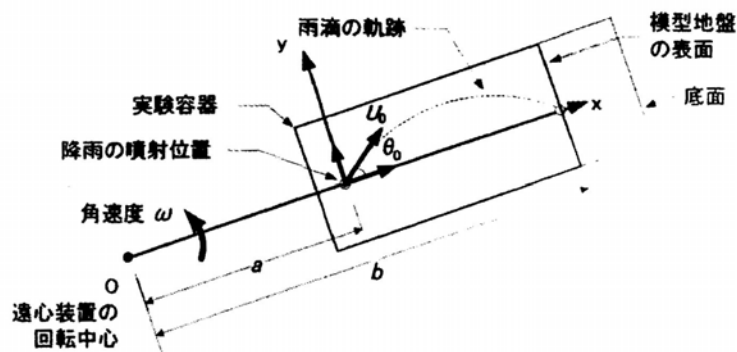


図 1 - 18 遠心力場における雨滴の落下奇跡¹⁶⁾

福田ら¹⁷⁾は平成 21 (2009) 年に、図 1 - 19 に示すように、シラス台地縁辺部において台地面からの降雨水の浸透と急斜面からの湧水過程を検討した。斜面上で連続比抵抗探査と土壌水分計測を行い、降雨量に対応して台地直下と斜面内部の比抵抗値が変化し、同時に斜面表層の土壌水分が急変することを確認した。また、日雨量データに逓減係数を用いた実行雨量値と照合して、シラス斜面内部の任意の深度の含水程度を推定できるようにした。4 ヶ月間 (約 120 回) 以上の連続計測によって、降雨量と比抵抗値についての斜面固有の関係式を得た。すなわち、

$$Cv = \frac{1}{n} \ln(Dn) +$$

(Cv ; 比抵抗の変化、 Dn ; 実行雨量、 $\frac{1}{n}$; 実行雨量の逓減係数 (傾き)、 y ; y 切片)

過去の斜面崩壊時の日雨量データから逓減係数を求め、斜面崩壊発生の基準雨量パターンと斜面不安定化モデルにおける安全率 Fs が得られれば、日雨量データを基にした斜面崩壊発生の時間的予測も可能になるとした。

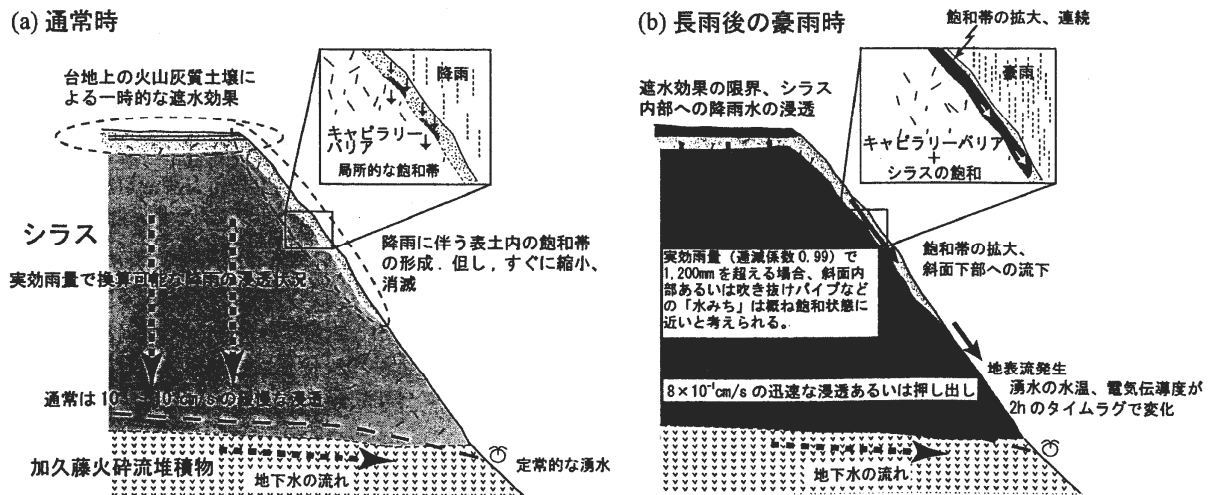


図 1 - 19 概念的に見た対象斜面における降雨の浸透状況¹⁷⁾

岡田¹⁸⁾は、平成 21 (2009) 年、土壌雨量指数を用いる斜面崩壊危険度について記した。土壌雨量指数は、土壌中に溜まっている雨量を推定する手法であり、5 km 格子の解析雨量を入力値として 3 段直列タンクモデルに投入し、3 つのタンクの貯留高の合計を土壌雨量指数とする。タンクモデルのパラメーターは全国一律に固定してあり、土砂災害が多発する履歴の上位の順位に変動はほとんどない。この指数値だけでは土砂災害発生危険性を推定することはできない。土壌雨量指数はあくまで土壌に含まれる雨の量を推定し、過去との危険性を比較するのであって、個々の斜面の危険性を予測するものではない、とした。

図 1 - 20 に示すように 10 年間で指数値が高い履歴 1 位の雨で約 6 割の土砂災害が発生し、同様に図 1 - 21 に示すように履歴 1 位の雨で土砂災害の死者の 8 割以上が発生している。平成 20 (2008) 年から土砂災害に関する大雨警報・注意報の発表基準にも土壌雨量指数が導入された。六甲山系では、雨量で絞り込んだ危険な場所をさらに地盤情報で絞り込むことにより、リアルタイム・ハザードマップへつながることが期待された。

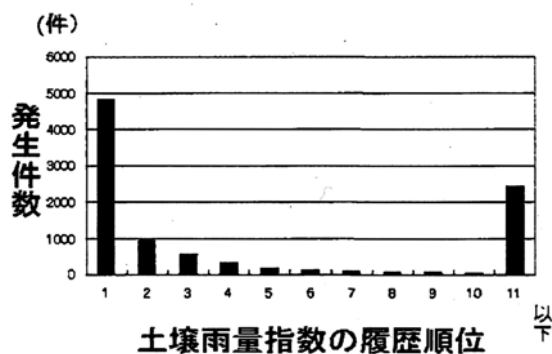


図 1 - 20 土砂災害発生時の履歴順位¹⁸⁾

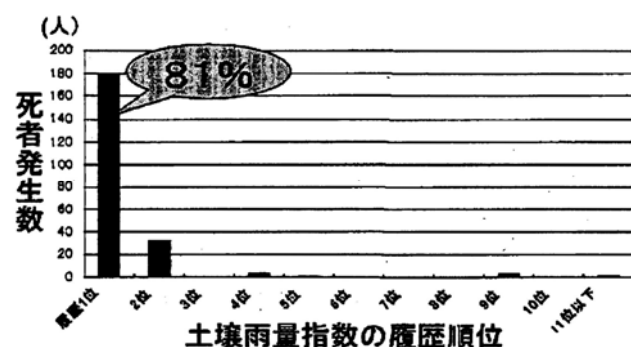


図 1 - 21 死者発生時の土壌雨量指数の履歴順位¹⁸⁾

岡ら¹⁹⁾は、平成 21～23 (2009～2011) 年に行われた「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」の中で「水分履歴を考慮した不飽和道路盛土の耐震性の評価法と強化法」をテーマに研究を行った。盛土構造物の耐震性と地層中の水との関係(集水地形、地下水の流れや滞留、伏流水の影響など)について、データ収集と見直しを行い、不飽和土の動的力学特性の把握と構成モデルの確立、および、図 1 - 2 2 に示すような不飽和 - 飽和地盤の解析や道路盛土を想定した遠心模型実験を行った。

地震時における短時間での大きな動的載荷を想定し、不飽和砂質土の排気 - 排水、非排気 - 非排水条件での動的三軸圧縮試験を行って、不飽和土の繰返し弾粘塑性構成式を導出し、試験結果を再現した。動的圧縮試験により、間隙空気圧よりも間隙水圧の上昇量が大きく、サクションが減少し不飽和での強度が減少する場合があることを明らかにし、弾粘塑性構成式によりシミュレーションを行った。不飽和土は飽和土や乾燥土に比べて、サクションの影響で高強度を示すが、ピーク後のひずみ軟化挙動が脆弱的でありより不安定化することを示した。

また、土 - 水 - 空気の高層系地盤の有限要素解析法を用いて、道路盛土の地震時安定性を解析・評価した。豪雨後の地震を想定して砂質盛土地盤の遠心載荷試験を行い、最適含水比付近ではほとんど変状が見られない一方で、高含水比の盛土では大変形が生じることを明らかにした。

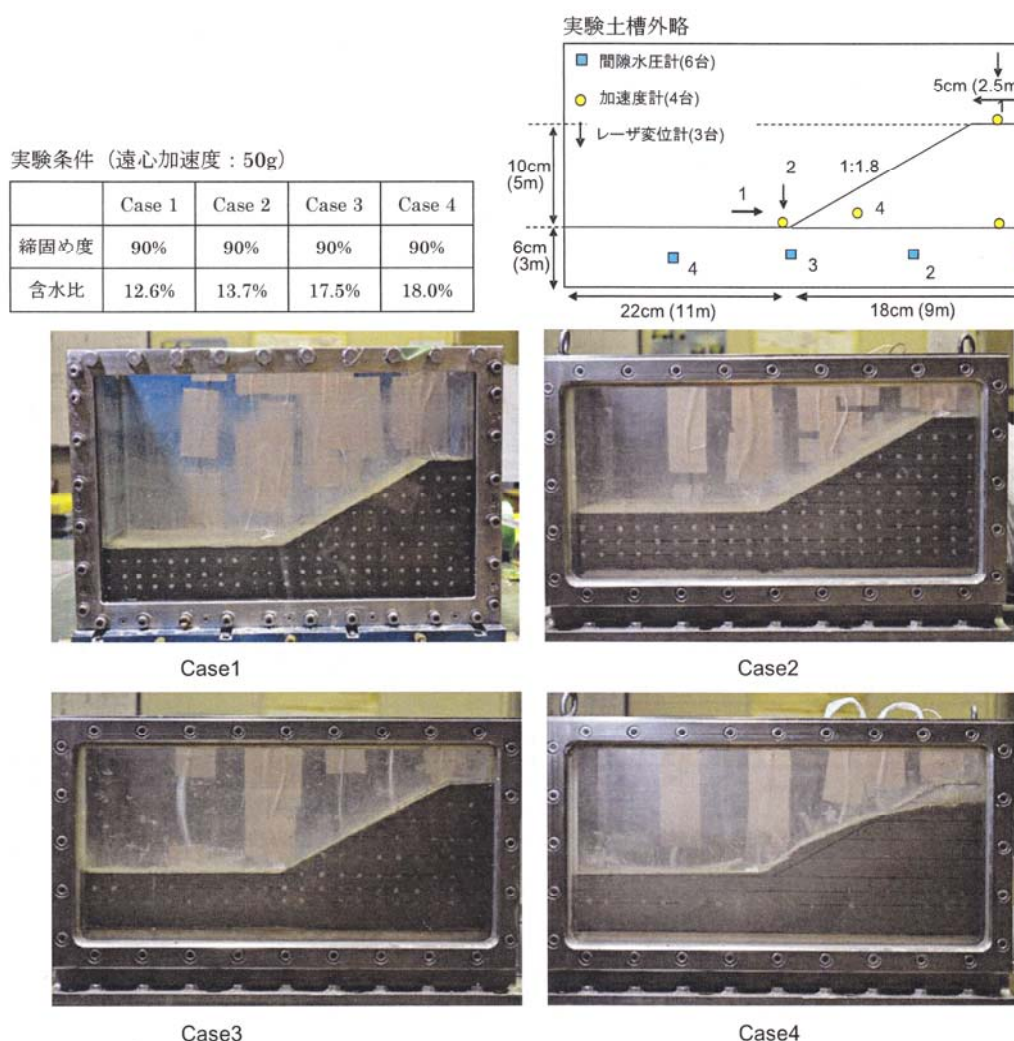


図 1 - 2 2 含水比の異なる盛土の振動遠心模型実験結果¹⁹⁾

平成 24 (2012) 年、石澤ら²⁰⁾は図 1 - 2 3 に示す大型模型実験 (斜面長 10m、幅 3.9m、深さ 1.15 m、傾斜角 30 度、斜面底部に突起付き) を行い、下端に排水層と土留め壁 (高さ 30 cm)、試料はマサ土を用いて、6 回の降雨履歴を与えた。履歴は 1 回目時間降雨量 15mm/h、2 回目 30mm/h、次いで斜面上部から通水 (3~5 回目通水量 50、100m l/h) し、最後に約 24 時間の通水を行って約 20 cm の地下水面を確認したら時間降雨量 40mm/h を崩壊するまで続けた。

図 1 - 2 4 に示すように、降雨履歴が斜面内の地下水位 H_w を変動させる繰り返し载荷により、 H_w と地表面変位 δ_{SD} の関係に降伏点を見いだした。降伏点を超えなければ変位が生じず、超える場合には降伏点が地下水位とともに増加、最終的に崩壊に至るとした。よって、降雨履歴情報から斜面内の水分と変位の関係、および、降伏点を推測できれば崩壊の事前予測に利用可能とした。

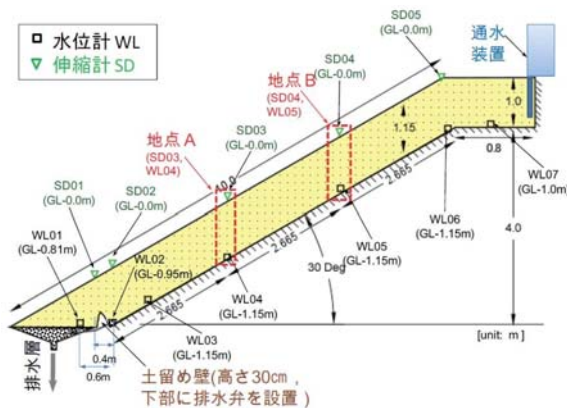


図 1 - 2 3 模型実験の概要図²⁰⁾

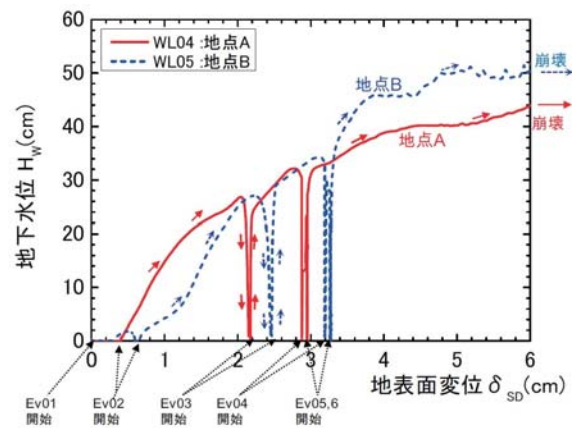


図 1 - 2 4 地下水位 H_w と地表面変位 δ_{SD} の関係²⁰⁾

平成 25 (2013) 年、石澤ら²¹⁾は 3 次クリープの判断基準を検討するため模型実験を行った。模型の規模は前述 (石澤ら²⁰⁾) とほぼ同様であり、試料にはマサ土を用い、天端部から 50m l/sec. で 24 時間通水し約 20 cm の定水位を確認後、時間雨量 40mm/h で散水し、崩壊するまで行った。

斜面中間地点 B で、図 1 - 2 5 に示すように、四段階の地表面変位と変位速度の変化のゆらぎを観察し、1 次、2 次、3 次クリープへと移る現象を確認した。地表面変位量は A 地点よりも B 地点、C 地点 (斜面上端) の方が大きく、変化が見られ始めた時間も斜面上部の方が早かった。図 1 - 2 6 には A・B・C 地点の変位速度の変化点における地下水位比 R_w (その地点の地下水位を土層厚で正規化した値) と地表面変位ひずみ δ_{SD} の (それぞれの地点に設置したインバー線式伸縮計の計測値を崩壊直前の限界地表面変位で正規化した値) との関係を示した。地点 A は底部に排水層があり水位上昇がみられないが、地点 B・C では水位比の増加に伴って δ_{SD} も増加した。これらから石澤らは、降雨により地下水位が上昇し δ_{SD} が増加、変化点 (i) を超えると水位上昇は小さくても斜面変位が進展し崩壊に至るとした。

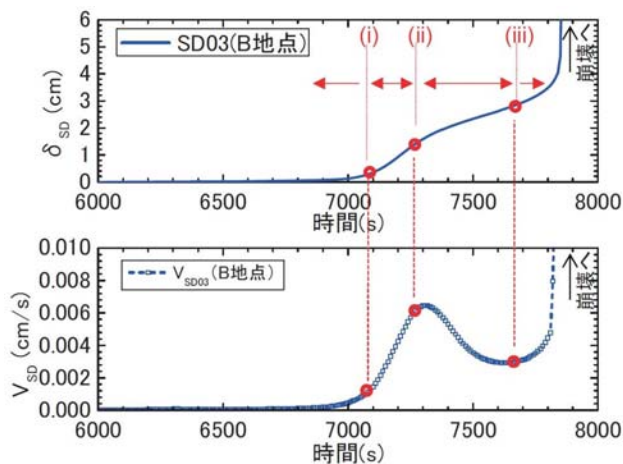


図 1 - 2 5 地表面の変位 δ_{SD} と
変位速度 V_{SD} の経時変化^{2 1)}

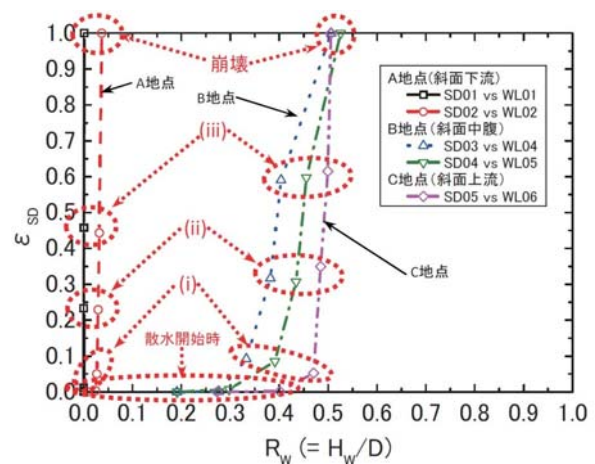


図 1 - 2 6 地表面変位ひずみ ϵ_{SD}
と水位比 R_w の関係^{2 1)}

平成 24 (2012) 年、笹原ら^{2 2)} はマサ土を用いて模型実験 (斜面長 6m、深さ 57.7 cm、傾斜 30 度) を行い、人工降雨 (事前に 30mm/h ないしは 15mm/h で 3 時間継続の降雨イベントを 3 日間間隔で 3 回与え、その後 30mm/h で崩壊まで降雨を継続) による斜面の変形挙動を調べた。

図 1 - 2 7 に斜面内の体積含水率、模型底面での地下水位、せん断ひずみの経時変化を示した。降雨開始後、体積含水率は斜面内の浅いところから上昇し始め、せん断ひずみが増加し始めるのは降雨期間後半の 30 cm 以浅の体積含水率が 2 回目の上昇を始める約 12,000 秒であった。このとき地下水位が上昇し、せん断ひずみの増加が間隙水圧上昇と関連づけられると示唆した。

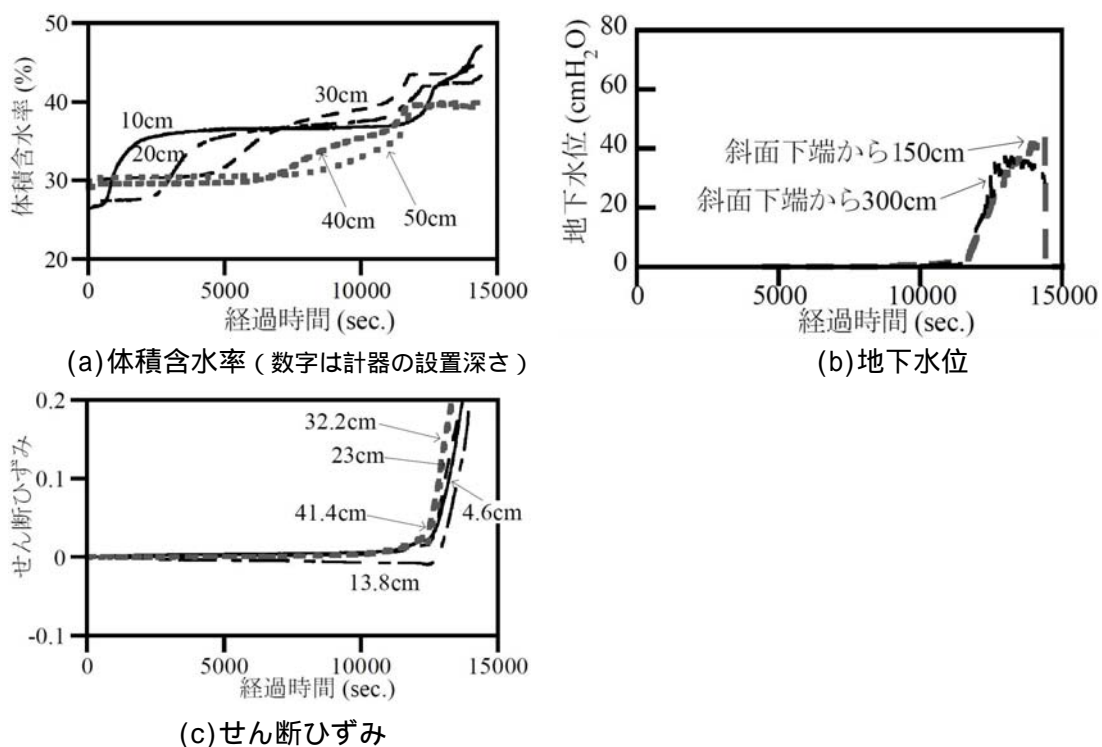


図 1 - 2 7 体積含水率、底面地下水位とせん断ひずみの経時変化^{2 2)}

平成 16 (2004) 年の中越地震の斜面災害 (判読された斜面崩壊は 4000 箇所以上) の全体的特徴を調査²³⁾ する中で、崩壊斜面についての斜面傾斜 () が地形図から計測され、地層の相対傾斜 () が地質図における該当斜面近くの走向・傾斜から推定された。この際に非崩壊斜面についても計測が行われた。斜面の安定性を地層の傾斜との関係からみる場合、通常、流れ盤斜面か、受け盤斜面かに大別し、さらに、詳細に検討する場合、斜面傾斜 () と地層の相対傾斜 () との組み合わせにより、図 1 - 28 のように 6 種に分類される。これらの中で柂目 (まさめ) 盤斜面がもっとも不安定とされる。

崩壊斜面 458 箇所、非崩壊斜面 74 箇所の集計結果を図 1 - 29 に示す。崩壊斜面の大多数は 60° で、主に柂目盤斜面と受け盤斜面に発生し、平行板斜面と逆目盤斜面には比較的少なかったと報告された。同図で特徴的な点は、柂目盤斜面 A の領域に含まれる崩壊斜面は $\theta = 45^\circ$ 、 $\gamma = 45^\circ$ の 1 点のみということで、この領域の斜面が地震前に存在しなかったとされた。非崩壊斜面は流れ盤では 40° 、受け盤で 50° で、受け盤の方がわずかに急斜面とされた。崩壊斜面は非崩壊斜面より流れ盤で約 20° 急傾斜とされ、受け盤では約 $5 \sim 10^\circ$ 急傾斜とされた。流れ盤では地層面をすべり面とする層面地すべりが卓越し、植生が直立のまま残っており、土塊が剛体的にすべったと解釈された。

普通斜面 common slope ($0^\circ < \theta \leq 90^\circ$)	H	D	P	N	V	I
用語	水平盤 horizontal dip	柂目盤 daylighting dip	平行盤 parallel dip	逆目盤 hangnail dip	垂直盤 vertical dip	受け盤 infacing dip
定義	$\gamma = 0^\circ$	$0^\circ < \gamma < \theta$	$\gamma = \theta$	$\theta < \gamma < 90^\circ$	$\gamma = 90^\circ$	$90^\circ < \gamma < 180^\circ$
斜面の安定性	安定	極めて不安定	安定⇒不安定	安定	安定～やや不安定	安定

図 1 - 28 斜面傾斜 () と地層の相対傾斜 () との組み合わせによる斜面の分類²³⁾

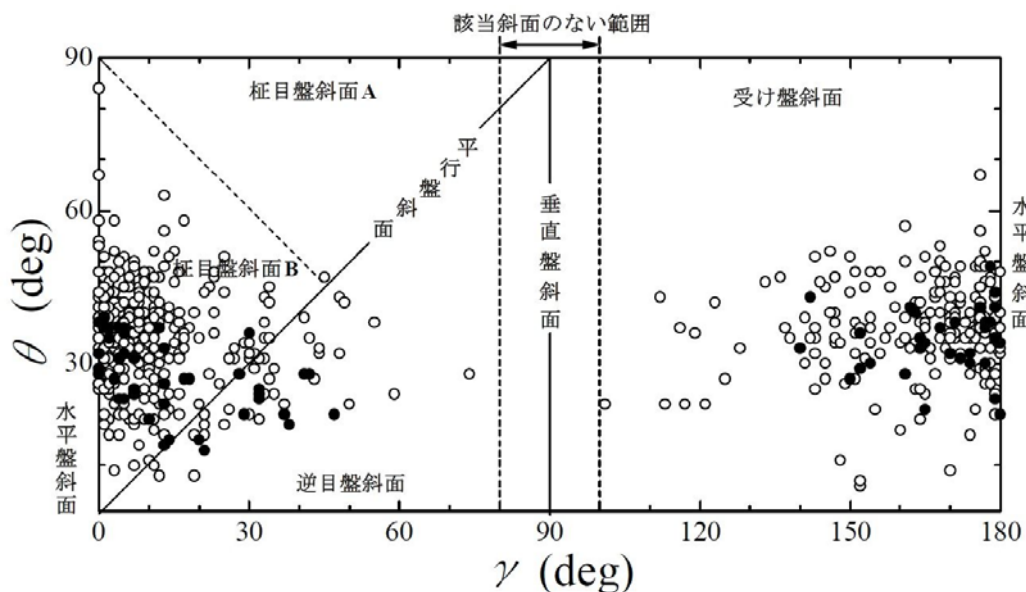


図 1 - 29 崩壊斜面 () と非崩壊斜面 () に関する地震前の斜面傾斜 () と地層の相対傾斜 () の関係²³⁾

平成 20 (2008) 年、秋山一弥²⁴⁾らにより能登半島地震調査報告がなされた。国土地理院による 50 mメッシュ数値地形モデルと、(独)防災科学技術研究所の地すべり地形分類図との重ね合わせから、崩壊面積は 1 メッシュ (50m × 50m) 以内にほとんどが収まるとした。メッシュ毎の傾斜、断面曲率、斜面方位から、地形的な特徴として、斜面崩壊は傾斜 30 ~ 35 度に多い、断面形状が凹よりも凸の斜面の崩壊が相対的に多い、崩壊斜面には方位性がある (南から西向き成分を有する斜面で多発)、既往地すべり地形での発生箇所数 (15 箇所) よりも一般斜面での崩壊 (49 箇所) が 3 倍多い、をあげた。

また、土砂移動距離については、臼杵ら²⁵⁾の移動係数 ($Tr = l$ (地すべりの移動距離) / L (地すべりの長さ)) を用い (図 1 - 30)、完全流動 ($Tr = 0.5$)、不完全流動 ($0.3 < Tr < 0.9$)、ほとんど土塊が攪乱されずに移動 ($Tr < 0.3$) に分類して、地すべりが発生した箇所の土の液性限界 w_L が、完全流動の場合 $50 < w_L < 70$ 、不完全流動の場合 $w_L > 70$ に区分できるとし、砂質分の含有率の差が流動形態や移動係数に影響するとした。

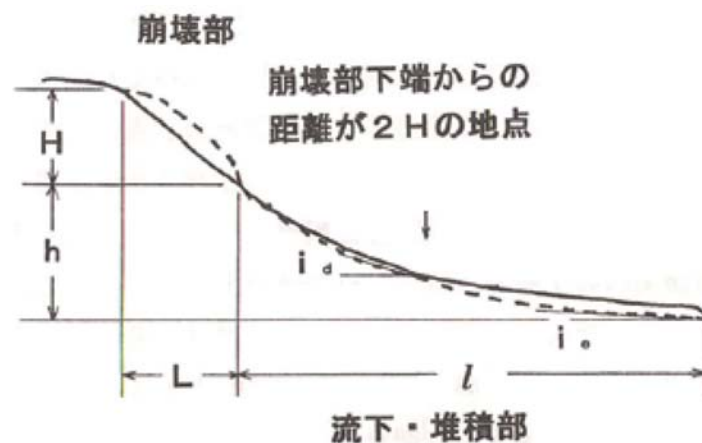


図 1 - 30 崩壊位置の諸元 (模式図)²⁵⁾

平成 21 (2009) 年、小山内ら²⁶⁾は昭和 47 (1972) 年 ~ 平成 19 (2007) 年までの合計 19,035 件のデータを調査対象として崖崩れ災害の実態をとりまとめた。降雨・地震・融雪の誘因別に整理されており、地質・地形・方位・植生についても整理されている。崩壊の規模については、表 1 - 2 に示すように、崩壊高さ・幅・深さ、斜面長、崩壊土量、崩土の到達距離、崩壊の位置・範囲・形状などが整理されている。降雨によるものをみると、崩土の到達距離は母数 13,984 件のうちの 95% が降雨によるものであり、その平均値 = 7.4m、標準偏差 = 19.1m となっており、3 をとると到達距離 65m にほとんどすべての崩壊が含まれるものとみられる。

表 1 - 2 崩壊の規模²⁶⁾

(a) 崩壊規模、平均値 (昭和 47 年～平成 19 年)

統計値	崩壊の高さ H (m)	崩壊の幅 W (m)	崩壊の深さ D (m)	崩壊の斜面長 L2 (m)	崩壊土量 V (m ³)	崩土の到達距離 L (m)	崩壊の位置 H/h	崩壊の範囲 L/H	崩壊の形状 W/H
平均値	12.8	15.3	1.2	14.9	377.9	7.4	0.685	0.570	1.604
個 数	18,085	18,034	16,735	17,947	17,008	13,984	17,107	11,634	17,946
分 散	254.539	398.007	2.429	501.326	50441503	363.0	0.80	0.97	11.79
標準偏差	16.0	20.0	1.56	22.4	7102	19.1	0.897	0.984	3.43
変動係数	0.0882	0.111	0.00931	0.131	41.8	0.136	0.00524	0.00873	0.0204
最小値～ 最大値	0.0～ 622	0.0～ 550	0.0～ 42	0.0～ 650	0.0～ 640000	0.0～ 1300	0.00～ 93.3	0.00～ 54.2	0.00～ 400

(b) 崩壊規模、平均値 (昭和 47 年～平成 19 年) (降雨によるもの)

統計値	崩壊の高さ H (m)	崩壊の幅 W (m)	崩壊の深さ D (m)	崩壊の斜面長 L2 (m)	崩壊土量 V (m ³)	崩土の到達距離 L (m)	崩壊の位置 H/h	崩壊の範囲 L/H	崩壊の形状 W/H
平均値	12.7	14.7	1.1	14.9	334.6	7.4	0.683	0.587	1.570
個 数	16,902	16,861	15,834	16,779	16,046	13,291	16,099	11,076	16,802
分 散	254.356	270.797	2.229	507.179	27218707	362.9	0.83	1.00	11.81
標準偏差	15.9	16.5	1.49	22.5	5217	19.1	0.910	0.999	3.44
変動係数	0.0944	0.098	0.00943	0.134	32.5	0.143	0.00565	0.00902	0.0205
最小値～ 最大値	0 622	0 550	0 42	0 650	0 600000	0 1300	0 93.3	0 54.2	0 400

(c) 崩壊規模、平均値 (昭和 47 年～平成 19 年) (地震によるもの)

統計値	崩壊の高さ H (m)	崩壊の幅 W (m)	崩壊の深さ D (m)	崩壊の斜面長 L2 (m)	崩壊土量 V (m ³)	崩土の到達距離 L (m)	崩壊の位置 H/h	崩壊の範囲 L/H	崩壊の形状 W/H
平均値	14.6	37.9	1.2	13.2	713.4	7.1	0.848	0.421	3.113
個 数	504	512	295	510	329	202	396	133	484
分 散	258.775	3688.146	2.890	206.650	33027074	359.6	0.79	0.28	21.50
標準偏差	16.1	60.7	1.70	14.4	5747	19.0	0.890	0.525	4.64
変動係数	3.1918	11.861	0.57632	2.819	1746.8	9.388	0.22470	0.39466	0.9579
最小値～ 最大値	0.5 220	1 550	0 17	0 150	0 100000	0 220	0.04 15.0	0 3.6	0.022727 42

(d) 崩壊規模、平均値 (昭和 47 年～平成 19 年) (融雪によるもの)

統計値	崩壊の高さ H (m)	崩壊の幅 W (m)	崩壊の深さ D (m)	崩壊の斜面長 L2 (m)	崩壊土量 V (m ³)	崩土の到達距離 L (m)	崩壊の位置 H/h	崩壊の範囲 L/H	崩壊の形状 W/H
平均値	16.6	20.1	1.7	19.6	3439.6	9.7	0.704	0.578	1.449
個 数	224	220	212	220	215	184	214	170	220
分 散	343.002	1388.475	11.906	963.786	1896933159	860.3	0.12	1.58	3.79
標準偏差	18.5	37.3	3.45	31.0	43554	29.3	0.351	1.258	1.95
変動係数	8.2680	16.937	1.62760	14.111	20257.6	15.941	0.16424	0.74019	0.8851
最小値～ 最大値	2 150	1 450	0.1 40	1 340	0 640000	0 350	0.021429 3.4	0 15.5	0.05 21

平成 17 (2005) 年に小山内ら²⁷⁾は、土砂災害防止法における家屋被災範囲の算定法を用いて、平成 15 (2003) 年に発生した災害 15 事例について適応性を確認した。がけ崩れによる家屋被災範囲は告示 (平成 13 (2001) 年 3 月 28 日国土交通省第 332 号) に基づいて、地形把握、土石などの移動の高さ・堆積幅や土質常数の設定、土石の移動あるいは堆積による力の算出、移動あるいは堆積による力が建物の耐力を上回る範囲を出して設定した。ここで家屋被災範囲は崩壊幅と等しいものとした。検討には平成 15 年に発生した 15 事例 (斜面高 7 ~ 90m、斜面勾配 33 ~ 55 度) を用い、家屋被災範囲を、地形調査のみで設定するケース、に加え土層構造・崩壊深・土質調査によって設定するケース、に加え崩壊高さと規模を予測して設定するケースを行った。ここで等高線に沿った方向の家屋被災範囲の広がりには崩壊幅と等しいとおいた。この結果、表 1 - 3 のように、ケース で被災家屋包含率 93%、無被災家屋率 7% で極めて良好な結果を得た。一方、ケース 、ケース では無災害家屋率が 35% と に比べて大きくなり、これは、特に UU 試験による内部摩擦角を用いた無災害家屋率が 75% と高かったことによるものとした。

表 1 - 3 各ケースの被災家屋包含率、無被災家屋率、土砂到達家屋包含率、非土砂到達家屋率²⁷⁾

ケース	箇所数	被災家屋 包含率	無被災 家屋率	土砂到達家 屋包含率	非土砂到 達家屋率
ケース1	15	0.93	0.07	0.87	0.07
ケース2	15	0.93	0.35	0.87	0.35
CD試験	10	0.88	0.13	0.78	0.13
UU試験	3	1.00	0.75	1.00	0.75
ケース3	15	0.93	0.35	0.87	0.35
CD試験	10	0.88	0.13	0.78	0.13
UU試験	3	1.00	0.75	1.00	0.75

1.3 崩壊を検知するためのモニタリング機器に関して

恒岡ら²⁸⁾は、平成 11 (1999) 年～平成 14 (2002) 年まで、光ファイバセンサを活用した斜面表層崩壊モニタリング技術の開発を行い、「光ファイバセンサによる斜面崩壊モニタリングシステムの導入・運用マニュアル(案)」を作成した。

光ファイバセンサ計測として現状で代表的な BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) 方式、FBG (Fiber Bragg Grating) 方式、MDM (Macro Distortion Monitor) 方式の 3 種類について、実斜面 (1 斜面に 1 方式) に設置した。BOTDR 方式は概ね 1000 万円程度と観測部分が高価であり、FBG 方式と MDM 方式は 200～500 万円程度とセンサ数などによって価格が変動するが、全般的に高価であることに変わりはない。施設方法は、地中埋設、地表布設、地上架設があり、それぞれ植生や地形、動物や積雪などの影響を受け、一長一短あるとしている。

試験計測中に 2 箇所 (MDM センサ方式、FBG センサ方式) で 20 m² 以下の小崩壊を検知した。MDM センサ方式では崩壊 2 日前から一つのセンサーで微小変位を検知、崩壊約 3 時間前にはセンサーで前兆変位を検知した。FBG センサ方式では一つのセンサーで崩壊約 2 時間半前から変位を検知、崩壊発生によって光ファイバが断線しデータ欠損となった。両センサーとも小規模な崩壊でも前兆変位がみられてから崩壊まで 2 時間程度あった。特に事前通行規制の開始前や解除後に発生する崩壊への対応について異常検知が重要となる、と考察している。3 種類の光ファイバセンサの適用性について表 1 - 4 のようにまとめた。

表 1 - 4 光ファイバセンサの適用性²⁸⁾

	観測エリア		変状の程度		リアルタイム性	変状位置
	広	狭	大	小		
BOTDR	○	△※1	○	○	△※2	○
FBG	△※3	○	○	○	○	△※4
MDM	△※5	○	○	△※6	○	△※4

※1 計測器が高価なため、適切な観測エリアの検討が必要である。

※2 計測器による分析時間が最低でも 5～10 分程度必要であるため、崩壊速度が速いと微小な変状過程を捉えきれない場合がある。

※3 光ファイバケーブル 1 ラインに取り付け可能なセンサ数は 10 個程度までのため、広範囲 (多点計測) になる場合、線量の面で煩雑になる。

※4 センサを設置した位置より、変状発生位置を確認する。

※5 計測器 1 台に対するセンサ数は 16 個であるため、広範囲 (多点計測) になる場合、結線の面で煩雑になる。

※6 従来型の伸縮計・変位計と比べると、読み取り精度は従来型の方が高い。

※7 光ファイバセンサの計測原理には、表の他にも変位計測用の OTDR 方式や破断検知用の透過光計測、温度計測用のラマン散乱方式等があり、使用目的に応じて適宜選択する。

内村ら²⁹⁾により、平成 14 (2002) 年～平成 15 (2003) 年にかけて、降雨時の盛土法面の崩壊リスク評価についての基礎的検討が行われた。降雨時の盛土法面の崩壊について、最も不安定で崩壊の出発点になる法尻部を中心に変位と土壌水分量を監視した。図 1 - 3 1 の外観に示されるように、センサーは安価にするため傾斜計を用い土壌水分計で体積含水比を計測し、サクションを推定して安定計算した。データ伝送は無線通信であった。

平成 17 (2005) 年には、図 1 - 3 2 に示すような高さ 1m の堤防模型で降雨実験が行われ、崩壊は法尻付近で起こり続いて斜面上部で起こった。法面下部の崩壊の 30 分以上前から変化がみられ、傾斜変位を監視することで斜面崩壊前の変位の兆候をとらえられる可能性を示した。高さ 3 m の模型実験では、それぞれのセンサーユニットの位置まで浸食が進行するよりも数 10 分前から傾斜変位に変化が現れた。挙動パターンについてはセンサユニットによりまちまちで、どのような挙動を危険と判断するかは今後の検討課題とされた。

図 1 - 3 3 のように斜面崩壊の 30 分以上前から傾斜計のデータに異常を認めることができたことから、伸縮計の絶対変位計測に限らず、傾斜計のデータ異常により斜面崩壊の前兆をとらえられる可能性を報告した。

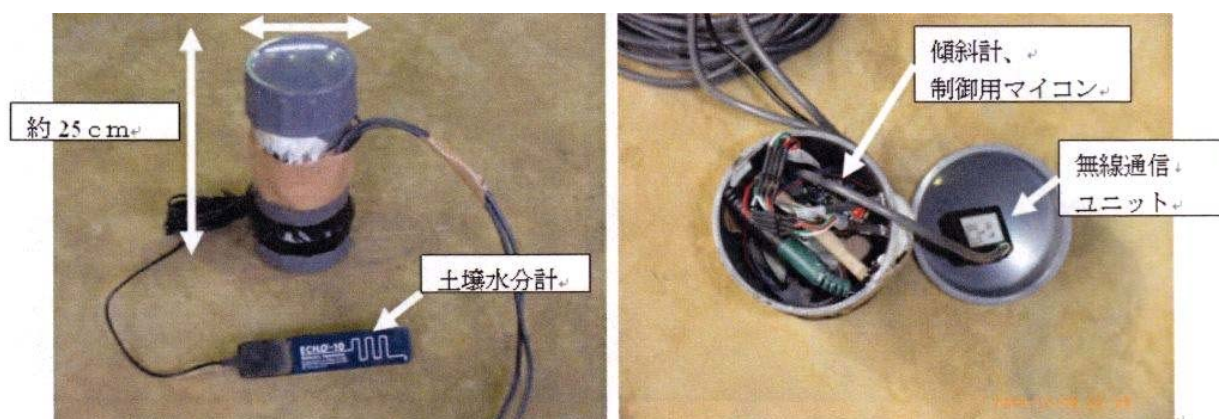


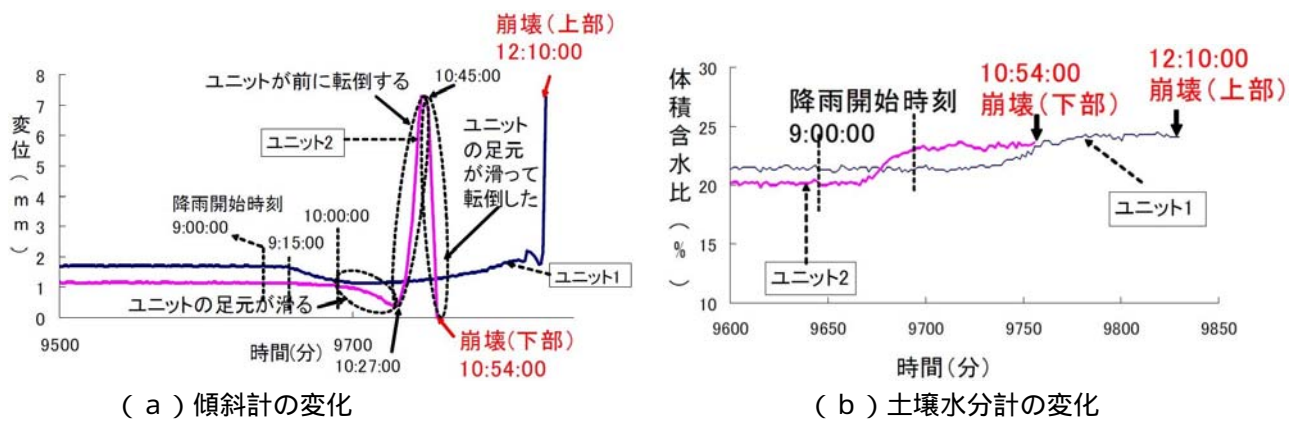
図 1 - 3 1 ワイヤレス・センサユニットの外観²⁹⁾



(a) 降雨実験前

b) 崩壊後

図 1 - 3 2 堤体模型の外観²⁹⁾



(a) 傾斜計の変化

(b) 土壌水分計の変化

(注；傾斜計の変位は前方への転倒が正、ユニットの埋め込み高さ 200mm あたりの水平変位に換算)

図 1 - 3 3 堤体模型実験の結果²⁹⁾

平成 15 (2003) 年、Kilburn ら³⁰⁾は、欧州の 3 カ国 (オーストラリア、イタリア、スペイン) における 5 つの実験フィールドを対象に、大規模地すべりのリスク低減手法を研究する RUNOUT プロジェクトについて報告した。ここでは、リモートセンシング、GPS アレイ、GIS に基づくデータベースが用いられた。

対象エリアは欧州で 10^6 m^3 以上の規模の崩壊斜面から選ばれた。動いている地すべりをモニタリングし、堆積物の分析、土石流や大規模な斜面崩壊に備えるため、数値セルモデルの開発、突発性の斜面崩壊を予測するための脆弱性崩壊モデルの開発、測地モニタリングネットワークによる広範囲の GPS アレイの方策、斜面崩壊ハザードに対する関心を高める方策、GIS をベースにしたデータベースの開発などを行った。

GIS マップなどを開発しつつ、斜面安定性の帯する先駆的な調査を行っており、2 カ所のテストエリアでは、モニタリングネットワークに GPS アレイ、および、光学的なリモートセンシングの研究で補足し、地すべり地周辺の破壊の全般的な様子を得たとされる。

遅い斜面崩壊から速い崩壊への移行について、崩壊前の条件が 3 カ所で比較評価された。昭和 38 (1963) 年のパイオンダムサイトの崩壊については、急激に崩壊するタイミングについてテクトニクス的な影響があるかどうか調査され、平成 15 (2003) 年に Kilburn らは進行性の破壊が崩壊の加速度に影響し Slow-cracking モデルでは斜面崩壊まで 2 ヶ月間かかることを指摘した。最終的課題として、異なるタイプの地すべりを説明できる効果的かつ動的なレジームができるか、コミュニティを避難させるため突発的崩壊を信頼性よく予測できるか、不規則に発生する地すべりの危険性をコミュニティに認識させるにはどうすればよいか、をあげた。

国土交通省では平成 20 (2008) 年 12 月に、自然災害への迅速な対応、予防保全に基づく維持管理による劣化防止などの社会資本の老朽化への確に対応するため、目視点検だけでは検知しにくい構造物の状況を精度良く把握し適切に利用する方法について、総合技術開発プロジェクトとして 4 つの課題に分けて社会資本の管理技術の開発³¹⁾を行った。その課題の一つに土砂災害の初期の変動を検知する方法がとり上げられた。

その結果、(1) 新型センサの機能を斜面崩壊の発生の検知に限定するかわりに、安価かつ長期間メンテナンスフリーで斜面に容易に設置可能な斜面崩壊検知センサを開発した。人工斜面における崩壊実験、

通信試験、実斜面への試験設置を行って機能確認を行った。また、(2)光ファイバによる道路法面の斜面崩壊監視、(3)新型光ファイバセンサによる地すべりの発生検知 について報告し、その他、土砂災害情報提供の高度化に関して住民意識と避難行動の関係を扱うサイバネティックモデルの作成などを行い、過去の災害について検証した。

(1) 新型センサーによる斜面崩壊の発生検知³¹⁾

表1-5に示すように、崩壊検知センサーのセンサー方式は内蔵傾斜スイッチ(30°、5°)と内蔵転倒スイッチ式のものであり、筐(キョウ)体軸から所定角度傾くと検知するものである。地上設置型と地中設置型があり、通信方式は特定省電力無線と低周波磁界方式、通信可能距離は30~400m、電源はいずれも内蔵電池であった。

人工斜面での模型実験では各タイプについてそれぞれ1回、センサーを斜面に4つ配置して行われ、斜面崩壊を発生させ土塊の移動開始から10~30秒の間に全て正常に検知した。通信伝送については見通しのよい平地で無線通信機能試験が行われ、いずれのタイプも通信可能距離以上の距離まで確実に通信でき、山間地での試験では、センサーによっては設置方法や見通し状況、新幹線のノイズなどによって通信状態が影響を受けた。

本開発の結果、表1-7に示すように、検知機能、通信方式、電源、検知出力、目標価格、耐用年数、設置条件、耐環境性についての課題が整理された。

表1-5 試作センサー一覧³¹⁾

試作タイプ	タイプⅠ	タイプⅡ	タイプⅢ
外 観			
特 徴	<ul style="list-style-type: none"> ・安価 ・設置が容易 ・長距離通信が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・安価 ・設置が容易 ・既存の防犯装置との連携が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・土中に埋もれた場合でも通信が可能
電 源	内蔵電池	内蔵電池	内蔵電池
センサ原理	センサーが30°以上傾くと検知する	センサーが5°以上傾くと検知する	センサーが45°以上傾くと検知する
通信方式	特定小電力無線 1mW	特定小電力無線 10mW	低周波磁界方式
通信可能距離	400m程度	100m程度 (中継2台追加で最大300m)	30m程度
設置方法	地上設置	地上設置	地中設置
寸法・重量	約H300×W10×D10mm 数百g	約H165mm, φ60mm 数百g	約φ114mm×H205mm 数kg
備考			

(2) 光ファイバセンサーによる斜面崩壊の監視（道路法面）³¹⁾

動滑車の原理を応用したV型の計測機構により、ポイント型センサーを用いて線的・面的な斜面変状計測システムを構築した。計測線にカーボンケーブルを用いて設置を簡易にした。崩壊実験を行い滑車機構とカーボンケーブルからセンサーへの伝達について動作確認した。次いで偏波変動を用いた計測システム、およびユニット型反射モジュールを開発し変状計測実験を行って動作確認をした。実斜面ではカーボンケーブルおよび工事用足場の台座を活用した設置実験を行い、設置3ヶ月後でツタが絡まる点や雑草に隠れてケーブル位置がわからなくなる点などが問題となった。今後の課題としては変状を変換するアルゴリズム構築が必要とされた。

(3) 新型光ファイバセンサによる地すべりの発生検知³¹⁾

低コストで調達可能なOTDR方式の光ファイバセンサを用い、約15kmの路線長で地すべり密集地域における複数の地すべりを一括監視できるように、OTDR測定器の制御から警報信号の出力まで行える監視システム用ソフトウェアを試作して実際の地すべり斜面に2ヶ月間設置した。監視期間中に小崩壊などはなく、ワイヤをむき出しのまま設置したため、木の枝などがワイヤに引っかかり誤検出した例があった。現場設置に特に技術や材料を必要とせず、設置の技能や費用もこれまでと同レベルであるため、広域かつ多数の地すべりの前兆現象をとらえる基礎的技術を確認したとしている。表1-6に、斜面崩壊を検知するセンサー類、および、OTDR方式光ファイバセンサの概要を示した。

表1-6 斜面崩壊等を検知・計測する技術³¹⁾

検知・計測方式	検知・計測の対象	検知・計測方法の概要
光ファイバセンサ	BOTDR	ブリリアン後方散乱光の検出・解析により、ひずみや変位を測定する。ひずみ分布も計測可能。
	FBG	ブラッグ波長のシフト量の検出・解析により、ひずみを測定する。
	MDM	変位
	OTDR	変位、崩壊検知
ワイヤセンサ	崩壊検知	ワイヤの張力変化より変形・崩壊を検知する。 ワイヤの巻取り量で崩壊を検知する。
ケーブルセンサ	変位、崩壊検知	ケーブルのインピーダンス変化を検出・解析し、変位・崩壊を検知する。 ケーブルの断線により、崩壊を検知する。
傾斜・転倒センサ	崩壊検知	傾斜角の変化あるいは転倒により接点信号を発信し、崩壊を検知する。
AEセンサ	崩壊検知	固体が変形・破壊する時に発する音を検出、その検出回数などから崩壊を検知する。
圧力センサ	崩壊検知	地圧の変化をチューブを介して液圧の変化として検出し、液圧の変化から土砂の堆積や流出を検知する。
デジタル画像解析	変位、崩壊検知	デジタル画像から特異点などの座標データを比較し、変位量を測定する。
GPS	変位	4つ以上の人工衛星と観測点の距離測定から観測点の座標を求め、その座標の変化を測定する。

以上の成果から平成 19 (2007) ~ 20 (2008) 年度に、(独)土木研究所 (土砂管理研究グループ・火山土石流チーム)³²⁾において、土砂災害の警戒避難支援のための斜面崩壊検知センサの開発が行われた。(独)土木研究所が中心となり、民間 5 社が参加して「土砂災害の警戒避難支援のための斜面崩壊検知センサの開発」を行った。

斜面崩壊発生検知については、行政や住民の目視によるところが大きく、現行の機器も高価でメンテナンスに手間のかかるものが多い。崩壊を検知しすばやく住民避難につなげるためには、表 1 - 7 に示す開発目標を満足するような専用機器 (斜面崩壊検知センサ) の開発が必須とされた。

平成 21 (2009) 年 3 月の報告書³³⁾で、表 1 - 8 に示すような実斜面に設置可能な 5 つのタイプのセンサを報告した。これらを用いて土砂災害警戒避難、緊急対応の支援、工事の安全管理はもとより、斜面崩壊の前兆現象の把握、山地流域の土砂動態モニタリング、落石の検知、鉄砲水や土石流の検知、天然ダム (河道閉塞) の土砂移動監視検知などへの応用について呈示した。

従って、本研究では、表 1 - 7 の開発目標を念頭におき、表 1 - 8 のタイプ に相当するセンサーを開発するものである。

表 1 - 7 開発目標³²⁾

①	検知機能	勾配が概ね 30 度以上の急斜面に設置し、崩壊の発生を時間遅れなく検知する
②	通信方式	無線通信 (100m 以上伝送可能)
③	電 源	バッテリー駆動 (電池寿命 5 年間以上)
④	検知出力	デジタル出力
⑤	目標価格	センサー 1 台数万円程度
⑥	耐用年数	約 10 年間
⑦	設置条件	容易かつ人力で設置可能
⑧	耐環境性	気象条件 (降雨・雪・落雷) や環境 (立木・寒冷地) などにより機能障害が生じない

表 1 - 8 開発したセンサーの概要³³⁾

試作タイプ	タイプ I	タイプ II	タイプ III	タイプ IV	タイプ V
信号伝送方式	鉄球落下方式	無線方式 (地中通信)	無線方式 (特定小電力無線)	無線方式 (特定小電力無線)	無線方式 (特定小電力無線)
監視・検知項目	センサー・パイプの伸び量	センサーの転倒	センサーの転倒	センサーの傾斜角度及び土壌水分	センサーの転倒
特 徴	・電源がいらない ・構造が単純 ・保守が容易	・土中埋設可能 ・地形・植生の影響がない	・安価 ・設置が容易 ・長距離通信が可能	・安価 ・前兆現象の定量把握可能 (傾斜角度、土壌水分)	・安価 ・設置が容易 ・既存の防犯装置との連携が可能
検知信号の伝送可能距離	10° 以上の勾配が保てる距離	地中 30m 程度	1200m 程度 (直線見通し上)	600m 程度 (直線見通し上)	500m 程度 (直線見通し上)
センサ電源	不要	内蔵電池	内蔵電池	内蔵電池	内蔵電池
検知出力	デジタル出力 (データロガー接続時、要電源)	デジタル出力	デジタル出力	デジタル出力	デジタル出力
センサ価格	数万円程度	10 万円程度	数万円程度	数万円程度	数万円程度
連続使用時間 (電池無交換)	(電池不要)	最大 5 年程度	最大 5 年程度	10 分間隔計測で 1 年間程度	最大 5 年程度
耐用年数	約 10 年程度	約 10 年程度	約 10 年程度	約 10 年程度	約 10 年程度
設置性	人力で設置可能	人力で設置可能	人力で容易に設置可能	人力で容易に設置可能	人力で容易に設置可能
寸法・重量	60W×60D×900H mm 重量: 1.5kg	φ114×205L mm 重量: 1kg 程度	φ83×240L mm 重量: 1kg 程度	100W×100D×200H mm 程度 重量: 0.3kg	φ100×140H mm 重量: 0.6kg

深川³⁴⁾らにより、平成 18(2006)～20(2008)年度に「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」の研究テーマの一つとして「センサーネットワークを利用した次世代型斜面防災システムの構築」について研究がなされ報告された。

本研究では、平成 18 年度～20 年度に、すべり厚さが数 10 cm～数 m 程度の表層すべりを対象として、ワイヤレスセンサーネットワークシステムとそのアルゴリズム、多点計測の容易化、コスト削減、メンテナンスの容易化、システムの信頼性向上を図り、室内土槽試験による斜面崩壊メカニズム検討、現地斜面での試験運用などについての研究がなされた。ワイヤレスセンサーノードはテンシオメーター、温度計、圧力計などのセンサーと通信部からなり、気象センサーユニットでは気温、相対湿度、露天温度、風速、10 分間雨量を計測した。データ分析・集約システムには、センタデータを分析する機能、および、分析結果から警報をワイヤレスセンサーネットワークの基地局 PC マスター DB サーバ Web サーバへ転送する機能、斜面崩壊が予測される場合に警報を通知する機能、センサーデータと分析結果を Web サーバ上で可視化する機能などが備えられた。コスト面については Crossbow 社製センサーネットワークシステムのキット 1 式 50 万円程度を比較対象としているが、厳密なコスト評価はできておらず、実用化に向けて耐候性、避雷性、電源などが課題としてあげられた。

現地試験(図 1 - 3 4)の計測データとして、気象センサーユニットのデータ、ワイヤレスノードのうち間隙水圧の変化が 1 ヶ月間ほど得た。電源電圧の変動がテンシオメータ計測に影響を与えること、動物が気象センサーユニットのケーブルを動物が噛みちぎること、多数のノードを中継する際のデータの取りこぼし、長期間動作のためのノードの省電力化、隣接するネットワーク間の通信の干渉、データ送信の不具合や未送信データが発生したときの検出などをあげている。

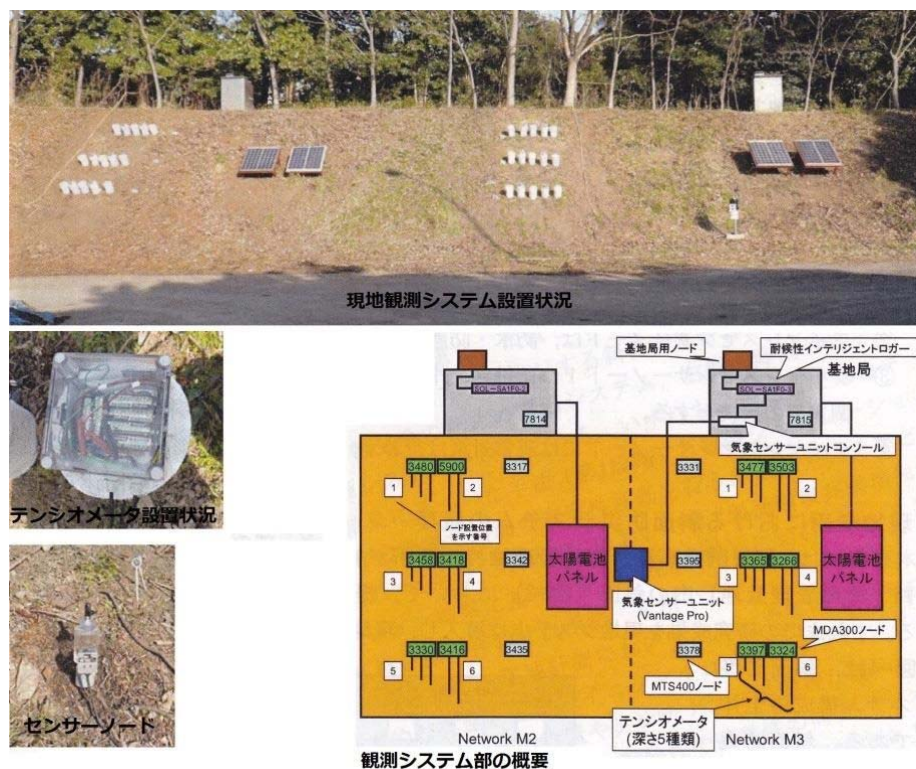


図 1 - 3 4 現地観測システム³⁴⁾

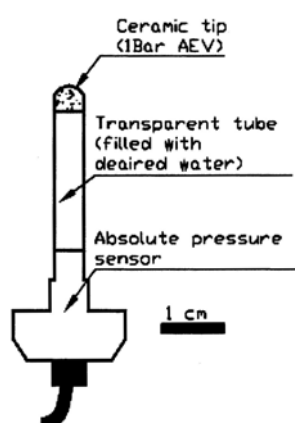
平成 20 (2008) 年、仙台市で開催された斜面防災管理に関する国際会議で、Jotisankasa ら³⁵⁾は、タイの崩壊性斜面の土壌水分特性を調査し報告した。小型のテンシオメーターを開発してサクシヨンの変化を観察し、実験と現地における結果から、土石流や地すべりの早期警報システムを単純化してモデル化できるとした。測定には Kasetsart 大学が開発した M E M S 圧力センサー内蔵の間隙水圧計 (K U テンシオメーター) を実験および現地で用いた。図 1 - 3 5 に装置の概要を示す。

観測されたサクシヨンから現場のリアルタイムの土壌水分 f を換算して下の式に入れれば、土 - 水特性曲線が斜面を飽和するのに必要な降雨量を算定するのに利用できる。

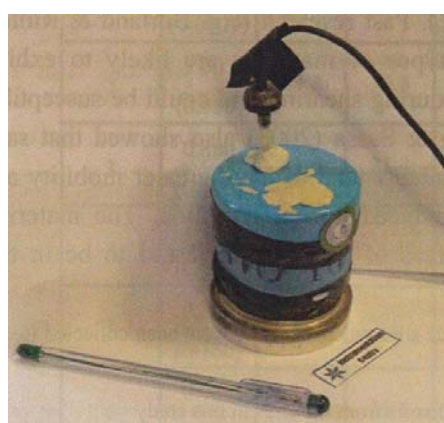
$$R_c = (s - f) \cdot D_c$$

(R_c ; 崩壊までの総雨量、 s ; 飽和近くの土壌水分、 f ; 現場の土壌水分、 D_c ; 浸潤線の深さ)
雨量測定と組み合わせることにより早期警戒システムとして機能させ、K U テンシオメーターによって間隙水圧測定し斜面の安全性をリアルタイムで把握することで、より上位の警報システムを提供し得るとした。

K U テンシオメーターは M E M S 技術の圧力センサーを用いており、低サクシヨンタイプと高サクシヨンタイプの 2 つのタイプが開発された。このうち低サクシヨンタイプは大きさ 5 c m 程度で、先端のセラミックを介して入力できる圧力は 1 b a r、最大で計測可能なサクシヨンは 90 k P a である。ほかに K U - Extensometer、電気式の K U - Inclinator が紹介された。



(a) テンシオメーター



(b) 土 - 水特性曲線を検知する装置

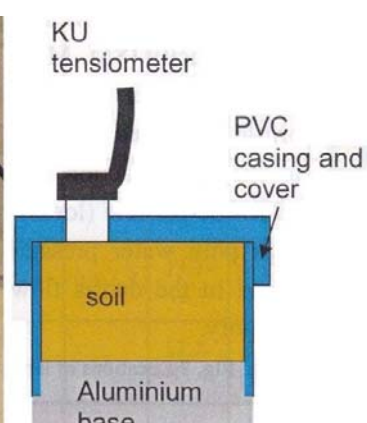


図 1 - 3 5 K U テンシオメーターと土 - 水特性曲線を検知する装置^{35) 36)}

平成 23 (2011) 年、Azzam ら³⁷⁾は、近年の人口増加や気象変動に対して、防災およびリスクマネージメントの観点から早期警報モニタリングシステムの必要性を論じた。彼らは M E M S センサーを用い、ワイヤレスセンサー・ネットワークを介して地理空間情報をリアルタイムの W e b システムとして運用できるようにするという概念を示した。

センサー端末間の通信はラジオ波 868 M H z、センサーは 3 軸加速度センサー、2 軸傾斜センサー、気圧センサーが内蔵され、バッテリーパックで動く。データ通信速度は 4.8 ~ 115 k b i t s / s、このときの距離は 10 m ~ 1.2 k m、ゲートウェイの電源はソーラーパネルである。その他、線形磁気位置検出器と変位検出器を付け加えた。

図 1 - 3 6 に示す現地実験では岩石柱の動きを検知できたものとできなかったものがあり、できなかった場合においては警報システムの誤作動や誤報を招きユーザーからの信頼を逸す、と補足した。測定結果自体については呈示されておらず、結論として地震による崩壊斜面の検知などに応用できることを示した。

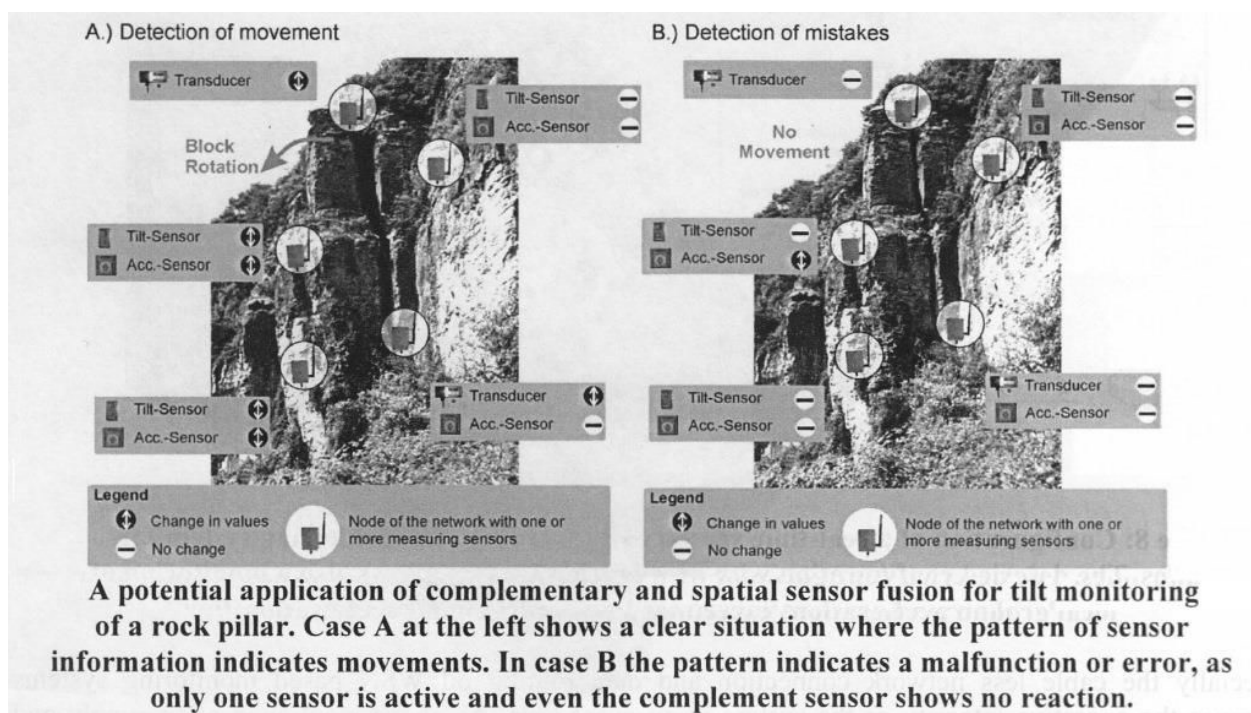


図 1 - 3 6 岩石柱の傾斜をモニタリングするための補完的・空間的センサー配置³⁷⁾

八嶋ら³⁸⁾は、平成 20 (2008) ~ 22 (2010) 年度に行われた「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」のテーマとして「レーザー波干渉を利用した亀裂性岩塊の遠隔からの安全な安定性調査法の確立」に関して研究報告を行った。

落石・崩壊もしくは岩盤崩壊のみに着目すると、全国直轄国道および岐阜県管理道路の防災カルテによれば、平成 8 (1996) 年の総点検時には要対策箇所数が直轄 4,180 箇所、岐阜県 1,637 箇所あったものが、平成 18 (2006) 年の再点検時にはそれぞれ 2,226 箇所、1,317 箇所となって要対策箇所数は減少した。しかし、なかには要対策箇所として新たに格上げされた場合もあり、カルテ対応箇所数では平成 8 年の直轄 6,407 箇所、岐阜県 2,172 箇所から、平成 18 年にそれぞれ 6,819 箇所、2,372 箇所に増加した。要対策箇所とカルテ対応箇所を合わせると、平成 18 年で直轄 9,045 箇所、岐阜県 3,689 箇所あり、発生源対策を必要とする箇所はそれぞれ 1,061 箇所、193 箇所と想定され、かなりの数の危険斜面が存在しているとしている。

そこで、亀裂性岩盤斜面の安定評価法としてレーザー波の干渉を利用する方法が提案・報告された。図 1 - 3 7 のように反射ターゲットはエアガンで設置が可能で、反射剤を混入した塗料でなくても白色の塗料を薄く均一に岩塊に塗布できればよい。この方法では何力所でも計測が可能であり、地震計を設置する時間を節約でき、安全性でも効率性でも優位であり、計測 1 箇所当たり最低 90 万円 (1 計測追加 45 万円) の経費を抑えられた。

図1 - 38では2台のレーザー干渉計により加振中の小型振動台（周波数1 Hz）を同期計測し、1 Hzの卓越周波数を確認した。堤防の天端に不安定岩塊にみたてたコンクリートブロックを2段積みし、レーザー波干渉装置2台と28 Hzの速度計を用いてコンクリートブロックおよび基板部の同期計測を行った。レーザー反射光については、塗料の塗布が厚い場合や雨天ではレーザー反射が得られにくいとしている。対象となる岩塊への見通しが必要となる。

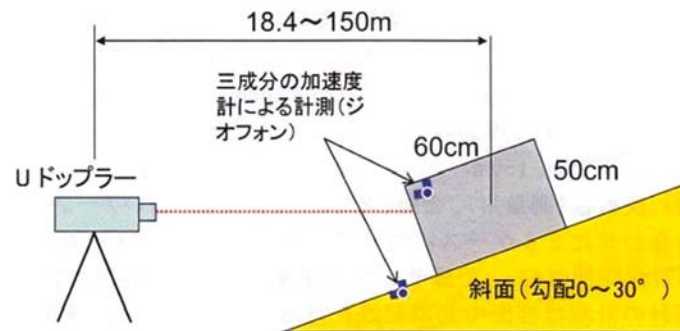
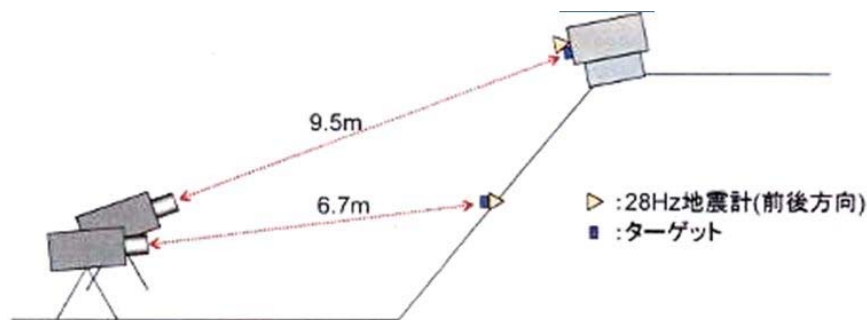


図1 - 37 モデル実験の概要図³⁸⁾



(a) 実験の概略図



(b) ターゲットと地震計の設置状況

図1 - 38 ターゲットと地震計の設置状況³⁸⁾

西山ら³⁹⁾は、平成 23 (2011) 年に、無線機器を利用した斜面変位計測法の研究を報告した。斜面および法面上に設置した特定小電力無線からの電波を遠隔に設置した複数の受信機で受信し、各受信波の等位相差面の交点から当無線機の 3 次元座標を算出することで変位を計測した (図 1 - 39)。1 個の受信機からの電波を少なくとも 4 個の受信機で受信することにより受信機の 3 次元座標を求めた。

実証実験では発信機に人工的に変位を与えて、その変位量を計測し精度を検証した。発信機の周波数は 2400MHz であり、擬似的に 250m および 500m の距離に相当させる減衰機器をとりつけて変位計測すると、外的誤差 (実際の変位と計測した変位との差) は 0.113 ~ 0.026mm、内的誤差 (計測値のバラツキ) は 0.026 ~ 0.035mm に収まった。

さらに図 1 - 40 に示すように、河川を挟んで実際に見通しのきく斜面 6 カ所に 24 個の受信機用アンテナを同一標高になるように設置し、観測誤差を測定した。外的誤差 0.963mm、内的誤差 0.847mm であった。実斜面において発信機と受信機の間を数 100m 以上離れた距離に設置すると、種々の影響により不規則に受信状態が変化し位相の観測誤差が大きくなって観測精度に影響した。このため、周波数帯域をカットするフィルターなども必要とされた。

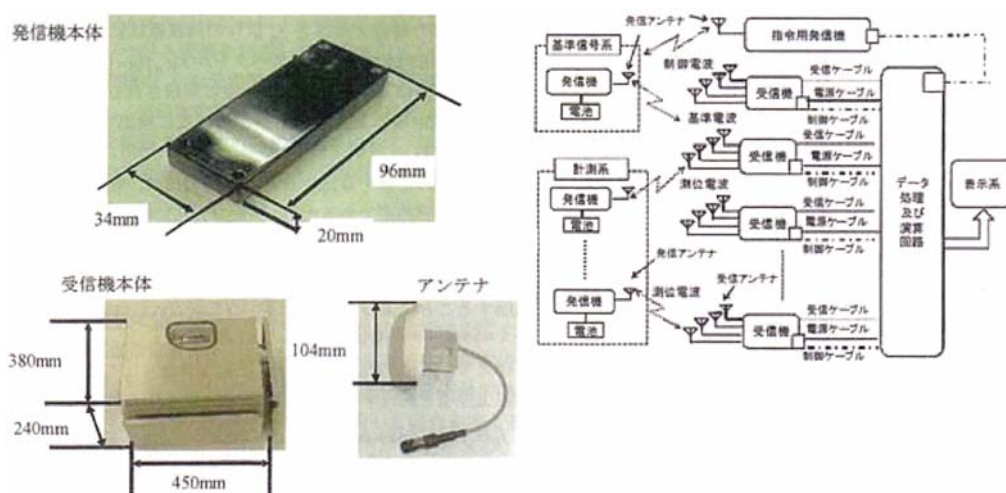


図 1 - 39 発信器と受信機およびアンテナの外観 (左) および計測システムのブロック図 (右)³⁹⁾

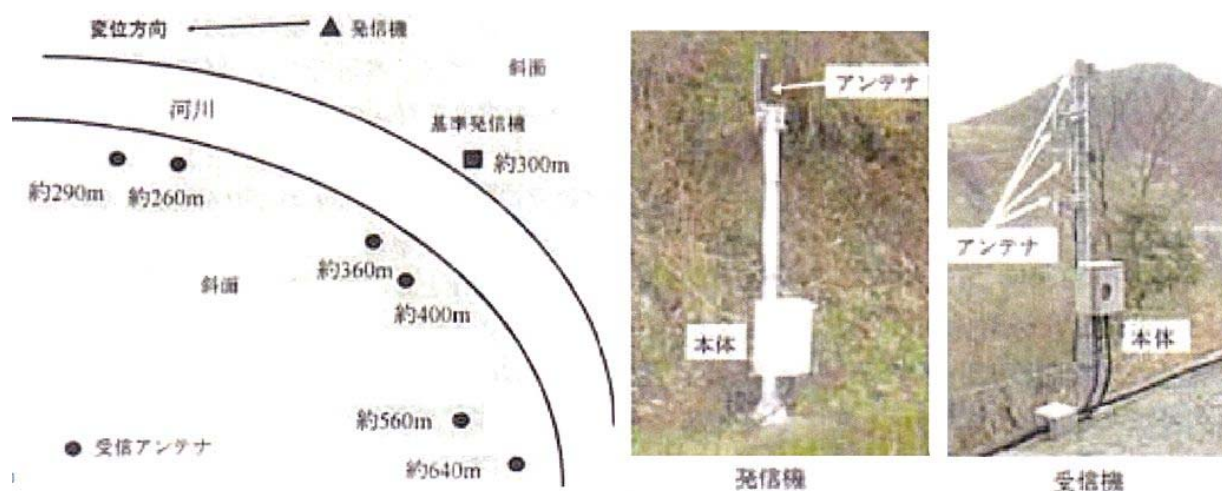


図 1 - 40 実斜面における機器配置 (左) と送受信機の外観 (右)³⁹⁾

平成 22 (2010) 年、Yin ら⁴⁰⁾は、四川省西部の Jiaju 地すべりにおいて、GPS、および、InSAR 技術などを用いて変位観測をした結果を報告した。表 1 - 9 に示すように人工衛星を利用した計測の有効性を確認したが、測定精度は 0.21mm ~ 1 cm オーダーであったことが報告された。

表 1 - 9 モニタリングした手法・機器・精度・観測数・頻度のリスト⁴⁰⁾

Method	Instrument	Accuracy	Numbers	Frequency
GPS	Double-frequency high-accuracy tremble 4000	5 mm in horizontal; 10 mm in vertical	22	Continuous
InSAR	Radar satellite	1 cm	10	Months
In-depth displacement	Borehole inclinometer	4 mm/15 m	3	45 days
Precipitation monitor	CR2-J rain gauge	0.21 mm	1	Continuous

平成 25 (2013) 年 10 月の台風 26 号豪雨による伊豆大島の土砂災害では、火山観測のために多数設置された振動センサーが土砂移動時の振動を検知⁴¹⁾した。振動センサーは、気象庁・火山観測網 4 力所、(独)防災科学技術研究所・火山観測網 (V-net) 4 力所、東京大学地震研究所・観測網 19 力所であり、大金沢堆積工からの距離で整理したものを図 1 - 4 1 に示す。土砂移動は地震波形に現れており、平常時と土砂移動時を比べると 3 ~ 5 Hz の周波数特性で違いがみられ、地震波を解析することにより、島のどこで土砂移動が発生したか (震源) をほぼ特定できるとしている。

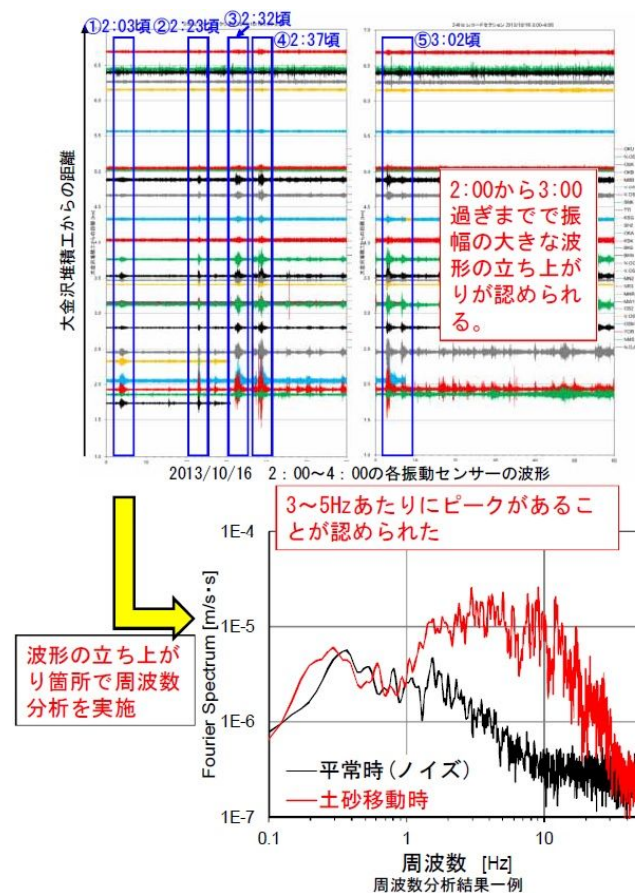


図 1 - 4 1 平成 25 年台風 26 号による伊豆大島の土石流の振動特性⁴¹⁾

平成 15 (2003) 年に、四宮ら^{4 2)}は、盛土と切取の場合で、崩壊が列車運行に直接的に障害となる状況を想定し、盛土崩壊検知用と切取および自然斜面崩壊検知用の 2 種類のシステムを開発し報告した。

盛土崩壊検知システムは、盛土法肩に傾斜センサーを等間隔に設置する方式で、コスト面と誤作動防止の面から、図 1 - 4 2 に示すように 30 ° をしきい値とした単純な ON/OFF 出力の原理で、すでに実用化されている小型傾斜センサーを使用し実用化確認試験を行った。傾斜センサーの設置方法は、実験段階では杭に固定していたが、小型のステンレス製プレート（オフセット金具）上に固定する方式に変更し、盛土法肩部に深さ約 15 c m で埋設し、傾斜センサーの設置間隔を最小崩壊幅 5 m の半分以下の 2 m とし、ケーブルはエフレックス管で防護した。盛土崩壊が起るとオフセット金具が傾き傾斜センサーが傾きを検知する。

切取崩壊検知システムは最も単純な構造で確実に動作する断線検知方式を基本として開発された。切取・自然斜面の崩壊事例では崩壊幅 10 m 以上で土砂が建築限界内に流入して支障を及ぼす例が多いことから、図 1 - 4 3 に示すように検知性能としてセンサーケーブルを 8 m 間隔で固定し、中央部では 500 m m 以上の変位で断線する構造とした。人や動物などの接触による誤作動を懸念し、また、様々の崩壊形態に対するために、センサーケーブルを高さ 0.8 m のパイプフェンス上部に固定する構造とした。

本システムの開発コンセプトは、予兆をとらえるのではなく実際の崩壊を ON/OFF の 2 値でとらえることにより、開発・導入コストを下げ、設置環境や人為的な条件によらず確実な動作を目指すものである。

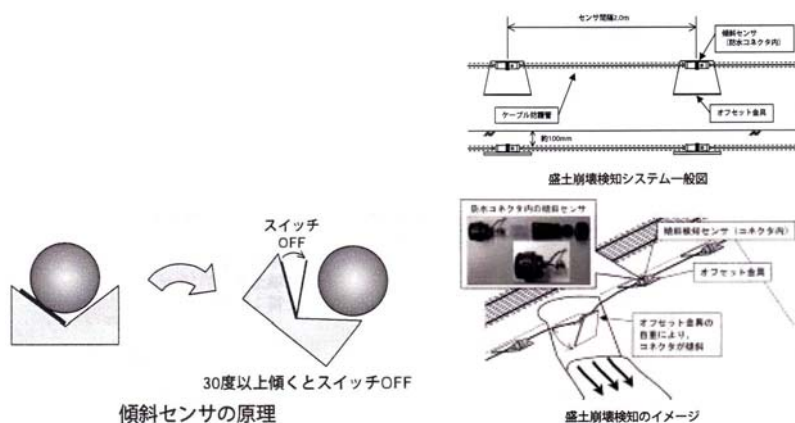


図 1 - 4 2 盛土崩壊検知の原理・一般図・イメージ^{4 2)}

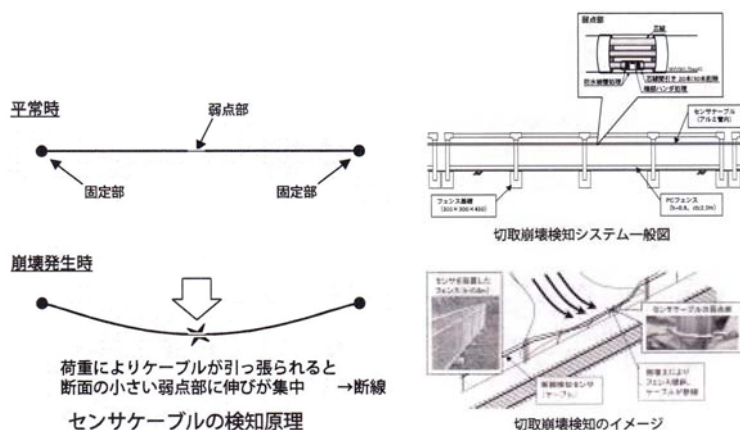


図 1 - 4 3 切取崩壊検知の原理・一般図・イメージ^{4 2)}

平成 23 (2011) 年に、芥川^{4 3)}は、簡易な装置を用いて原位置でわかりやすく表示して危険を可視化する新たな考え方を On Site Visualization (OSV) と名付けて呈示した。OSVはその場所にいる関係者に危険性をいち早く知らせることを重視し、LED やレーザー光などを用いて現場で可視化するものである。発光する光の色に応じてアクションプランを定めれば迅速な行動に直結するといえる。ツールとしては、光る変位計 (2 点間の相対変位を光で表示) 、光るコンバーター (既存の計測装置に視覚的アウトプットを付加) 、光る傾斜計 (傾斜を高精度で計測し光で表示) 、レーザー光線利用 (レーザー光の直進性や反射特性を利用) などがあるとしている。

Single Observation Point 法 (SOP 法) では光源と鏡を用い計測対象物の変状を可視化して監視する。図 1 - 4 4 に示すように、SOP 法では鏡のサイズと設置距離の組み合わせにより計測箇所に応じた精度を確保できる。光源と鏡があれば広範囲のモニタリングを低コストで行える。また、光ファイバーを利用する場合は、図 1 - 4 5 に示すように高輝度 LED などの複数色の異なる光源から多量に光を分散させ、任意の 2 点間の相対変位を計測する。発光色の異なる光ファイバー (直径 1mm) を一列に束にして固定し、発光させて直径 1mm の穴のあるフィルターを通して目視すると、送光部とフィルター部分がスライドすることにより変位を mm 単位で監視できるとした。

OSV の特長は、変状検知部に電気を使用しないことであり、自然光を用いれば電気依存度をゼロすることも可能である。安価で簡易な手法により変状の発生区域を早期に特定し詳細なモニタリングへ移ることが可能となる。

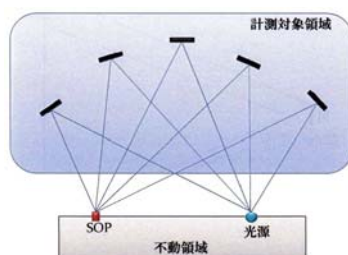


図 1 - 4 4 SOP 法の基本的な設置の例^{4 3)}

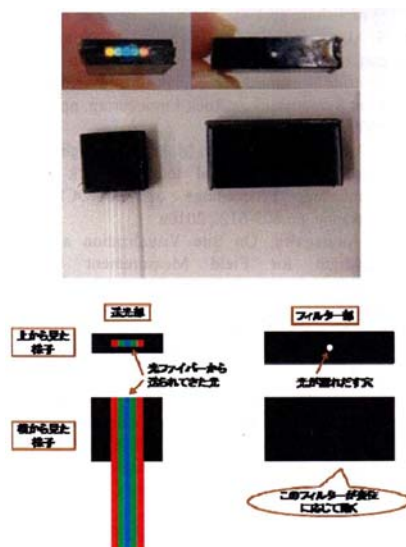


図 1 - 4 5 光ファイバーを利用した変位計概要^{4 3)}

平成 23 (2011) 年、平岡ら⁴⁴⁾は、斜面崩壊を予測するために必要な土中水分量や地下水位を計測するため超音波による観測システムを提案し、検出器の埋設化と高周波化について研究報告した。図 1 - 4 6 では、露出型における土壌水分状態の違いによる超音波反射強度を示しているが、露出型の場合、設置作業が容易である反面、温度や景観・動物の影響があるとされた。導波管を短くして検出器全体を小型化し地中埋設するには、今まで 40 k Hz のトランスデューサーの周波数を上げ分解能を高くする必要が生じた。空気中の超音波の伝搬速度 C (m / s) は気温 t (摂氏) に対して、 $C = 0.607 t + 331.45$ で表され温度依存するため、導波管中に針を置き針からの反射波を計測して水面までの距離の温度補正を行った。95 k Hz と 190 k Hz のトランスデューサーについて乾燥状態、湿潤状態、水面の 3 種類に設置して計測した結果、図 1 - 4 7 (a) のように 95 k Hz のものが最も波形が鋭く導波管を短くした場合でも明確な波形を得られることがわかった。

信楽産まさ土を用い人工降雨実験を行った結果、同図(b)に示すように誘電率土壌水分計による体積含水率のデータと超音波検出器 (95 k Hz) の反射強度データがほとんど同じ傾向を示し、超音波検出器で水分状態を検知でき、さらに、試験開始から 6 時間後に降雨を止めてカラム下端から注水を始め 6 時間 30 分後に導波管下端まで地下水位が到達したこと (すなわち地下水位の上昇) を伝搬時間の減少から検知した、と報告した。

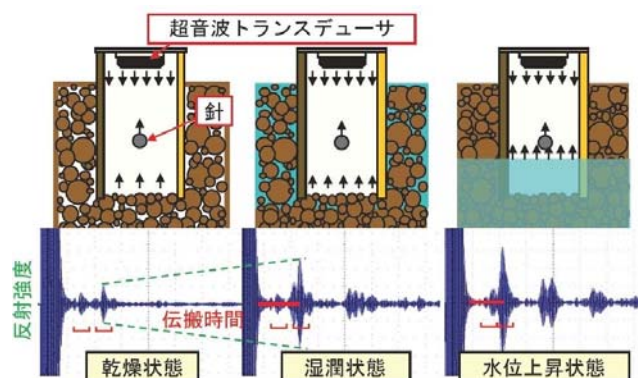


図 1 - 4 6 超音波検出器概略図⁴⁴⁾

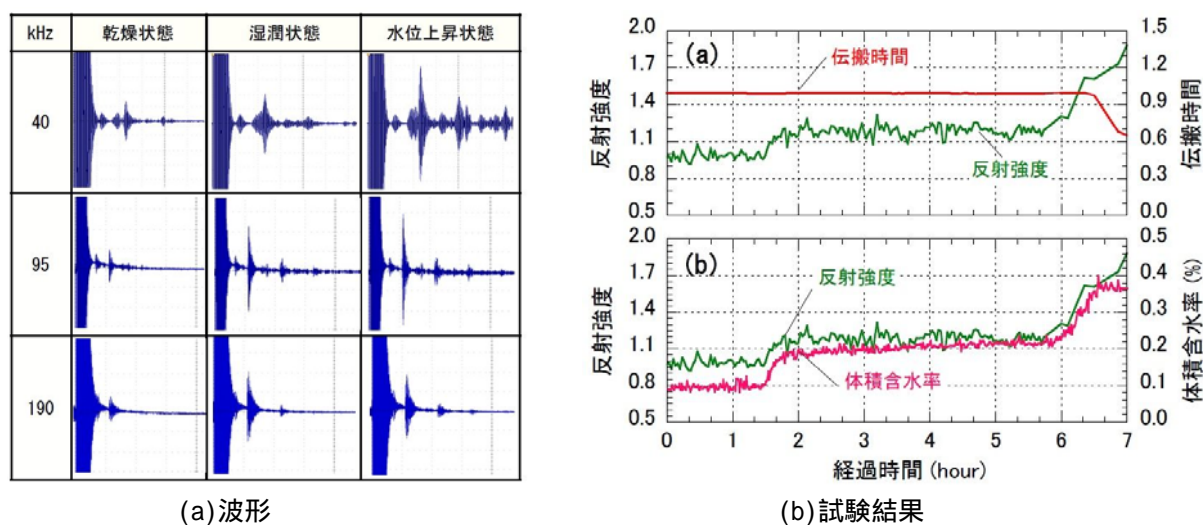


図 1 - 4 7 各周波数の波形と試験結果⁴⁴⁾

平成 19 (2007) 年、鵜飼ら⁴⁵⁾は、地震波を自動検知して地震時の加速度をMEMS による 3 次元加速度センサーで計測し、計測データをセンサーノードにより無線送信し、インターネットなどを経由して遠隔地のデータセンターに送信してデータを管理・蓄積し、あらかじめ指定されたネットワークへ配信することが可能なシステムを開発した。システムは、屋外での設置を想定した防水構造で、かつ低消費電力で電池での駆動が可能であり、3 次元加速度センサーのみを地中に埋設する。遠隔地からのデータ確認や無線状態や電池の消耗度などもデータセンターへ送信され、システムの保守も遠隔で行えるものであるとした。

装置本体は縦 45mm × 横 60mm × 高さ 25mm で配線不要であり、様々な対象に容易に設置できるとした。これは、平成 18 (2006) 年 1 月から販売されていた近距離無線規格である ZigBee (IEEE802.15.4) を利用した無線センサー製品「日立 AirSense」⁴⁶⁾ (図 1 - 48) のうちポータブル型をベースとするものであった。これまで計測を行うことが困難とされた場所や広範囲の計測を行う必要のある場所 (自然斜面、ビル、橋梁、道路、鉄道、トンネル、高架など) での設置が容易になり、地震時の被災や性能劣化モニタリング、災害発生メカニズムなどへの活用が期待され、これまでの高精度計測器に比べ経済性に優れるためセンサーを高密度に設置可能で詳細なデータ計測が実現できるとした。群馬県高崎市の地すべり防止区域や群馬大学工学部棟に設置し実地実験を行った。

2006 年発売のポータブル型無線センサーの価格は、ノード 4 台、ルータ 2 台、ゲートウェイ 1 台、ソフトウェアの合計一式で 94 万 5 千円が呈示されている。

本研究では、センサーとセンサーネットワークのハード自体から開発し実証試験を行うものである。



(a) ポータブル型無線センサ



(b) リストバンド型無線センサ

図 1 - 48 ZigBee 無線センサー (日立 AirSenseTM)⁴⁶⁾

平成 23 (2011) 年、小泉ら⁴⁷⁾は、土壌水分センサと傾斜センサを搭載し小型でローコストの無線式センサーノードを斜面に面的に配置するモニタリングシステムを報告した。センサーノードの電源は小型バッテリーで 3 年間メンテナンスフリーとした。対象斜面としては、雨水浸透により飽和した風化層と不飽和の風化層の境界面が直線的にすべると仮定して、すべり面の安全率が 1 となるような限界高さ (深さ) H_c を算出してセンサ設置深さを決定した。また、対象斜面から試料採取し保水性試験を行って飽和時の体積炭水率、排水過程の水分特性曲線を求め、図 1 - 49 示すように警報を発する点と警報解除の点を求めた。

図 1 - 50 には模型実験結果を示した。模型実験は高さ 20 cm、幅 30 cm の大きさで、斜面途中の上下に 2 つの土壌水分センサを埋め込み、傾斜は色を付けた木串を定点カメラで画像解析して求めている。降雨開始から 400 ~ 500 秒で体積含水率が上昇、1200 秒後に下端部で湧水を確認、1800 秒後に下側

の土壌水分センサで体積含水率が上昇するとともに木串に傾斜変位が現れ始め、5630 秒程度で表層崩壊した。

無線センサネットワークは複数のノードを中継して基地局へデータ転送され、豪雨による地盤の水分挙動と変形挙動に応じて4段階（正常、注意、警告、災害）のの法事機能を持たせた。実証実験は高速道路沿いの法面で2月～8月まで行われ、豪雨時の法面の体積含水率がしきい値を超えたときに「注意」を発し、規制値以内に帰った場合「正常」を発するものとした。図1 - 5 1に実証実験での体積含水率とサクシヨンの推移を示した。

図1 - 5 2にシステムのフローチャートを示した。豪雨時に法面のセンサノードの体積含水率がしきい値を超えた場合「注意」とし、降雨が継続しセンサーノードの傾斜角度が微小変位のしきい値を超えた場合「警告」、大変位のしきい値を超えたら「災害」を発する。この際に誤報防止のため2台以上のセンサノードがしきい値を超えた場合にアラートを発するものとした。

以上の内容から、実証実験における傾斜量データについては報告されていない。体積含水率（サクシヨン）についてはすべり面がある程度明確になっている場合に適用性が高いものと考えられる。

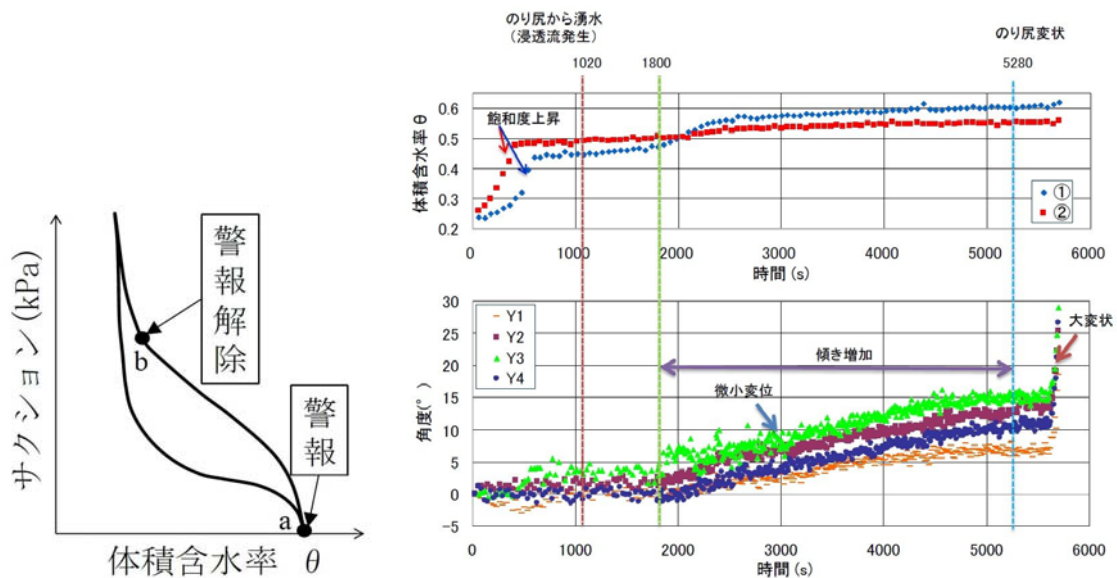


図1 - 4 9 水分特性曲線概略図^{4 7)}

図1 - 5 0 土壌水分センサおよび傾斜センサの時系列変化^{4 7)}

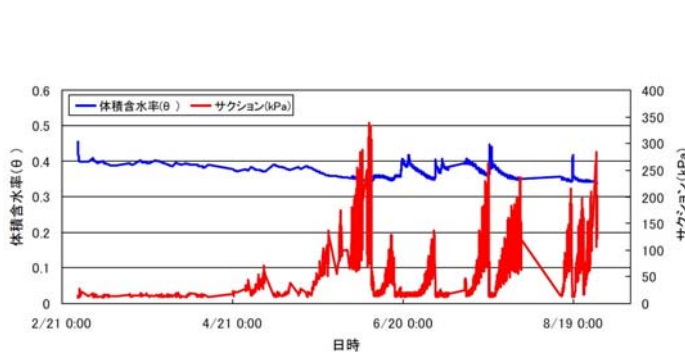


図1 - 5 1 計測データの一部^{4 7)}
(深度 20 c m)

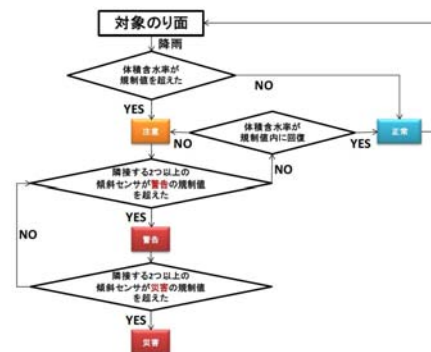


図1 - 5 2 多点型土砂災害予測システムのフローチャート^{4 7)}

平成 22 (2010) 年、荒木ら⁴⁸⁾は、国土地理院が提供する電子基準点の 24 時間連続変動観測によって作成される X Y Z 座標と楕円体高 (標高変動に相当) を用いて地殻変動を解析し、地震・火山・土砂災害リスクの予測を行った。各基準点で X 軸・Y 軸・Z 軸座標値は 3 月と 8 月に極値をもち、季節変動を伴って年変動するとした。定常的地殻年変動はプレートの沈み込みの影響を受け、非定常地殻変動は地下水位 (降水量) の影響を受け、降水量変動によって地下水位 (地層間隙水圧) が変化すると、地下水位変動によって水平方向に圧縮力と引張力を受け、せん断力が増大する。

図 1 - 5 3 に示す二点間の年変動速度は、プレートの沈み込みによって、概ね $\pm 0.5\text{ppm}$ の範囲内で増減を繰り返し、区間によっても異なる。二点間距離は経年的なトレンドを持つものの漸移的・連続的ではなく、地震イベントなどによって段階的・不連続的に推移する。列島骨格の面積年変動 (面積年変動量 / 面積) は 1ppm 以下とした。

こうした電子基準点の座標変動、電子基準点間の距離の年変動、降水量やプレートの影響を受けた面積変動、中長期的災害リスクに関わる定常地殻変動、短期的災害リスクに関わる非定常地殻変動などによって、地震・火山・土砂災害のリスク予測をすることができるとした。地域特定や前兆捕捉については、面積年変動から地域の特長を、三角網の面積日変動から前兆を捕捉することができる可能性を指摘した。図 1 - 5 4 にあるように、地震 (2003 年 9 月 26 日に発生した十勝沖地震 (M 8.0)) 前後で面積日変動が変化することを示した。

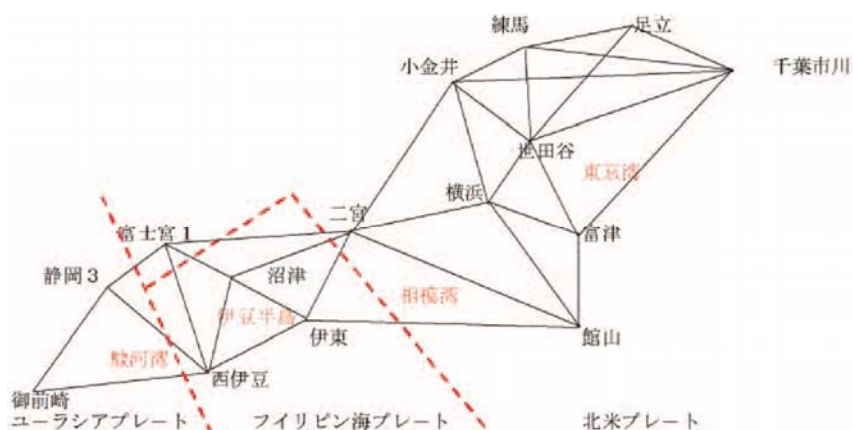


図 1 - 5 3 二点間距離の年変動解析地域概略図⁴⁸⁾

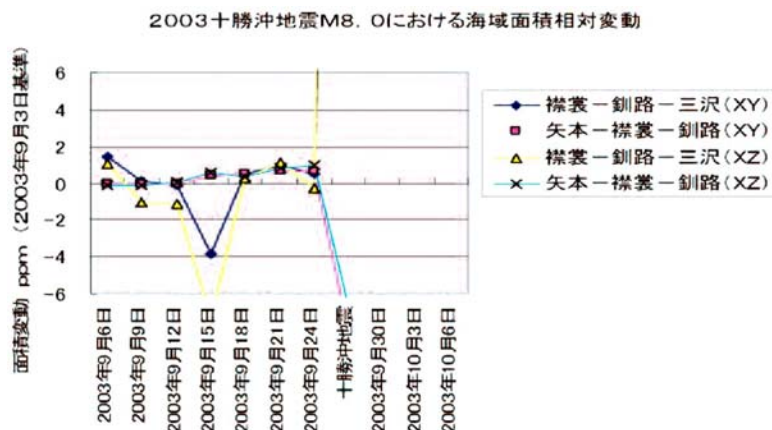


図 1 - 5 4 2003 年十勝沖地震直前の海域面積変動⁴⁸⁾

1.4 警戒警報や住民の避難に関して

平成 14 (2002) 年に Kumar ら⁴⁹⁾は、米国・国防総省・高等研究計画局 (DARPA) の SensIT (Sensor Information Technology) プログラムを報告した。それによれば、SensorIT プログラムは軍事目的として DARPA が 3 千万ドルを出資して、MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術をベースに平成 8 (1996) 年から実証試験を行ってきた。

従来型の技術では、1 ノード、プログラミング不可能、2 値検知 (on/off)、大型高消費電力、高価、長い帯域の検出法といったことが前提となっているのに対して、SensIT 技術では、複数年で一定水準の警戒を行えるように、コンパクトな計器、多様で高密度な配置、小さな接続負荷、長い間隔での応答性、長期間の稼働性などを備えるセンサー情報システムを開発するものとしている。センサーとしては、地震センサー、音波センサー、赤外線センサー、環境系 / 化学系センサー、イメージングセンサーなどがあげられているが、センサー自体の開発が目的ではない。図 1 - 55 にあるように、種々の情報がノードとゲートウェイを介してサーバーに集まり、インターネットを介してユーザーへ伝達され全体でコミュニティの共通プラットフォームを形成し、有効な解決法を見出す仕組みである。併せて、ネットワークシグナル処理、データベース言語やアプリケーション、暗号化処理、適応性があり再設定可能で策略検知、発散のネットワークプロトコル、自律的無線ネットワークなどの技術確立が必要となっている。

センサーネットワークは、複数のセンサーが基地局に相当するノードを介し、あるいは、センサー間で直接通信するネットワークシステムである。センサーとしては、位置、加速度、方位、圧力、振動、温度、水、磁気、人体などの情報を検知するセンサーが考えられる。センサーネットワークに複数のセンサーを接続し、センサーによる中継やセンサー間の通信を行う。複数のセンサー同士が協調することにより、ユーザーに対して仮想的な一個のセンサーに見せることが目標とされ、単にセンサーをつなげただけのネットワークをセンサーネットワークとは呼ばないとされる。

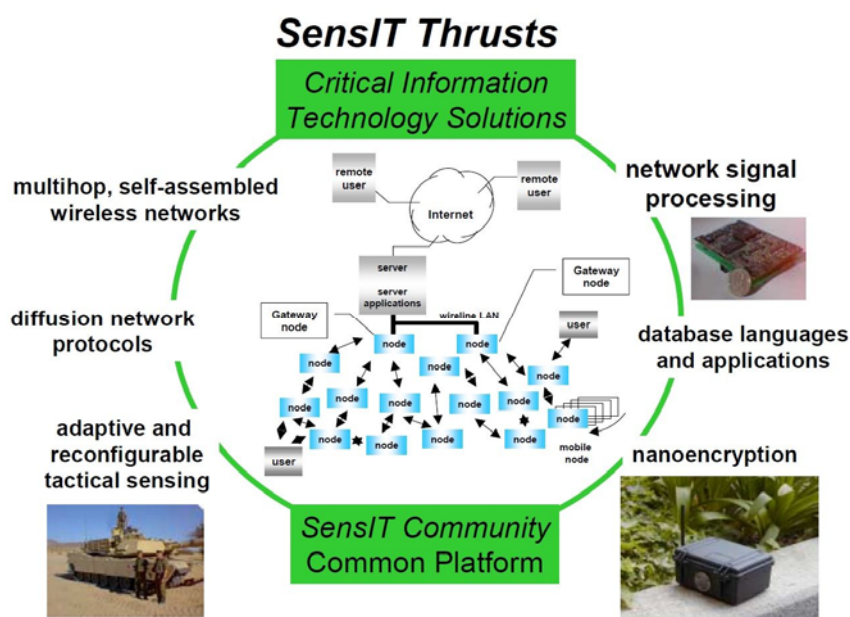


図 1 - 55 SensIT の推進⁴⁹⁾

日本では平成 16 (2004) 年に竹内⁵⁰⁾が総務省として u - J a p a n (u は ubiquitous の意味) の取り組みを報告した。この中には図 1 - 5 6 に示すように、地震防災・斜面防災などを遠隔から監視・制御するという防災用途の研究開発がテーマとしてとりあげられた。センサー自体がルーターとしての機能を持ち、センサーが任意の方向へ変位しても、常に適正な通信を継続・維持できるアドホックネットワークを形成する。

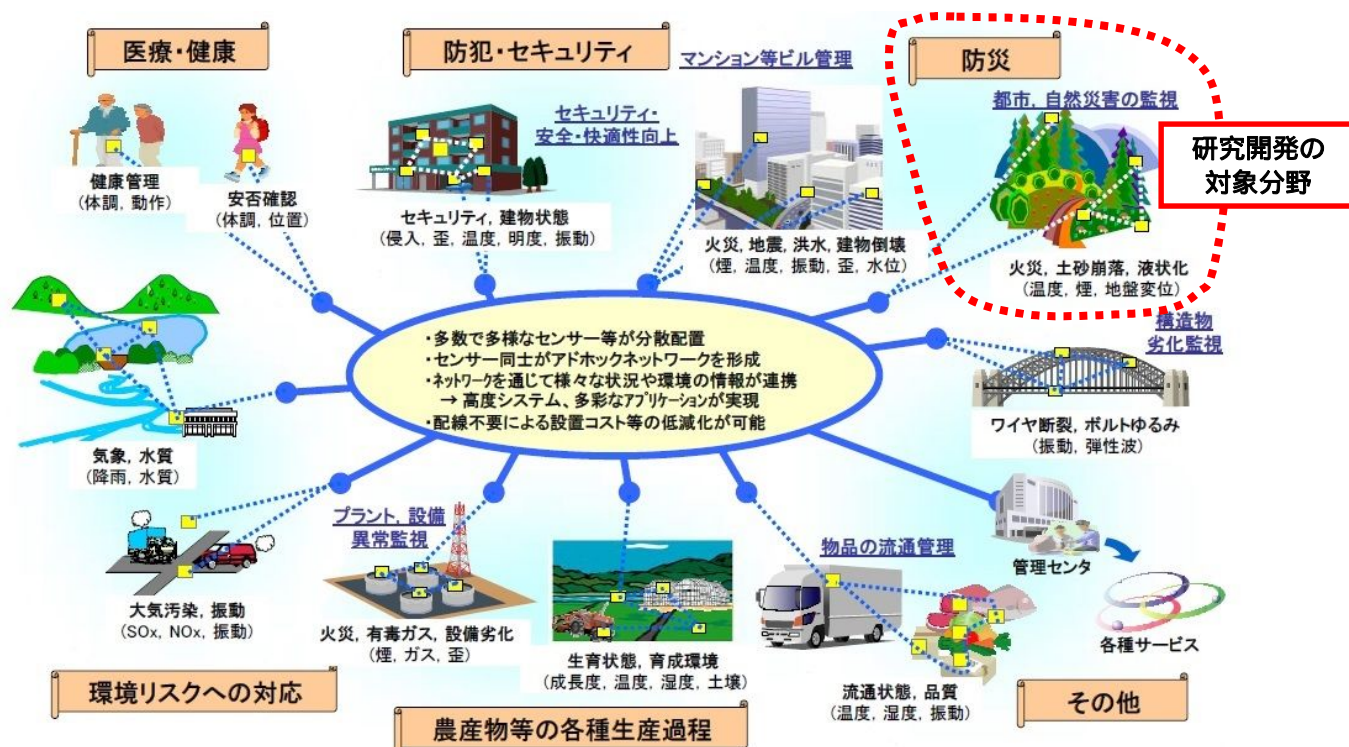


図 1 - 5 6 ユビキタスセンサーネットワーク技術の研究開発⁵⁰⁾

平成 13 (2001) 年 7 月から東京ガスでは、供給エリア内 4,000 カ所 (約 1 km² に 1 基) に地震センサー (S I センサー) を設置し、地震を検知すると地区単位でガス供給が自動的に遮断 (遠隔操作の遮断も可能) する世界的に先進的地震防災システム (S U P R E M E)⁵¹⁾ を運用開始した。図 1 - 5 7 に遠隔監視地点を示す。これにより、阪神・淡路大震災クラスの地震が発生した場合、作業員が個々に出向いて供給を停止すると 40 時間かかると想定される停止処理をわずか 15 分でできるように短縮した。

地震情報も約 10 分で高精度に収集できるようになり保安レベルが向上した。S U P R E M E⁵²⁾ は導管被害推定機能を有し、東日本大震災の際には地震直後 5 分で地震動情報収集、10 分で第 1 次 (即時) 緊急停止判断、20 分までに中低圧導管の被害推定と火災・停電・液状化などの状況把握を行い、的確な供給停止判断と早期復旧動作を実現した。S U P R E M E で収集した地震情報をリアルタイムで提供するサービス (有料) も開始している。

本研究の対象は主に山間部の自然斜面であり、S U P R E M E が運用されている都市内とはインフラやアクセスなどにおいて状況はかなり異なるが、広範囲のエリアにセンサーネットワークを配置し、リアルタイムで遠隔で監視して、異常があれば早期警報を発信し、災害リスクを未然に抑止するという機能の実現において、よい事例となるものと考ええる。



図 1 - 5 7 SUPREME 遠隔監視地点^{5 1)}

平成 22 (2010) 年、Baum ら^{5 3)}は、降雨によって発生する米国の浅層の斜面崩壊と土石流に対する早期警戒の手法について報告した。シアトル地区の斜面の早期警戒管理は 4 段階に分けられており、第 1 段階:Null、第 2 段階:Outlook、第 3 段階:Watch、第 4 段階:Warning となっている。第 3 段階(Outlook)以上では、準備時間として 24~48 時間、1~12 時間、1~3 時間の 3 段階とり、地すべり地域の土性と降雨量に基づいた 3 つの指標 (CT:累積降雨量による指標 (Cumulative Rainfall Threshold)、AWI:土の乾湿性を表す指標 (Antecedent Water Index)、ID:降雨の時間と強度による指標 (Rainfall Intensity-Duration Thresholds) の各しきい値で行動管理している。図 1 - 5 8 に同地区における土砂災害履歴に基づいた降雨時間と降雨強度の対数分布図を示した。

リアルタイムモニタリングは、地すべり地での雨量計測が重要であり、気象レーダーや気象衛星の雨量予測がピンポイントの崩壊予測を行うために役立つとした。同時に、土壌水分、間隙水圧、地形変位といった地盤工学的特性のモニタリングが崩壊を起こしそうかどうかを見極めるために必要としている。これらのモニタリングのうち、季節変化に影響される土では土壌水分が重要となる。融雪時の斜面安定に対して地盤工学的モニタリングが最も効果的と報じた。

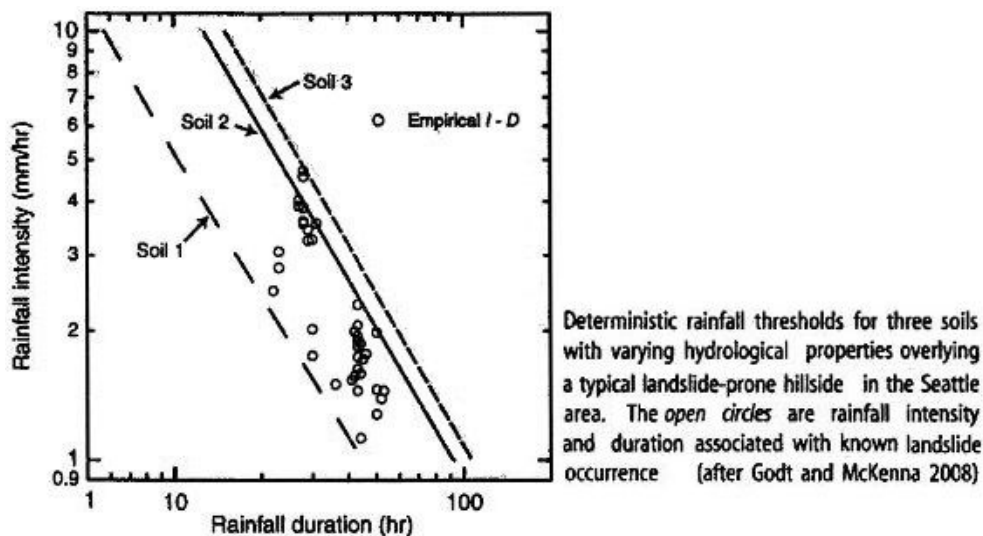


図 1 - 5 8 シアトル地区における降雨時間と降雨強度の関係^{5 3)}

Massey ら⁵⁴⁾は、ニュージーランドの Ruapehu 山における後退性斜面崩壊に伴って発生した火口湖の湖水氾濫に対する警報システムの成功例を報告した。平成 19 (2007) 年 3 月 18 日に、火口湖の水が氾濫しないよう障壁となっていた火口湖外周部の小段のところまで浸食が進み決壊に至った。警報システムには、漏水、湖水位観測、決壊や洪水氾濫を検知するためのワイヤ、微動計などが含まれた。表 1 - 10 に示すように湖水位に応じて警報レベルを 1 ~ 5 段階に分け、各々について行動内容を定められた。

表 1 - 10 ERLAWS (Eastern Ruapehu Lahar Warning System) の警報 (警戒) レベル⁵⁴⁾

Level of readiness (warning level)	Lake level (msl)	Simplified explanation (conditional probability of dam failure based on Gillon et al. 2006)	Actions (mostly agency response time)	Anticipated time for lake to rise to next level (in summer, based on fill rates 2000-2005)
Normal	Below 2,527 m	Base level of readiness as per normal civil defence planning	Planning, preparation, and training	
Level 1	2,526.5 m	Critical trigger point, 3 m below the new rock overflow level. (Waves caused by small eruptions or landslides could overtop tephra barrier but resulting lahar would be small)	Planning largely completed. Response capability available. Response within 30 min	1 to 6 months to fill from Alert Level 1 to 1b
Level 1b	2,529.5 m (Lake 100% full)	Lake reaches to the buried rock rim outlet level at the base of the tephra dam. Probability of dam failure at this level is still very low	Planning completed. Full response capability available and ready	1 to 6 months to fill from Alert Level 1b to 2
Level 2	2,533 m	Sudden collapse could produce a lahar equivalent to the 1975 event (largest historic eruption lahar) which passed under downstream road and rail bridges without significant damage. Conditional probability of dam failure at this level is 1-2%	Response within 20 min (for example, this required one local police sergeant to always be within 20 min of base from this time on)	0.7 to 1.9 months to fill from Level 2 to 3, or 7.8 months to drop to Level 2 from Level 3, depending on infill rates. Variation due to the possibility of filling spanning fast and slow filling rates, and seepage. Slow fill rates will probably result in net drops in lake level above about 2,532 m
Level 3a	2,535 m	Equivalent to a large moderately fast lahar. Conditional probability of dam failure at this level is 5-10%	Response within 10 min	0.4 to 0.6 months to fill from level 3 to 3b, or 3.2 months to drop to level 3 from 3b
Level 3b	2,536 m	Conditional probability is 50-60%		0.2 to 0.3 months to fill from level 3b to 4, or 1.1 months to drop to level 3b from 4
Level 4	2,536.5	Equivalent to a large, fast lahar. Conditional probability is 90%	Response within 5 min	0.2 to 0.3 months to fill from level 4 to 5, or 0.7 months to drop to level 4 from level 5
Level 5	2,536.9	Lake at top of the tephra dam. Conditional probability is 100%		

平成 22 (2010) 年に、Osanai ら⁵⁵⁾は、放射基底関数 (Radial Basis Function Network) を用いて、降雨により発生する土砂災害に対する土壌雨量指数を用いた早期警戒警報について紹介した。

この土砂災害早期警戒システムは、平成 19 (2007) 年に国土交通省と日本気象庁により運用開始された。図 1 - 59 に示すように、5 km メッシュに区切ったエリア内で表層の滞水を 3 層のタンクモデルで表し、それらの水頭合計を、土壌雨量指数として表す。このシステムに雨量データをプロットすることにより、住民を災害発生前に避難させるため、自治体の首長がいつのタイミングで避難指示を通報するかの判断を補助するものである。降雨予想によって 1 ~ 3 時間後には累積雨量と土壌雨量指数 (soil-water index) による限界線 (CL) を超過すると予想されるような場合、警報を発することによって住民が避難するための十分な時間をとることができる。

図 1 - 60 に示すとおり、土砂災害の危険度は 4 段階でレベル分けされ、各レベルで危険回避のための推奨行動が明確にされており、

レベル 1 : 3 時間後に予想雨量合計が限界線を超えると予想される場合で住民への通報が望ましい状態

レベル 2 : 2 時間後に超えると予想され住民に避難所へ移動するよう通報が望ましい状態

レベル 3 : 1 時間後に超えると予想され、危険地内の住民に避難所への移動確約が望ましい状態

レベル 4 : 限界線を越えていつ土砂災害が発生してもおかしくない状態

とされる。

このシステムのメリットとしては、災害記録のない地域でも適応可能であること、システムを運用すれば容易に雨量データが記録され、限界線 (CL) が改訂されることとしている。課題として、

- ・危険度を予測するための短期間雨量データが時間的かつ空間的に十分正確といえるか、
- ・(雨量以外の) 様々の要素が複合され相互作用によって土砂災害が引き起こされること、

・雨量に係わる指標だけを利用して土砂災害を予想することに限界があること、
を付記しており、これらの点を補完できる観測～予測の技術が求められていると考える。

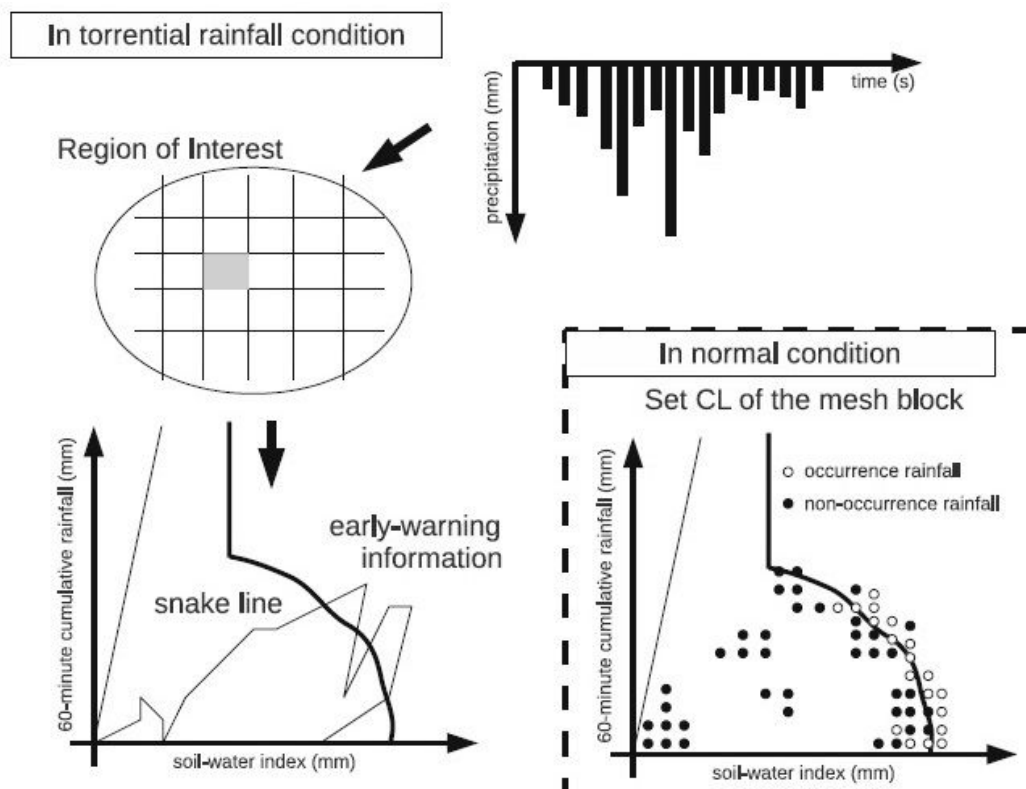


図1 - 59 モニタリングを早期警戒警報に導く基本的考え方⁵⁵⁾

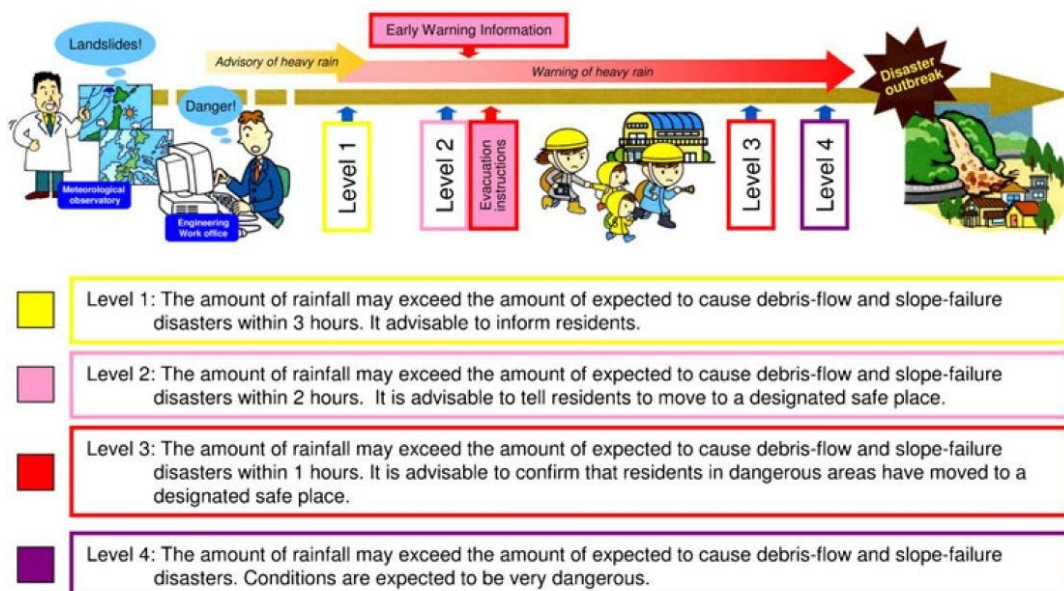


図1 - 60 自治体が発する早期警戒警報における危険レベルと推奨行動⁵⁵⁾

平成 19 年 (2007 年) に国土交通省砂防部から「土砂災害警戒避難ガイドライン」⁵⁶⁾ が発行された。
これは「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律 (いわゆる土砂災害防止

法)」が平成 13 年 4 月に施行され、警戒避難態勢を充実するため土砂災害防止対策基本指針が平成 18 (2006) 年 9 月に変更されたことによるものである。

ガイドラインでは市町村が収集する情報として、気象・雨量情報(都道府県・気象庁等から)、土砂災害警戒情報、前兆現象(住民、警察、消防団等から)、災害発生等の情報、などをあげており、これらに基づいて住民への避難勧告が出される。

避難勧告の発令基準はあらかじめ市町村で定められる。この基準は、気象庁や都道府県が発表する土砂災害警戒情報、国土交通省が提供する土砂災害警戒避難基準雨量、都道府県の観測による時間雨量や連続雨量、現地で確認された前兆現象や周辺地域の災害発生情報などが参考とされる。図 1 - 6 1 に示すように、土砂災害警戒情報は短期・長期の雨量を指数化した土壌雨量指数(土中水分)と降雨強度の実測値および予測値が規準線を越えるかどうかにより決定される。これらは前兆現象などを除き、いずれも雨量情報がベースになっている。

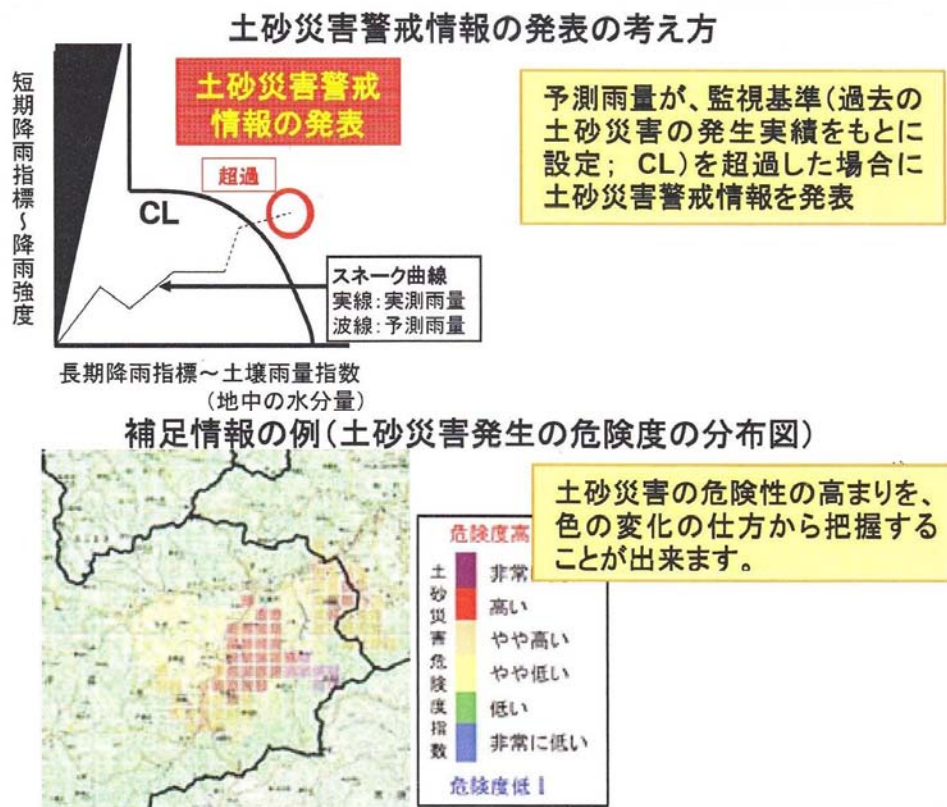


図 1 - 6 1 土砂災害警戒情報について⁵⁶⁾

ここで、前兆現象とは、斜面から小石がパラパラ落ちる、湧水が濁る、溪流が濁る、根切り音がする、などで主として目視や体感によるものである。避難準備・勧告・指示を発するには土砂災害が発生する危険のある箇所を的確に特定する必要があるが、前兆現象を確認したときは直ちに避難するべき危険な状況になっている場合が多い。

二次災害防止については、降雨がピークを過ぎてから突発的に崩壊が発生する場合もあるため、監視員の配置、前兆現象の有無の確認に加え、土砂災害検知センサー設置などの安全確認態勢を組む必要が

あるとしている。避難勧告を解除するには、土砂災害発生箇所の安全確認、避難所から帰宅するための道路などの安全点検・確認をすることとしている。再度災害防止については、施設が整備されるまでの間、警戒避難基準雨量の見直しのほか、土砂災害検知センサー設置などの必要があるとしている。

ガイドラインでは、前兆現象を把握して自主的に避難することを最善としており、行政から「知らせる努力」と併せ、住民が自ら「知る努力」をする必要性を指摘している。土砂災害発生の兆候を判断するのは難しいため、市町村によっては表 1 - 1 1 のように、降雨量とは関係なく前兆現象を認めたときに避難指示を出すところもある。

また、情報の伝達では、防災無線や広報車の放送が豪雨により家の中まで聞こえない場合もあり、重要な情報や避難勧告をホームページやCATV、携帯ネットで広報したり、マスコミを使うなど、情報伝達手段を増やすことが報告されている。行政から住民という一方向だけでなく、双方向型の連絡体制確立が必要としている。

表 1 - 1 1 土砂災害に対する避難基準の一例^{5 6)}
(新居浜市立川・別子山地区以外の山すそ地区)

	避難準備情報	避難勧告	避難指示
前日までの連続雨量が 100 mm 以上あった場合	当日の日雨量が 50 mm を超えたとき	当日の日雨量が 50 mm を超え、時間雨量が 30 mm 以上の強い雨が予想されるとき	土砂災害の前兆現象が認められるとき 土砂災害が発生したとき
前日までの連続雨量が 40～100 mm の場合	当日の日雨量が 80 mm を超えたとき	当日の日雨量が 80 mm を超え、時間雨量が 30 mm 以上の強い雨が予想されるとき	土砂災害の前兆現象が認められるとき土砂災害が発生したとき
前日までの降雨がない場合	当日の日雨量が 100 mm を超えたとき	当日の日雨量が 100 mm を超え、時間雨量が 30 mm 以上の強い雨が予想されるとき	土砂災害の前兆現象が認められるとき土砂災害が発生したとき

土砂災害の前兆現象については、平成 18 (2006) 年 3 月に国土交通省から土砂災害警戒避難に関わる前兆現象情報の活用^{5 7)}について検討がなされた。

土砂災害危険箇所の整備率がいまだ 2 割と低く、土砂災害発生予測情報やハザードマップなどのソフト対策に課題も残るなかで、実際の避難勧告発令や避難判断には前兆現象の情報が決め手となる場合があったとされ、前兆現象がもつ時間的切迫性や物理的裏付けとその活用性が検討されたものである。土石流(天然ダム決壊型、山腹崩壊型、渓床堆積物移動型)、がけ崩れ、地すべりに分けて検討され、土石流やがけ崩れの場合、住民が 3 時間より以前から小石がパラパラ落ちるなどの前兆現象を確認したとされた。

図 1 - 6 2 は、がけ崩れの場合の物理的機構と危険度の増加の関係を示したものである。雨水が斜面に浸透し、斜面が不安定化し崩壊する過程で、前兆現象が発生する。すなわち、前兆現象とは斜面内部に蓄えられた微少な応力ひずみが目視できる現象として地表に現れた結果である。ひずみが進行するのとともに時間軸に沿って現れ、斜面の危険度に応じて典型的な現象として現れるものと考えられる。

報告書^{5 7)}では、前兆現象を視覚/聴覚/臭覚によって類別し示している。また、多くの地方自治体でもホームページなどで一般人向けにより詳細なものを紹介しており、その一例を表 1 - 1 2 を示す。前兆現象は、視覚/聴覚/視覚などの五感(体感)に頼るため、体験や教育を通して何が前兆現象なのか

を予め習得しておくことが重要となる。しかし、実際には深夜に豪雨が発生してももし停電も起きる場合などでは聴覚も視覚もままならないし、臭覚を感じる場合では災害がある程度進行して危険性が高まっている状況もあり得る。つまり、五感に頼る前兆現象の把握にも限界が想定される。また、視覚・聴覚・臭覚をセンサー化しようとしても、暗闇での視認・豪雨時の轟音などの同様の課題が生じることになる。

前兆現象の一つひとつをみれば、斜面が動いた結果、つまり、図1-63にあるように斜面内部で進行するひずみが地表面に現れた結果である。よって、斜面内部ひずみを、精度よくかつリアルタイムに、詳細に検知して危険度の指標に置き換えて周辺住民に通知できるようになれば、斜面防災・減災の一助となるものと考えられる。斎藤の方法⁵⁾は、そうした考えを具体的な予測手法として提示したものであった。斜面内部の微小ひずみをセンサーにより把握することが、前兆現象を体感に頼らずに把握することに通じ、斜面が動いているということをいち早く捉え、防災に役立つものとする。

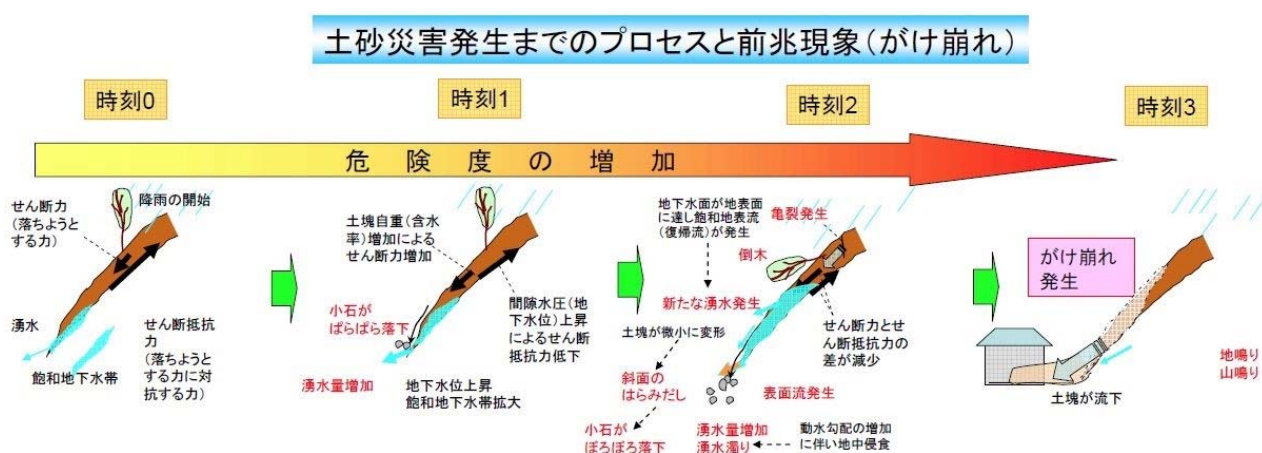


図1-62 がけ崩れ発生までのプロセスと前兆現象^{5,7)}
(時刻歴と斜面の危険度の増加)

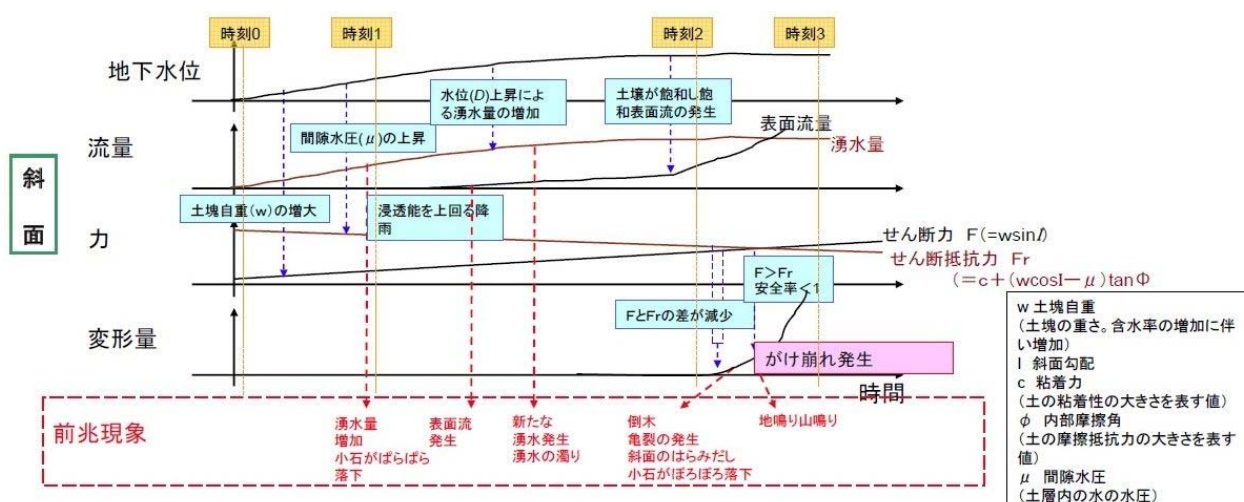


図1-63 がけ崩れ発生までのプロセスと前兆現象^{5,7)}
(時刻歴と斜面および内部に発生する現象)

表 1 - 1 2 土砂災害の前兆現象（５８）から抜粋し整理し直したもの）

区分	前兆現象	五感
土石流	立木の避ける音や大きな岩の流れる音が聞こえる	聴覚
	異様な山鳴りがする	聴覚
	異様なにおい（土臭い、ものの焼けるにおい、酸っぱいにおい、木のにおい）がする	臭覚
	降雨が続いているにもかかわらず、溪流の水位が急激に減少し始める	視覚
	近くで山崩れ、土石流が発生している	視覚
	溪流の流水が急激に濁り出したり、流木などが混ざっている	視覚
	溪流付近の斜面が崩れだしたり、落石などが発生している	視覚
	溪流の水位が降雨量の減少にもかかわらず低下しない	視覚
がけ崩れ	斜面から異様な音、地鳴りが聞こえる	聴覚
	小石が斜面からばらばらと落ち出す	視覚
	斜面に亀裂ができる	視覚
	斜面にはらみがみられる	視覚
	普段澄んでいる湧き水が濁ってきた、水の吹き出しがみられる	視覚
	湧き水の急激な増加、あるいは減少・枯渇が認められる	視覚
地すべり	地鳴りがする、家鳴りがする	聴覚
	根の切れる音が聞こえる、（風の無いとき）木の枝先の擦れ合う音が聞こえる	聴覚
	地面が震動する	聴/視覚
	亀裂や段差の発生・拡大、地表面の凹凸の発生	視覚
	擁壁やクラックの押し出し、舗装道路やトンネルのクラック	視覚
	電線の弛みや引っ張り	視覚
	建物などの変形（戸の締まりが悪くなる。壁に隙間ができる）、橋などに異常を生じる	視覚
	落石や小崩壊の発生	視覚
	地下水の急激な変化（枯渇や急増）、地下水の濁り	視覚
	湧水の流量の変化（枯渇や急増）、湧水の濁りの発生、新しい湧水の発生	視覚

寺田ら⁵⁹⁾は平成 13 (2001) 年に、土砂災害警戒基準雨量の設定手法を整理し、複数の危険箇所を含むような広域的な地域に適する手法として、タンクモデルによる手法、実効雨量による手法、流出水到達時間内の降雨強度による手法、重判別分類による手法について説明した。表 1 - 1 3 に概要を示す。

タンクモデルによる基準雨量の設定手法は、降雨による浸透水が土質特性などに応じて階層的に土中に貯留される様を追跡し、過去の崩壊・土石流などが発生した自邸のタンク貯留高（土中水分量）をもとに発生基準を定めるものであるが、タンクの諸定数の観測資料が地域毎に不足する 경우가多く、定数の同定に困難な面があることが欠点とされる。土壌雨量指数の場合は、過去の降雨による履歴情報を導入し現在の値と比較して相対的に指数化している。

実効雨量による手法は、1 つの流出孔をもつ 1 段のタンクモデルとされ、流出孔の大きさを表すものは減少係数（減衰特性）と呼ばれ、タンクモデルによる手法と同じように、過去の崩壊・土石流発生時点の実効雨量値に基づいて設定される。長雨や断続的な降雨下では不適合となる場合が多いとされる。

流出水到達時間内の降雨強度による手法は、地域毎の流量図を用いて、地表の流出水量が一定（ピーク流量 Q_{max} ）になったときの降雨強度で示される。なお、降雨の流出は、降雨強度、流出係数、流域面積によって合理式で表される。流出水到達時間は地形・地質条件により異なるが、過去の発生 / 非発生降雨を分析することにより経験的に求める方法である。

重判別分析による手法では、降雨量だけでなく、降雨の質的条件、地形・地質などの要因を発生 / 非発生に係わる重みを統計的に評価・選別することで判別式を定める。このため事前作業として多くの地形計測作業などが必要となるが、溪流毎の基準値の設定や類似する溪流を集合して基準値を設定することなどが可能となる。

その他に雨量基準としては、連続雨量、時間雨量、累積雨量がある。連続雨量は道路の通行規制区間

の基準値として用いられ、各地域により打ち切り条件があり、算出が簡単で一般の人にも理解されやすい利点があるが、降雨が中断したときに先行雨量が反映されないなどの欠点がある。時間雨量は毎正時からの1時間の降雨量であり、短時間集中豪雨による災害に適用可能であるが、短時間での規制や長雨による災害への適用が難しいという欠点がある。累積雨量は、降雨の中断に関係なく一定期間（1週間など）の降雨量合計であり、算出が簡単であるが降雨パターンが反映されないという欠点がある。

表 1 - 1 3 主な基準雨量の設置手法の分類と概要（５９）から抜粋）

手法名		指標	対象	概要
タンクモデルによる手法	鈴木ら	1 段目の貯留高 2 段目の貯留高	崩壊 土石流	下方への流出孔と側方への流出孔を設けたタンクを直列 3 段に配置したモデルであり、雨量の入力値に対してタンクに貯留される水量の変化と崩壊・土石流等の発生タイミングにより適合性がみられるとしたもの。最近では、気象庁が土壌雨量指数と称して公表している。
	道上ら	1 段目の貯留高 1・2 段目貯留高計	崩壊 土石流	
	牧原ら	3 つのタンク貯留高計	崩壊	
実効雨量による手法	指 針 案 (A 案)	実効雨量(前期日半減)	土石流	降り始めからの連続雨量に前期の実効雨量を加算した指標を用いて基準の設定や判定を行うもの。
	指 針 案 (B 案)	有効降雨強度 実効雨量	土石流	A 案と同様。組み合わせ指標となるため、X Y のグラフ上で基準の設定や判定を行う。
	矢野	実効雨量(1 段タンクモデル)	土石流	A 案における実効雨量の演算方法を改良し、土中水分量の推移に調和的な指標としたもの。
	提 言 案	実効雨量(半減期 1.5 時間) 実効雨量(半減期 72 時間)	崩壊 土石流	矢野案による実効雨量の演算方法を用い、3 段のタンクモデルによる災害予測手法を応用して半減期 1.5 時間と半減期 72 時間の組み合わせ指標としたもの。 (総合土砂災害対策検討会)
流出水到達時間内の降雨強度による手法	平野	流出水到達時間内の降雨強度	崩壊 土石流	土石流や崩壊の発生モデル(物理モデル) をもとに発生に關与する流出水到達時間内の降雨強度を指標とするもの。
重判別分析による手法	荒木ら	地形要因と降雨要因の組み合わせ	土石流 崩壊	発生に關係深い地形要因を土石流危険渓流ごとに調査・計測し、様々な降雨指標とともに重判別式を定めるもの。

平成 26 (2014) 年 7 月、小杉ら⁶⁰⁾は同年 7 月 9 日 17:40 に長野県南木曾町・梨子沢で発生した土石流について、現場の北 500m ほどにある気象庁南木曾観測所で観測された過去 30 年間の時間雨量データを整理した。図 1 - 6 4、および、表 1 4 に示すように、H16 (2004) イベントでは既往最大 1 時間雨量を観測して積算雨量も H26 イベントと同じ程度まで上昇した。H18 (2006) イベントでは時間雨量のピークは小さいものの継続時間が長く積算雨量も多く、S60 イベントでは降雨継続時間がきわめて長く積算雨量も H26 イベントの 2.7 倍に達したが時間雨量のピークは小さかった。このように時間雨量、積算雨量、専攻雨量の指標の比較では、H26 イベントが特殊であるとは確認されなかった。

そこで土壌雨量指数と時間雨量との関係からスネーク曲線を描くと、図 1 - 6 5 のように H26 イベントは既往最大値を超過し、また、横軸を半減期の長い実効雨量、縦軸を半減期の短い実行雨量で描いたスネーク曲線 (図 1 - 6 6) では、横軸を半減期 51h と縦軸を半減期 0.9h の実効雨量で描いた場合に既往最大値の顕著な超過を確認した。このため、実効雨量の半減期を様々に変化させたところ、横軸 13 ~ 173h、縦軸 0.1 ~ 2.0h の範囲で H26 イベントが既往最大値を超過した。図 1 - 6 5 と図 1 - 6 6 の (d) 図では、7 月 9 日 17:00 以後の降雨量 49mm で既往最大値を超過した。

このため、縦軸と横軸の実効雨量の半減期を様々に変化させ、17:00 以後の降雨量は何 mm で既往最大値を超過するか調べたところ、横軸 40 ~ 100h、縦軸 1.3h で最小の降雨量 34.3mm が得られた (図 1 - 6 7)。このことから 17:00 時点で、34mm という特に大きくない時間雨量で過去 30 年間の既往最大を超える状況を予見できたとした。

小杉は、異常降雨イベントの予見が土砂災害の防災に重要な情報を与えるものの、雨量指標の組み合わせによる異常性が必ずしも土砂災害の発生に直結せず、縦軸と横軸の雨量指標を適切に設定すること

が必要とした。一方、梨子沢の木曽川合流地点の南側 200mほどに大沢田川が合流しているが⁶¹⁾、この沢は梨子沢ほどの大きな被害を生じていないため、個別の沢で災害が発生するかどうかは降雨量だけではなく流域面積や地形などの状況にも左右されるものと考えられる。

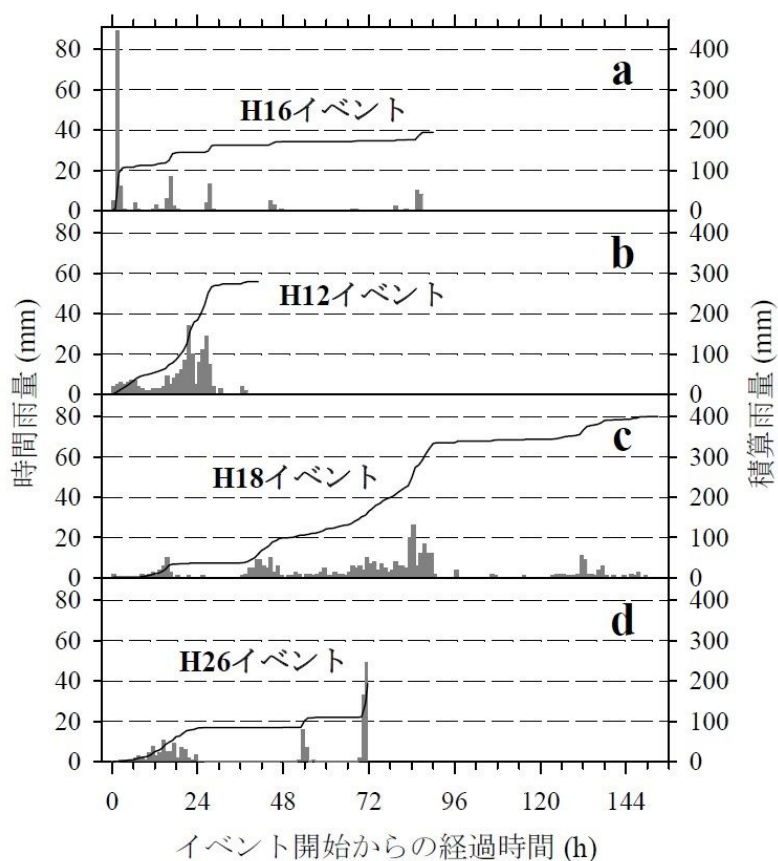


図 1 - 6 4 主要降雨イベントの時間雨量と積算雨量⁶⁰⁾

表 1 - 1 4 主要イベントの諸元⁶⁰⁾

項目	単位	H16	H12	H18	S60	H26
開始年		2004	2000	2006	1985	2014
開始月日		9/4	9/11	7/15	6/27	7/6
最大時間雨量	mm	89	34	26	23	49
積算雨量	mm	194	279	400	527	194
継続時間	h	87	38	150	262	72
先行 2 日間雨量	mm	0	0	3	37	51
先行 3 日間雨量	mm	40	28	33	106	64
先行 5 日間雨量	mm	98	34	38	204	66
先行 1 週間雨量	mm	106	34	82	283	68
先行 2 週間雨量	mm	224	62	170	342	110

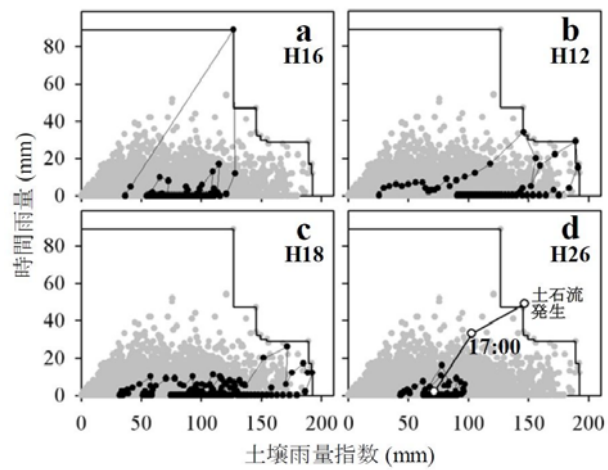


図 1 - 6 5 既往スネーク曲線（灰色）と各イベントのスネーク曲線（１）⁶⁰

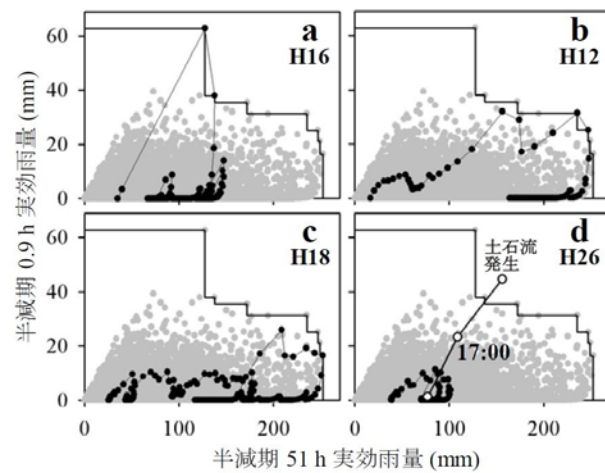


図 1 - 6 6 既往スネーク曲線（灰色）と各イベントのスネーク曲線（２）⁶⁰

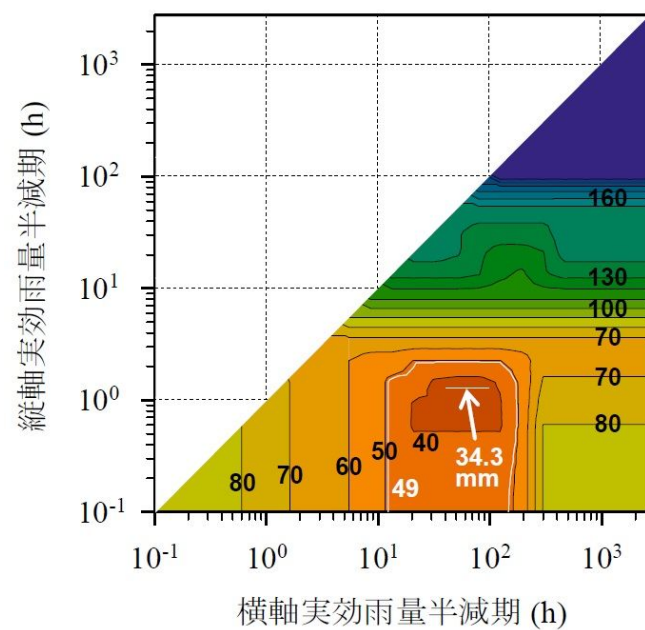


図 1 - 6 7 17:00 以後にスネーク曲線が既往最大値を超過するのに必要な雨量⁶⁰

国土交通省の異常気象時事前交通規制区間の規制基準雨量^{6 2)}の頻度グラフを図1 - 6 8に示す。豪雨などによって土砂崩れや落石などの恐れがある場合、過去の記録などに基づいて降雨量によって道路毎に規制基準が定められている。災害発生前に「通行止」などの規制を実施し、道路交通の安全を確保するものである。

規制基準雨量は、全国的には、北海道開発局における最小 60mm から中部地方整備局と四国地方整備局における最大 300mm（連続雨量）まで分布している。雨量の比較的小さい北海道を除くと、全国の規制基準雨量は 120mm ～ 300mm の範囲に分布し、平均は約 200mm となっている。

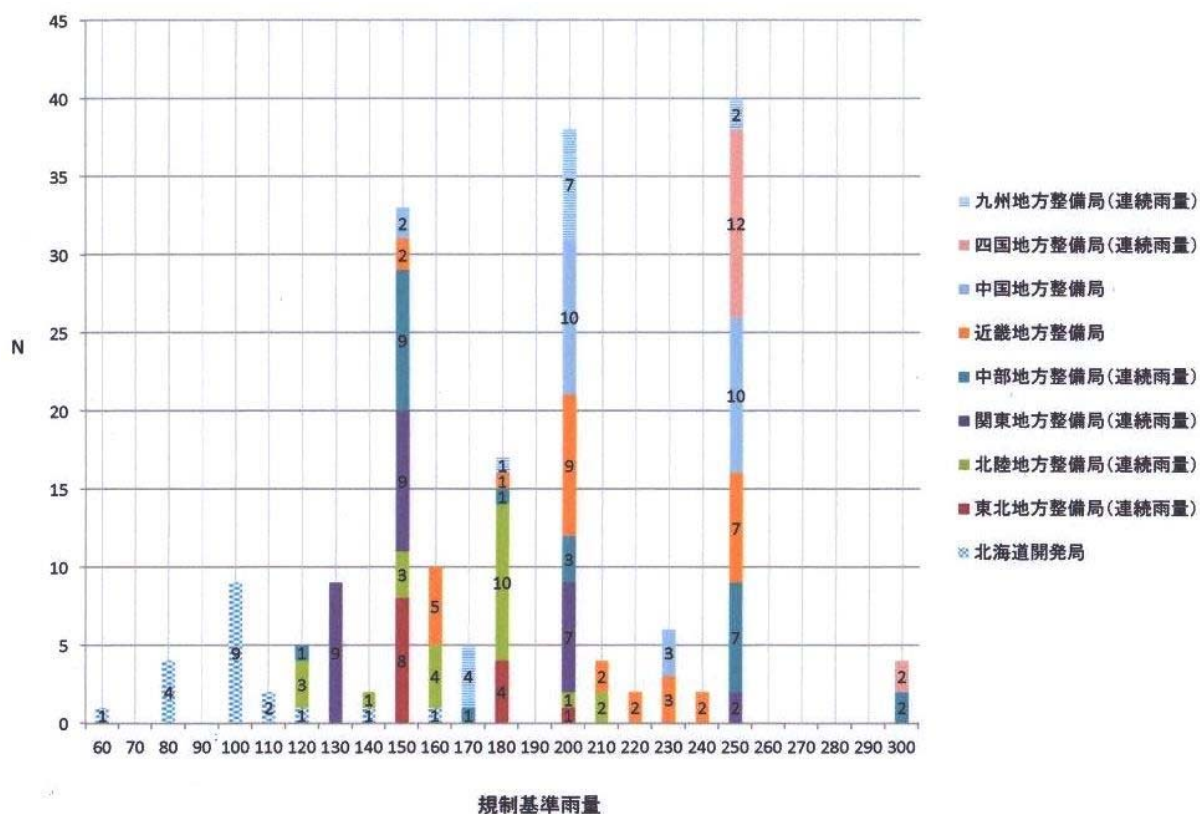


図1 - 6 8 異常気象時事前交通規制区間の規制基準雨量^{6 2)}（雨量単位；mm）

平成 20（2008）年に Collins^{6 3)} は、盛土の斜面崩壊に対する早期検知・警報・減災について報告した。図1 - 6 9に示すように、丘陵地や山間の道路建設による盛土斜面の土石流の危険性が高まっており、

- ・第一段階；道路盛土部のテンションクラック、沈下、急落や段差などの早期発見
- ・第二段階；土石流の想定されるルートを含むリスク調査

が必要とされた。そこでは優先的なメンテナンス・修復、モニタリング、関係者や住民への警報、土地利用上のリスク軽減、あるいは、代替計画、関係所管の連携などが必要とした。早期に危険性を検知することが土石流の防止に役立つとし、盛土の崩壊によって起こる土石流による損失防止のため、関係機関が早期検知および警報により留意することが重要であると報告している。

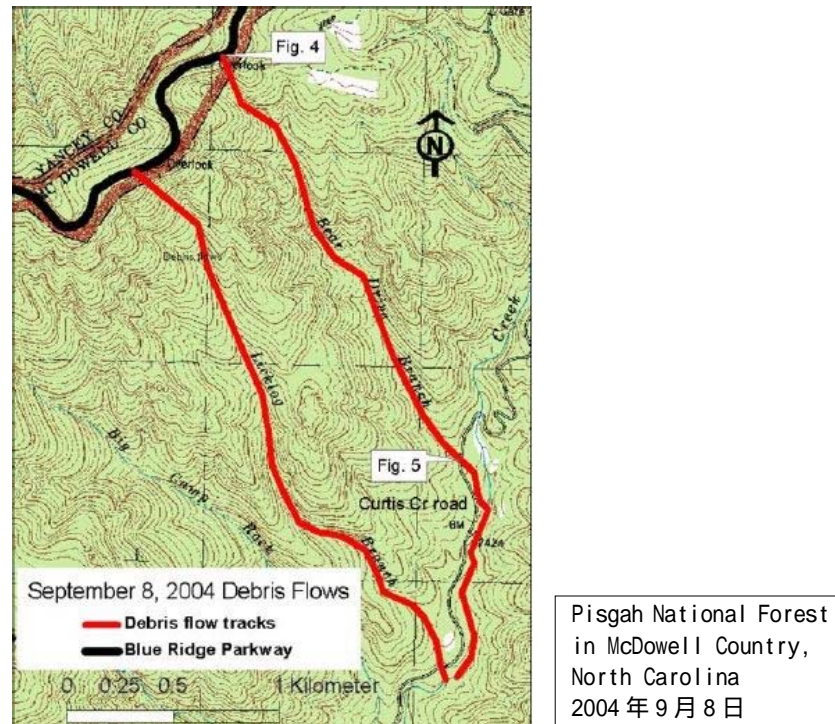


図1 - 69 Blue Ridge Parkway の盛土崩壊により発生した2つの土石流⁶³⁾

島村⁶⁴⁾⁶⁵⁾は、平成21(2009)年～平成22(2010)年にかけてJR東日本における防災技術についてまとめた。自然災害から列車の安全な運行を守るには、設備や装置の対災害性能の強化と災害時列車運転規則という2つの方法があり、後者は従来の個人的主観的判断に基づく手法から、計測データに基づく客観的基準へと進化している。JR東日本では雨・風・地震などの観測に関して、1960(昭和35)年代にスタンドアロンの観測装置であったものが、1990(平成2)年代にオンライン化され、2010(平成22)年頃には2,400ヶ所の観測情報をリアルタイムで集中管理し、所定のしきい値に基づいて運転規制が発令されるようになった。

降雨については直前1時間雨量と連続雨量が使われてきたが、平成19(2007)年に図1 - 70に示すような1.5、6、24時間の3種類の半減期をもつタンクモデルの実効雨量による運転規制基準が導入され、安全水準は従前レベルのままで平均約3割の運転規制時間削減が可能になった。風については平成17(2005)年から、過去数時間の観測風速データに基づく将来風速推定予測モデルを順次導入し、地震については平成15(2003)年から、従前の地表最大加速度による方法に代わって東京ガス⁵¹⁾と同様のスペクトル強度(SI値)により評価する基準を導入した。

図1 - 71に示されるように、雨量計や地震計の配置間隔の最適化、ドップラーレーダーなど気象データや三次元雨量計などの利用による苛烈気象(ゲリラ豪雨、竜巻など)への対応、実効雨量と土砂災害発生メカニズムとの関連性の検証、都市型災害への対応、地形データや地形学的専門知識(暗黙知)のシステム化などの課題をあげ、リアクティブ(受け身)ではなくプロアクティブ(先取り)の防災対策志向が重要とした。

本研究は、斜面崩壊と降雨による予兆的な傾斜変位との関係を明らかにするものであり、鉄道沿線にある斜面においても、リアルタイムの傾斜変位観測を応用できるものとする。

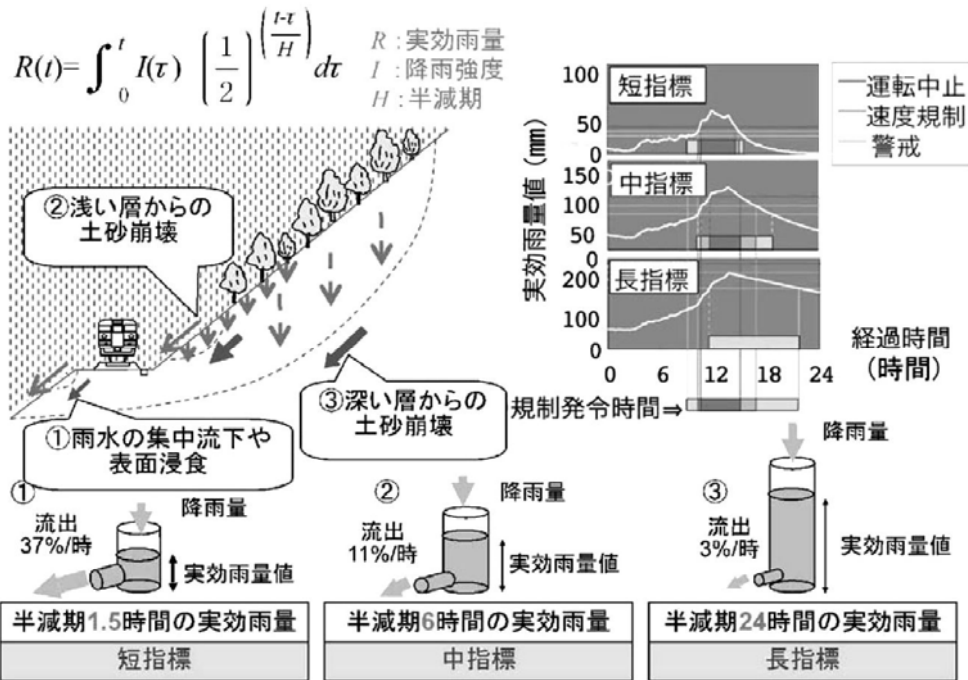


図 1 - 7 0 実効雨量の概念図⁶⁴⁾

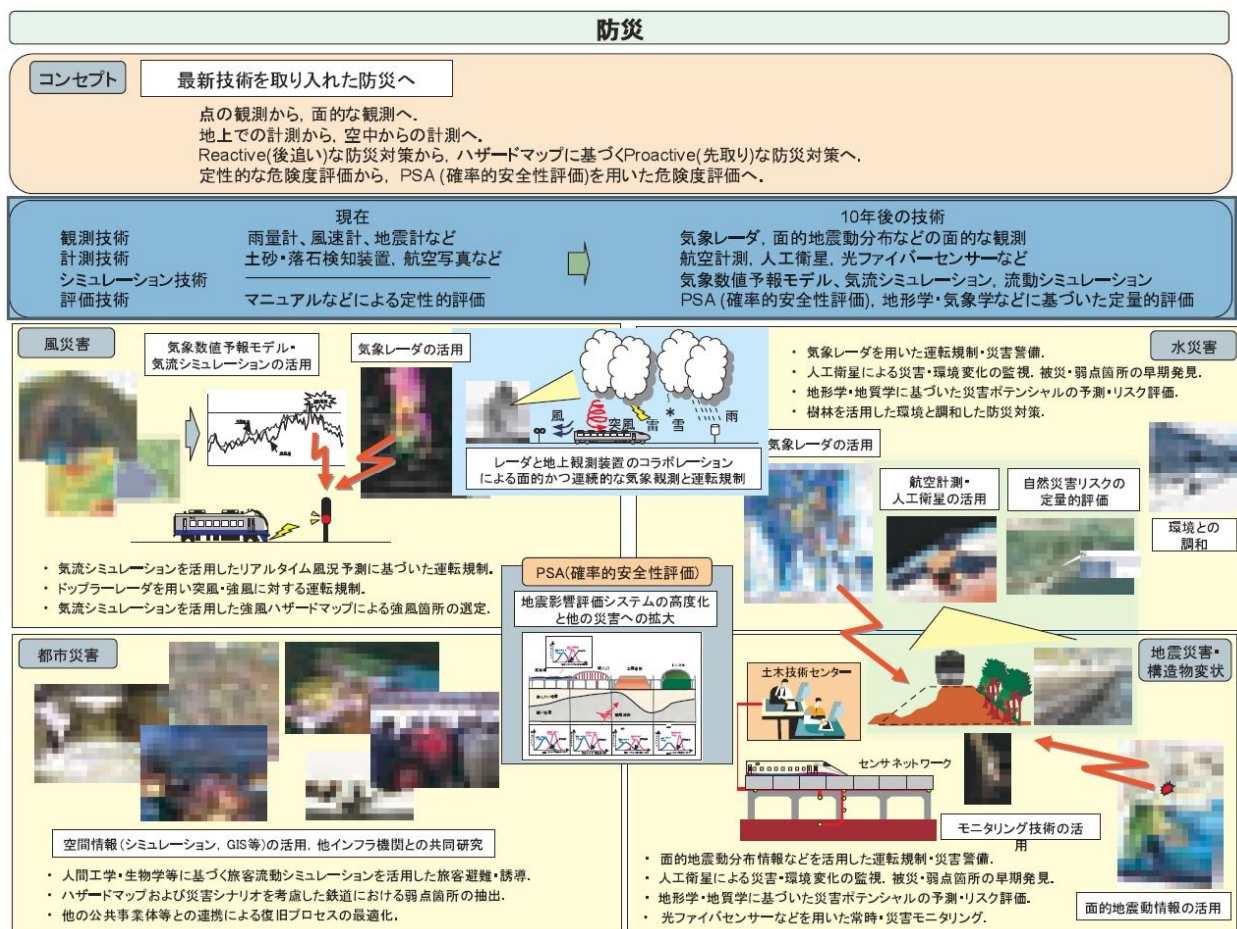


図 1 - 7 1 最新技術を取り入れた防災へ⁶⁵⁾

東畑⁶⁶⁾は、平成 19(2007)年に、市民レベルの斜面崩壊警報システムについて提言した。この中で、防災の仕組みの中にも効率やコスト・パフォーマンスの考え方を取り入れる必要があり、自主防災を支援するような警戒・避難支援機器開発について述べた。

崩壊に到るには何らかの前兆現象があり、崩壊の前兆となる微小変位を検出して警戒・避難を開始する考え方を採用する。気象情報を補完するため、小規模崩壊を対象として、図 1 - 7 2 に示すような最終的な破壊（大変形）にいたる前の微小変位をとらえて直前警報発令を可能としようとするものである。

市民レベルの自主防災試験機器としては 3 ～ 5 万円以下が望ましく、図 1 - 7 3 に示す傾斜角度センサー、土中水分計を内蔵した無線信号送出ユニットを試作した。これによれば、斜面崩壊には前兆的な微小変位があり、それを検知すれば警戒や避難を開始することが可能となる。一方、土壌水分測定では崩壊検知を行えず、より広範囲な水分量の検知が必要とされた。

警報システムの将来構想として、斜面に多数のセンサーを設置してより精緻な 24 時間の監視を可能になるとし、大規模な防御計画・工事を必要としない 24 時間斜面モニタリングによる防災、また、中小規模の不安定な斜面では住民の自助努力を支援するための安価な警報装置が重要であることから、そうした装置による海外援助と輸出産業育成などを示唆した。

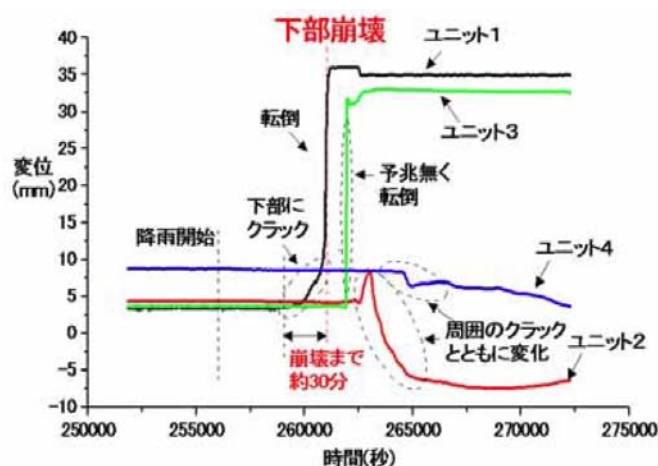


図 1 - 7 2 実証実験における変位測定結果⁶⁶⁾



図 1 - 7 3 現場用変状検出センサー⁶⁶⁾

平成 24 (2012) 年、損害保険料算出機構において、地震時の崩壊モデル評価についての研究⁶⁷⁾がなされた。建物に作用する力 (土砂移動による衝撃力、土砂堆積による土圧) は土砂災害防止法の施行令に従うものの、影響範囲を斜面高さの 2 倍 (最大 50m) が安全側で被災範囲としては過大になる可能性があるとして、実績データに基づいて、影響範囲を斜面高さの 1.8 倍 (最大 35m)、崩壊高さを大規模な崩壊を除外して 60m 以下とした。計算では 250m メッシュで建物被害率を算出し損害程度を建物の構造別に集計した。表 1 - 15 は建物構造と想定被害の状況を整理したものである。

表 1 - 15 建物構造と想定される被害の状況の関係⁶⁷⁾

構造区分	評価項目	被害の有無と想定される被害の状況		
		斜面の下方に隣接	斜面内	斜面の上方
木造、 軽量鉄骨造	土砂衝撃による損壊	一部損～全損 土砂の衝撃力が大きい場合、主要構造部である軸組、外壁が損壊し全損にいたる。軽量鉄骨造は、柱、はり部が鉄骨の複合構造であり、外壁の構造・素材によっては全損にいたる可能性がある。		—
	崩壊土砂の建物内浸入	一部損 開口部等の損壊箇所から土砂が進入し、斜面との距離により 45cm 以上堆積する。		—
	建物の傾倒	—	全損 木造は直接基礎のため、足元または、近傍で崩壊した場合、傾倒する。軽量鉄骨造も直接基礎の場合がほとんどであり、足元または、近傍で崩壊した場合傾倒する。	
S 造 (重量鉄骨)	土砂衝撃による損壊	一部損～半損 鋼材の厚みが 6 ミリ以上のもので「重量鉄骨造」ともいう。主に中層の集合住宅や店舗併用住宅等に用いられるもので、軽量鉄骨と比較して外壁材料の強度も強いものが使われる場合が多いと推定される。斜面に近接し、土砂の衝撃力が大きい場合は、半壊程度にいたる。		—
	崩壊土砂の建物内浸入	一部損 開口部等の損壊箇所から土砂が流入し、斜面との距離により 45cm 以上堆積する。		—
	建物の傾倒	—	全損 直接基礎の場合があり、足元または、近傍で崩壊した場合傾倒する。	
RC 造、 SRC 造	土砂衝撃による損壊	無 斜面側に面したガラス窓が割れる、割れた窓からの土砂流入等が想定されるが、主要構造部に被害は及ばない。		—
	崩壊土砂の建物内浸入	一部損 斜面側に面したガラス等が割れた場合、土砂が流入し、斜面との距離により 45cm 以上堆積する可能性がある。		—
	建物の傾倒	—	無 表層崩壊が想定される場所には建築される可能性は極めて稀なため無被害とする。	

目黒⁶⁸⁾は、平成 25 (2013) 年、総合的な防災管理をリスク・マネジメントとクライシス・マネジメントに大きく分類し、図 1 - 74 に示すように発災地点を境に事前対策として、被害抑止、被害軽減、災害予知・早期警報の 3 つを、事後対策として被害評価、災害対応、復旧・復興の 6 つを対策として示した。これらの全てに情報とコミュニケーションが関わり、両者の能力を高め、総合的防災力を向上する手段として次世代型防災マニュアルを提案⁶⁹⁾した。

次世代型防災マニュアルとは、平常時から当事者が被害状況を認識して、問題点の洗い出し～防災対策の検討と実施～分析・訓練というサイクル的な対策・評価を行い、それによって、地震発生直後から

の、被害抑止～災害対応と被害軽減～最適復旧復興計画といった一連の対策立案を速やかに実施する手段であるとした。図1-75に示されるように、被害抑止によって地震発生直後の時間被害量を低減し、それに引き続く緊急対応時の災害対応/被害軽減策によってさらに被害量を減じ、応急対応・復旧～復興にかけて最適復旧復興計画によって時間的な損失を減じる。平常時から対策することにより、災害が発生した場合でも社会や地域に大きな負のインパクトを与えないようにすることができる。

目黒⁷⁰⁾は、災害をイメージすることによって防災につなげる災害イメージーション能力の大切さを説いた。平常時において被害状況を認識し、問題点を洗い出し、防災対策の検討/実施/対策評価を行い、被害抑止～災害対応と被害軽減～最適復旧と復興計画などに対して明確なイメージをもつことが重要であると指摘した。その上で、次世代型防災マニュアルづくりを行うツールの一つとして目黒メソッドを提唱した。

目黒メソッドとは、図1-76に示すように、災害発生直後から時間経過を追って自分の周辺事態や為すべきことを想定して具体的な表にしていく、次いで災害発生に至るまでの時間の使い方を考えて、災害発生前後での課題と対応を整理することにより、災害イメージーション能力を高めていくものである。そうすることで、マニュアルが必要となる災害発生時まで、そのマニュアルを必要としない人間をどれだけ作れるかが究極の目標とした。

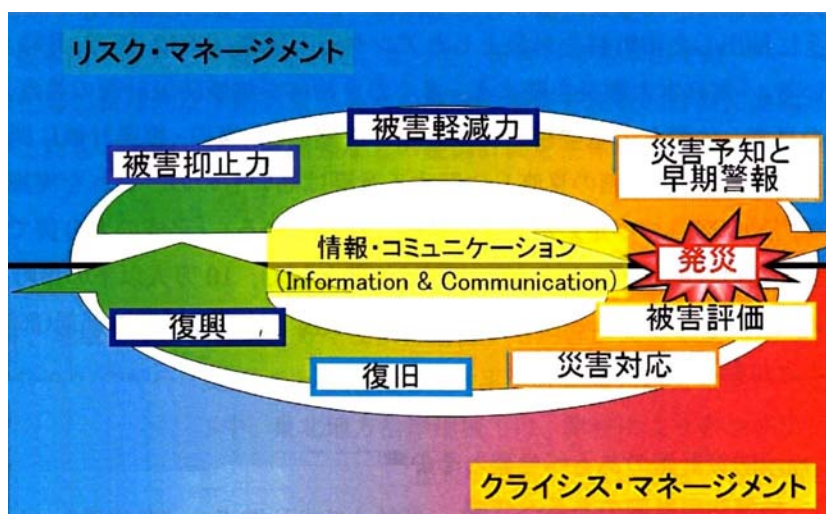


図1-74 総合的な災害管理のあり方⁶⁸⁾

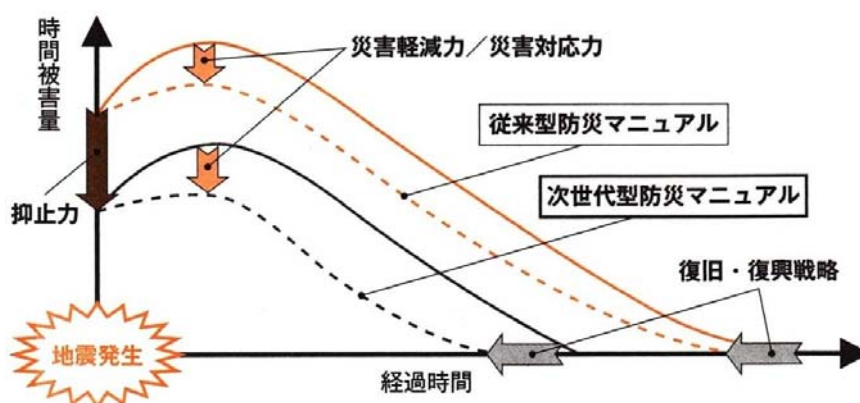


図1-75 従来型と次世代型危機管理・防災マニュアルの被害軽減に対する効果の違い⁶⁹⁾

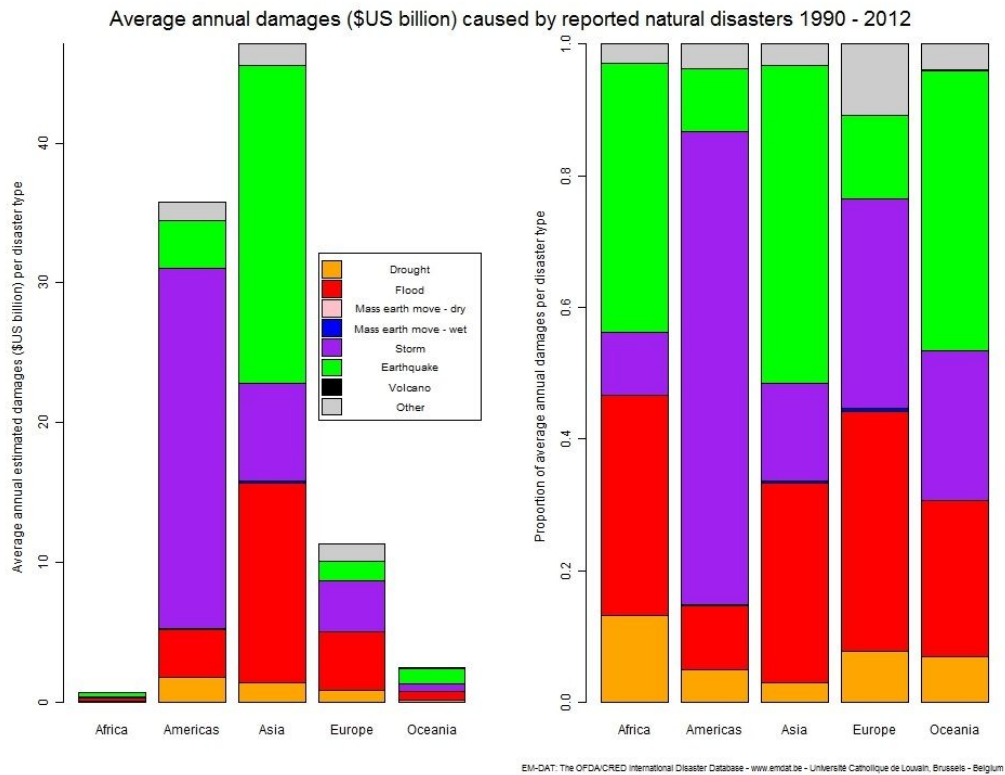


図 1 - 7 7 1990～2012 年に報告のあった自然災害による
平均年間損失額^{7 1)} (単位：\$ U S billion)

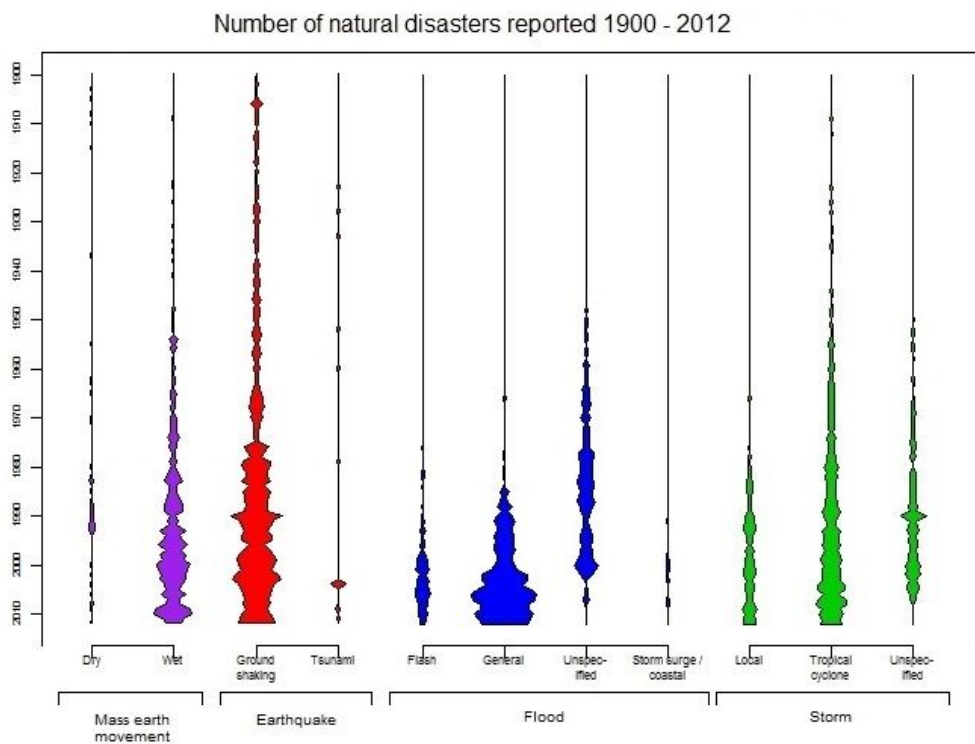


図 1 - 7 8 1990～2012 年に報告された自然災害の数^(7 1) から抜粋)

(71) D. Guha-Sapir, R. Below, Ph. Hoyois - EM-DAT: International Disaster Database
- www.emdat.be - Université Catholique de Louvain - Brussels - Belgium.

2. 研究開発の動機と概要

2.1 背景と動機

1) 土砂災害の現状

土砂災害が発生するおそれのある区域は全国に約 52 万カ所あり、うち土砂災害警戒区域に指定されたところは約 33 万カ所ある。平成 26 (2014) 年 2 月時点での内訳⁷²⁾は、土石流警戒区域 11 万 7 千ヶ所、急傾斜地の崩壊警戒区域 20 万 8 千ヶ所、地すべり警戒区域 4 千ヶ所である。表 2 - 1 に示すように、土砂災害^{73) 74)}は平成 14 (2002) 年～25 (2013) 年まで年平均約 1,100 件発生し、がけ崩れの割合が 39%と最も多く、人的被害 48 人、建物被害約 370 棟で、被害が毎年のように繰り返されている。

自然災害全体の死者・行方不明者数⁷⁴⁾は、平成 20 (2008) 年、21 (2009) 年、22 (2010) 年でそれぞれ 101 人、115 人、89 人であり、建物被害 (全壊と半壊) は、それぞれ 275 棟、1,636 棟、660 棟であった。自然災害に対する土砂災害の割合は、人的被害や建物被害ともに 1～2 割程度を占めているのが実情である。

表 2 - 1 土砂災害および被害の件数^{73) 74)}

年度	土砂災害発生件数				人的被害				人家被害			
	土石流	地すべり	崖崩れ	計	死者	行方不明者	負傷者	計	全壊	半壊	一部損壊	計
H25	262	89	590	941	50	3	24	77	123	70	220	413
H24	256	76	505	837	23	1	14	38	105	71	163	339
H23	419	222	781	1422	72	20	13	105	155	78	234	467
H22	234	127	767	1128	10	1	14	25	40	35	222	297
H21	149	106	803	1058	22	0	13	35	24	26	215	265
H20	154	89	452	695	12	8	5	25	19	10	92	121
H19	129	675	162	966	0	0	12	12	51	37	142	230
H18	169	1057	215	1441	25	0	32	57	79	53	303	435
H17	158	173	483	814	27	3	11	41	106	52	155	313
H16	1511	461	565	2537	61	1	57	119	209	253	725	1187
H15	712	128	57	897	23	-	17	40	38	45	202	285
H14	275	218	46	539	4	-	1	5	14	17	101	132
平均	369	285	452	1106	27	3	18	48	80	62	231	374

注) 人家被害の計の平均は四捨五入により横欄の合計と一致しない。

平成 14 年および平成 15 年の行方不明者数は死者の欄に含まれている。

土砂災害に対する警戒・避難対策としては、降雨量を指標とした土砂災害早期警戒システム⁵⁵⁾が運用されている。これは、地域を 5 km メッシュで割って危険度を予測するものであり、個別の斜面の危険度を予測するものではない。住民の警戒・避難への行動のきっかけは、各自治体から発信される災害情報と前兆現象などに対する個人の注意力によるのが実情である。

土砂災害警戒避難ガイドライン⁵⁶⁾によれば、警戒システムとしての課題として、二次災害/再度災害の防止、自治体と住民との双方向での情報交換、通知手段の多様性、前兆現象となる情報の把握、警

戒・避難の解除の際の安全確認などがあると記されている。洪水の場合では、堤防の状況や水位の状況を、降雨状況に合わせて計測機器や直接監視カメラから確認することができる。土砂災害の場合は、前兆現象（小石が落ちる、湧水が濁る、根切り音がするなど）を察知するには体感や偶然的観察に頼らざるをえない。各斜面における土砂災害の危険性の情報を、より早く入手できるようになれば、住民も差し迫った危険を認識できるし、避難行動につながりやすいと考えられる。

2) 既往研究から

土砂災害のおそれのある斜面の数が膨大で、崩壊に係わる素因や誘因も多様である。すでに運用されている土砂災害警戒情報や土砂災害対策にも課題が残されている。そうしたことに対する既往研究について1章で整理し、1.1はじめに、で概観を述べた。それらに基づいて、本研究開発テーマである斜面災害防止のための早期警報システムの開発と運用に対し、1.1で掲げた目標を再掲する。

安価で、簡便に設置・移動でき、僻地でも維持管理を容易にでき、かつ、監視基準が明確なこと
地域毎ではなく、斜面毎に前兆現象に通じる斜面内部の変状を観測できること
亀裂や滑落崖の有無に関わらず、崩壊メカニズムや法面の状況に即して設置できること
リアルタイム、かつ、直接、住民へ通知でき迅速な避難に資すること

Orense ら¹¹⁾や他の既往研究に基づいて、斜面崩壊の兆候をとらえるための計測対象である雨量、飽和度、応力ひずみなどを検知するにあたり、次のような付帯的検討事項が考えられる。

- ・斜面に設置する体積含水率計（土壌水分計）、傾斜変位計、伸縮計などの計測センサー信号をリアルタイムで収集し、これをフィードバックとして、雨水浸透解析をリアルタイム処理すること。信頼性のある斜面の危険度判定に基づいて警報を発令すること。現場観測と数値解析システムをリアルタイムで結合すること。
- ・実地試験データ分析に基づき、危険度判定ロジックにより崩壊性斜面を抽出することができれば、リアルタイム観測の必要のない斜面を除外できること。（豪雨により崩壊しない斜面に通信システム親機を設置する必要がある。）
- ・実地試験データ分析から、センサー情報の如何によらずに絶対に危険と考えられる降雨条件を導き出せるかどうかを考慮すること。

対象を浅層崩壊や急傾斜地崩壊としながら、斜面のリアルタイム動態観測と危険度判定に基づいて、素因となる自然的条件や誘因となる降雨条件を関係付けられれば、多様な崩壊メカニズムにも対応できるものと考えられる。斜面崩壊のいち早い兆候検出により、的確に警報発信できるようになれば、豪雨時であっても平常時と同じように安全・安心して生活および生産活動を継続できる。

今まで人に頼ってきた巡視などの作業を遠隔地からの計測に代替できれば、管理上も効率化するし斜面防災だけでなく、インフラ整備などにも応用できるものと考えられる。

3) 防災・減災への取組みとして

現状把握からも既往研究からも斜面災害の防災・減災が重要なテーマとなっており、東日本大震災や将来懸念されている巨大地震などへの対応においても、重要な研究テーマとなっている。斜面観測シス

テムとして、斜面毎の観測、リアルタイムで遠隔地からの観測、危険度判定方法などが課題であり、(独)土木研究所が呈示³³⁾しているように具体的な事項として、無線通信、バッテリー駆動、デジタル出力、センサーの低価格化、耐用年数、容易な設置、耐環境性などの課題がある。これらは目新しい課題ではない。重要な点は、精度を確保しながらも安価であり、リアルタイムで遠隔地のデータを判定処理しながらも簡便・単純な仕掛けであり、長期間放置されていてもピクともせず信頼性の高いデータを送り続ける、という相反するような特長を兼ね備えた装置ということである。

現在の斜面の計測機器(伸縮計など)は、概ね、斜面崩壊の初期の微少な変動を精度良く検知することを目的とし、精密な計測をする故に比較的高価であり専門家が設置しなくてはならないし、頻繁なメンテナンスが必要になっている。価格や専門性などから、亀裂や滑落崖などが発生して明らかな影響が生じないと設置されにくいという一面がある。

安価で容易に設置でき、確実に危険性を判定し警報を出せるセンサーやシステムが開発されれば、土砂災害のおそれのある斜面ならどこでも簡単に設置することができ、その効果は防災・減災に直結するものとなる。近年、マイクロエレクトロニクスの発展により携帯電話にもMEMSセンサーを搭載されるようになり、インターネットによってどこでも誰でも情報を閲覧できるようになり、リアルタイムに情報交換できるようになってきた。

こうした情報系、通信系の最新技術を、斜面災害という厳しい自然条件の中に適用し、人命に関わる防災分野に応用し、激甚化・巨大化する災害に対応し、持続可能で安全・安心な社会形成に役立っていかうとすることが、本研究の背景と動機を形成している。

2.2 研究開発の内容と目標

1) 開発の内容

本研究開発は、豪雨時に斜面の変状を常時リアルタイムで観測でき、危険性を判定し、警報を発するための安価で簡便な早期警報システムを開発するものであり、毎年のように頻発する斜面災害から、住民が公助・共助・自助によって、自らの生命と財産を守る手段を提供することを目的とする。目標としては前頁の ～ をおく。

斜面災害防止のための早期警報システム開発において、具体的には次の4項目について開発と検討を行う。

双方向無線通信システムの開発

最新のIT技術を導入し、斜面に展開した斜面崩壊検知センサー(子機)からデータロガー(親機)へリアルタイムでデータ伝送する無線システムを構築する。データロガーからセンサーサーバーを通じインターネットにより行政や企業の関係者へ、変位状態などの情報を配信するとともに、異常時には警報を発信する。斜面崩壊検知センサーの下にセンサーノード(孫機)を斜面に多数展開できるようにし、斜面崩壊検知センサーとセンサーノードによって斜面を網羅的に監視できるようにする。双方向無線通信システムは、MEMS傾斜センサーがセンサーネットワークを形成し有効に機能するためのプラットフォームと位置づけられる。

斜面崩壊検知センサーの開発

M E M S 傾斜素子を組み込んで、1 計測点につき 5 万円以内で、熟練者でなくても容易に設置できる安価で簡便な斜面崩壊検知センサーユニットを開発する。斜面の傾斜変位は地表面変位に換算して 1mm/h 程度の分解能（伸縮計レベル）を必要とし、土壌水分については体積含水率を検知できるようにする。降雨による斜面変状や崩壊の予兆をより早い段階で精度よく計測できるようにすることが目的である。小型化するためにバッテリー駆動、データ交換のためのデジタル入出力、メンテナンスが容易な耐用年数（1 年程度）、豪雨や寒暖などに対する耐環境性などを有する必要がある。

小型孔内傾斜計の開発

斜面崩壊検知センサーのうちの M E M S 傾斜検知ユニットを連結して安価な孔内傾斜計を開発する。それにより、崩壊斜面内部やすべり面での動きをより精度よく監視できるようにする。斜面崩壊検知センサーが面的に斜面変状を捉えるのに対して、小型孔内傾斜計は深度方向に変状を計測するものである。斜面崩壊検知センサーと併せ、全体として斜面内部の予兆を監視し、検出精度の向上を目的とする。

斜面災害リスクのリアルタイム評価手法の検討

双方向無線通信システム、斜面崩壊検知センサー、小型孔内傾斜計からなる本早期警報システムがリアルタイムで送信してくる斜面の観測データを、センターサーバーに蓄積しリアルタイムで斜面崩壊のリスク評価を行う。評価結果に対して、斜面崩壊のリスクに応じて警報を発するためのわかりやすい管理基準を設ける必要がある。浅層崩壊や急傾斜地崩壊を対象としているが、実証実験に基づいてデータ整理手法や判定基準を設定する必要がある。

2) 開発項目の相互関連

開発内容の各項目の関連性について図 2 - 1 に整理した。この中で、デジタル入出力および観測システムについては、これまで K_0 圧密などの試験装置の精緻な制御や A/D 変換・入出力などで培ってきた技術⁷⁵⁾をベースとしたものである。その上に新たに通信系や屋外での機器制御系、および、ソフトウェア⁷⁶⁾などの開発^{75) 77)}を行った。

また、開発内容の内、ハードウェアとソフトウェアに分けて各項目の関係性を図 2 - 2 に整理した。図中の 1) は通信系に関する電子回路などを含むハードウェアとソフトウェアのパッケージ開発であり、同 2) と 3) は M E M S 傾斜検知ユニットを核としたハードウェア開発、同 4) はそれらの計測データを評価・分析するための検討となっている。

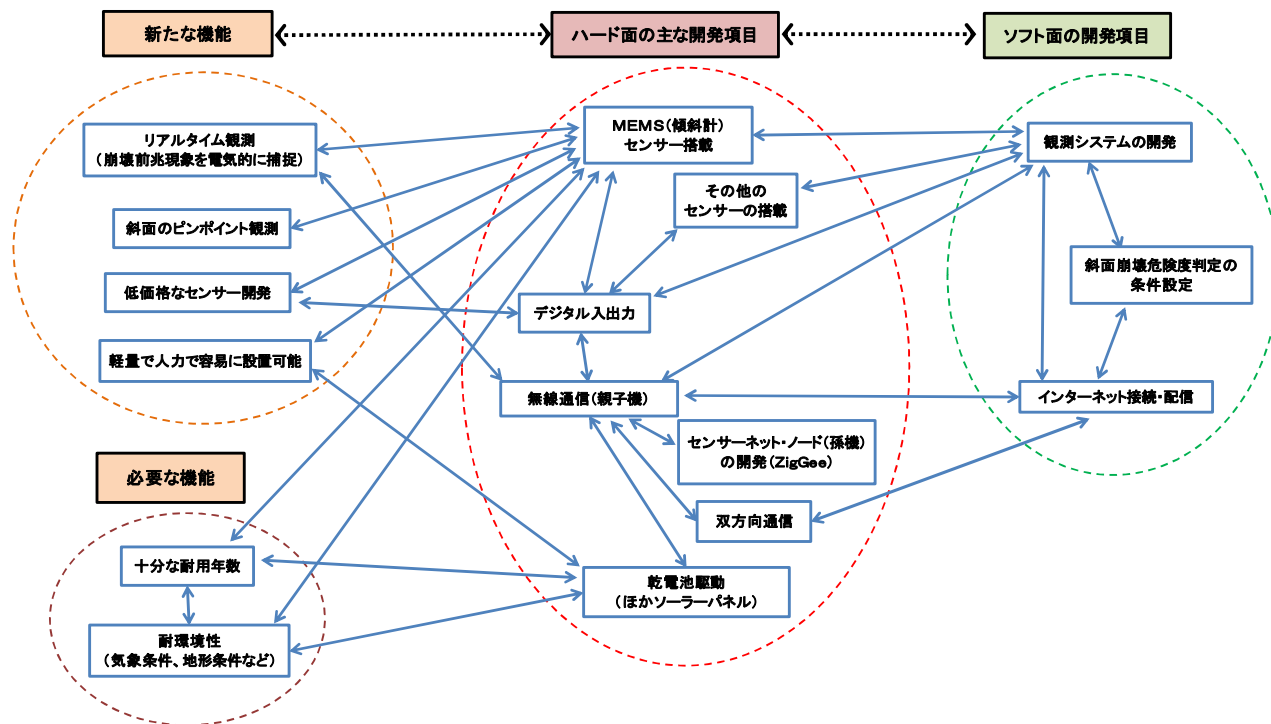


図 2 - 1 本研究の開発内容と機能について

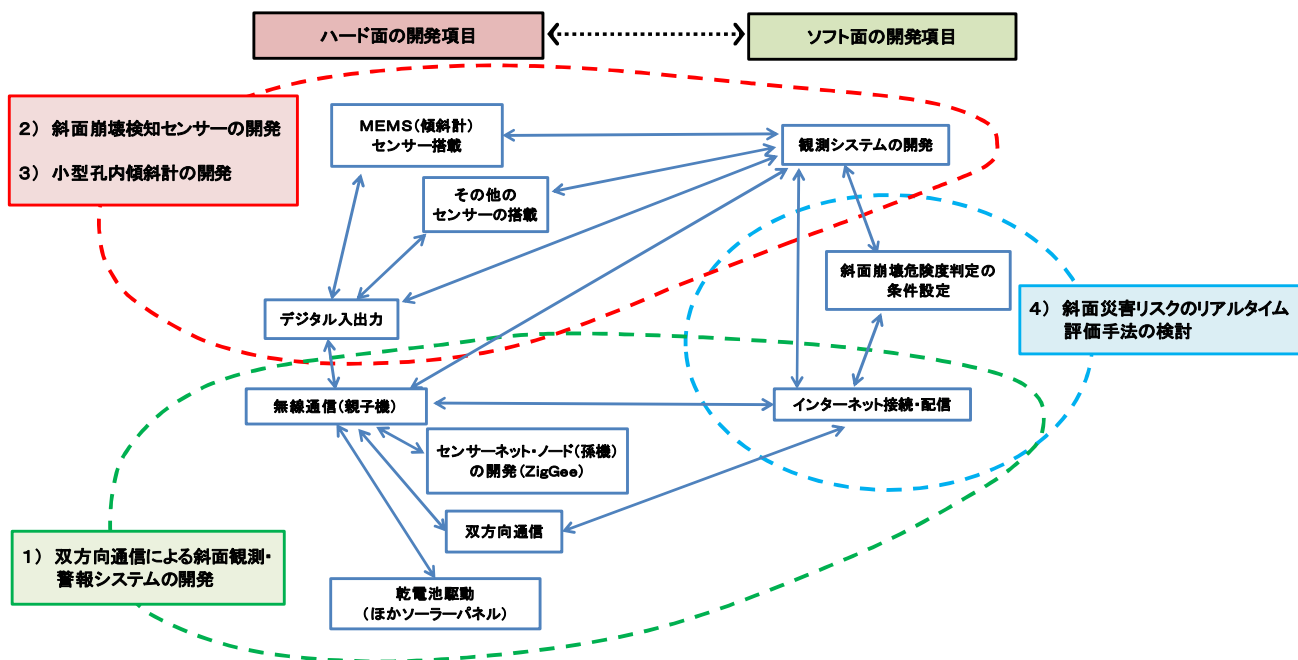


図 2 - 2 開発および検討の内容

2.3 研究開発に対する社会的ニーズ

我が国は、都市への人口集中に伴って、都市部では丘陵地が開発されたり、急傾斜地周囲まで宅地化されている。一方で、地方では高齢化や過疎化が進展して山間部ではゴースタウン化しているところも出てきている。近年、気象変動の影響などにより過去にない集中豪雨や、ゲリラ豪雨などが発生し、ここ 10 年間で年平均 1,100 件程度の土砂災害が発生している。図 2 - 3 に示すように、降水日数が減少傾向にあるなか、大雨の頻度はむしろ増加傾向にあり災害が激化する要因になっている。

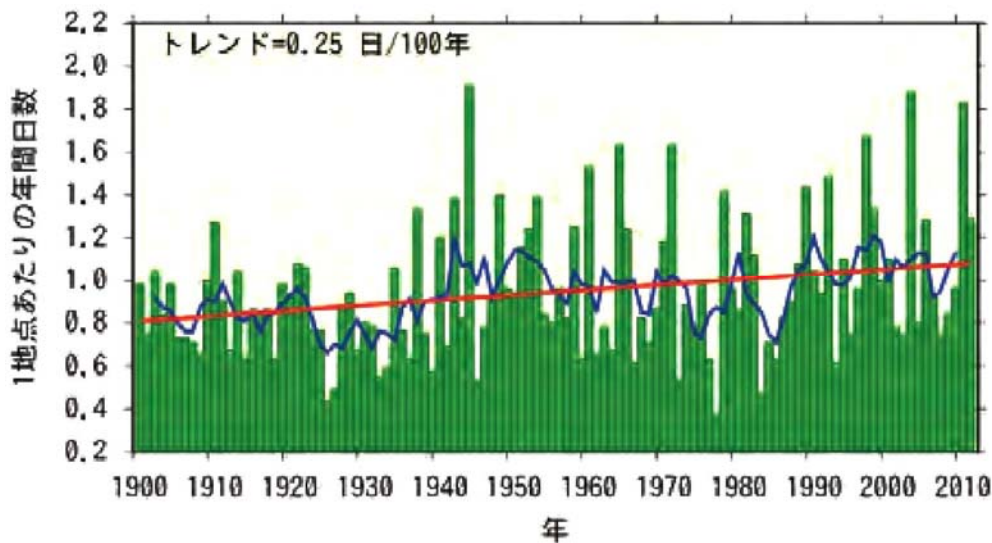


図 2 - 3 日降水量 100 ミリ以上の日数（51 地点平均）^{7 8）}

写真 2 - 1 は、過去に起こった斜面崩壊で、道路などのインフラや個人の住宅が被災した例である。崩壊には自然斜面の崩壊、造成された法面の崩壊、集水地形の崩壊など様々のパターンがある。また、これまでの土砂災害防止法の警戒区域に加え、0 次谷、斜面上方の谷地形、長大斜面なども危険性が指摘され、ほとんどの全ての斜面が危険とされているのが実情である。さらに、指定が難しい場所の被災、指定範囲隣接地の被災^{3）4）}もあり、警戒区域指定が後追いになる状況も感じられる。土砂災害警戒情報では実際の地形・地質条件やゲリラ豪雨などを考慮できず、予測精度には限界がある。それらの点を補うためにも、個々の斜面に対して危険性評価を行い早期に警報を発するシステムが必要であると考えられる。

土砂災害警戒避難ガイドライン^{5 6）}では、防災・減災において住民の自助努力が必要としている。ハザードマップや災害情報への理解とともに、より早く前兆現象を見つける感覚も必要としている。自助のために個々人の知識力や判断能力を向上する必要があるが、同時に、斜面内部の変状を早期に捉えるセンサーによる支援が不可欠と考える。また、同ガイドラインは 2 次災害防止のために、土砂災害を検知するセンサーの設置を推奨している。そうした点から、斜面をリアルタイムでモニタリングする早期警報システムの開発は必要不可欠とされる。それを開発することにより、今までにない応用性も開拓される可能性があると考えられる。

斜面防災のハード技術として、擁壁・吹きつけ補強・法枠工などがあるが、事業費用も大きくなると

いう問題もある。小規模で多発するような斜面災害では、全ての斜面にハード対策を行うことは現実的ではない。よって、小規模多発型の斜面災害から住民を守るには、確実なモニタリングすることが近道であり、本早期警報システムのようなソフト対策が重要となってくると考える。



(a) 福岡県冷水峠 (2009 年、中央開発㈱撮影) (b) 鹿児島県内 (2006 年、内村太郎氏撮影)



(c) 静岡県内の小規模な表層崩壊例 (2004 年、Dr. Ashok Peiris 撮影)

写真 2 - 1 崩壊事例

また、既存の斜面観測システムは、高価で、取り扱いには専門的知識を必要とし、行政において設置運用することが前提である。通常、斜面計測しデータ電送するようなシステムの場合は 1 計測地点当たり 50 万円程度かかるとみられ、一斜面に複数台設置すると莫大な費用がかかる。これでは、数多くある崩壊性斜面に設置することは難しく、小規模斜面は後回しになりやすい。

本研究開発では、小規模な崩壊の多くを占める表層崩壊を対象に早期警報システムを開発する。警戒区域周辺の住民と行政が共助を行う中で費用負担できる程度を考慮すると、センサーユニットだけで、これまでの 10 分の 1 程度である 1 地点 5 万円レベルを目標とすることが望まれる。住民と行政の共助による防災活動に対するツールの一つを提供し、防災意識を高める効果も期待される。さらには、市民の自助に対するきっかけにつながるなら、より大きな防災効果を期待できると考える。

2 . 4 技術開発成果の実用化に関する新規性と応用性

1) 新規性

集中豪雨や台風には季節性があるため、年間を通してセンサーの検知頻度を変えることができれば、電池の消費も抑えられるメリットがある。無降雨時と降雨中の検知頻度、土砂災害警戒情報発令に応じた検知頻度、斜面に明らかな兆候を確認した後の検知頻度など、精度を必要となったら検知頻度を密にとり精度を確保できれば、これまでにない観測システムを実現できるとみられる。

安価・簡便さ・メンテナンスフリーを追求することと精度向上は相反する場合が多く、特に設置場所が屋外の厳しい自然環境に精密機器を置くとなればなおさら困難を伴うと考えられる。被災する場合は機器が失われることも前提である。一方、それを実現できれば、斜面災害の被災防止・減災、2次災害防止、工事安全確保などの他、学校・弱者のいる施設・重要施設などの近傍斜面にも設置でき、防災分野に対して大きな進展を生むと考えられる。

斜面の観測は、これまで亀裂が発生した段階で伸縮計を中心に行われてきたと考えられる。伸縮計を設置する場合必ず2地点を必要とするため、みかけ上、斜面上部を不動点とするが、実際上は2地点の相対変位を計測している。傾斜計の場合は設置位置が測定対象地点であり、傾斜角から斜面崩壊リスクを評価できれば初めてのものであるばかりでなく、設置地点の変状について絶対的傾斜量を与えるものになる。加えて、亀裂がなくても斜面のどこにでも設置できる点で、今まで感覚に依存していた斜面崩壊の前兆現象と斜面内部の変位との対応が可能になると考えられる。

本早期警報システムでは、リアルタイムに斜面の計測データをホストサーバーに蓄積し、常時評価している。降雨量と変位の関係づけを行ってその履歴情報化して、逆に、変位に対する降雨量を予測することにより、さらに緻密な予測を行える可能性を有する。崩壊メカニズムに応じて履歴情報を更新することにより新たなリスク評価法を構築できる可能性がある。

2) 応用性

日本は、地形は急峻で、火山灰質や風化土層が多く地質は脆弱である。降雨量が多く毎年大規模な災害が発生している。土砂災害のおそれのある斜面も、人為的に改変された斜面や造成地の法面も膨大な量がある。そういう点で、斜面の変位を計測し、変状の予兆や異常を早期に検出できれば、数多くの斜面監視の機会が発生し、データの蓄積・評価により様々な崩壊メカニズムの斜面への適用性が生まれ、応用性がさらに発揮されることが考えられる。

本早期警報システムのセンサーネットワークは、リアルタイム無線通信、ホストサーバーによる集中処理、インターネットによる警報発信、全天候性などのユビキタス・プラットフォームとしての条件を備えている。MEMS傾斜検知ユニットを別な計測センサーに取り替えることにより、様々な応用が出てくると考えられる。斜面計測の場合でも、加速度計(地震計)、水位計に置き換えることが可能であり、機能拡張することができるし、種々の与条件に対応できる応用性を有する。

土砂災害警戒避難ガイドライン^{5,6)}では、住民が自ら前兆現象を把握し自主的に避難することが最善と記し、また、ソフト的な対策として、自治体がハザードマップを作成し住民に配布している。住民に対して災害を「知る努力」を促すものである。平成26年度広島市の土砂災害では、集中豪雨が深夜に及んで停電が重なり被害が拡大した。知る努力を促すことと併せ、知るためのツールを提供することができれば、土砂災害に対する認識が深まる可能性がある。本早期警報システムにより、住民が斜面の状況を直接閲覧できれば、避難に対する意識も高まることも考えられ、住民意識に対する応用性もあると考えられる。

海外でも大規模な土砂災害が発生しており、種々の理由から2次災害も頻発している。斜面崩壊検知センサーや小型孔内傾斜計、斜面リスク評価システムなど、個別にも全体的システムとしても海外の斜面や被災現場に応用できるものであり、国際貢献⁶⁾に役立つものとする。

3．研究開発の内容


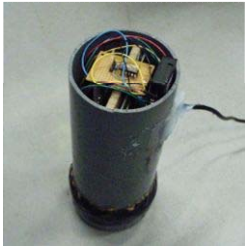
3．1 開発の経緯

本研究は平成 17 (2005) 年に開発が着手され、今日に至った。このため、試作品とその後の普及品で複数のバージョンを有している。また、研究は大きく分けて、双方向無線通信システムの開発、斜面崩壊検知センサーの開発、小型孔内傾斜計の開発に分かれている。

双方向無線通信システムの開発は、センサーネットワークのプラットフォームとして通信機（親機・子機・孫機）ハード開発を主体に、インターネットを経由しデータベース化するためのソフト開発までを含む。この中で、3．2 双方向無線通信システムの開発 において初期の普及品のハード部分を中心に記載した。斜面崩壊検知センサーの開発は、MEMSを用いた傾斜計の開発であり、模型実験をはじめ現場試験を通して、自然環境下で安価で精度よく安定動作するMEMS傾斜計センサーを初めて開発したものである。3．3 章 斜面崩壊検知センサーの開発 において初期の試作品の現場実証試験について記述した。

開発着手以後の斜面崩壊検知センサーの試作品、普及品についてバージョン、時期、内容を表3 - 1 に示した。このように現場での適用状況や不具合などに応じて随時改良を重ねてきており、現仕様について3．3 に記す。各実証実験のバージョンについては、表3 - 1、表3 - 2の備考欄を参照されたい。

表3 - 1 データロガー、および、斜面崩壊検知センサーの仕様の経緯

Version	年月	構成	写真	備考
試作品 Ver.1	2005.11	RF 無線： 日放電子 2.4G 水分計：TDR 傾斜計：AccuStar		土研にて大型降雨模型実験を実施。
試作品 Ver.2	2006.6	RF 無線： 日放電子 2.4G 水分計：ECH20 傾斜計：VTI MEMS SCA100T-D01		土研にて大型降雨模型実験を実施。

（次頁へ続く）

Version	年月	構成	写真	備考
試作品 Ver.3	2007.3	RF 無線：MU2 水分計：ECH20 傾斜計：VTI MEMS 2 軸：SCA100T-D01 記録：SD		
普及品 Ver.1	2008	RF 無線：MU2 水分計：ECH20 傾斜計：MEMS 2 軸：SCA100T-D01 3 軸：LIS331DLH 記録：MicroSD	 	<u>2008/4 神戸市六甲斜面（土研との共同研究）</u> <u>2008/10 中国三峡ダム地すべり地（日中共同研究）</u> <u>2009/8 福岡県冷水峠斜面</u>
普及品 Ver.2	2009.11	RF 無線：MU2 水分計：ECH20 傾斜計：MEMS 2 軸：SCA100T-D01 3 軸：LIS331DLH 記録：MicroSD		RTC（RealTimeClock）時計 IC を実装。 ケース改良、防水性改善、電源は3年持つ。 小型孔内傾斜計の開発着手。
普及品 Ver.3	2010.6	RF 無線：MU2 水分計：ECH20 傾斜計：MEMS 2 軸：SCA100T-D01 3 軸：LIS331DLH 記録：MicroSD 外部通信：RS485		小型孔内傾斜計と通信できる RS485 追加。 高性能 AD レファレンス追加。 <u>2010/8 山形県酒田市法面工事</u> <u>2010/10 都江堰市地すべり（小型孔内傾斜計）</u> <u>2011/6 都江堰市人工工実験</u> <u>2011/7 福岡県田川市斜面</u>
普及品 Ver.4	2012.1	RF 無線：MU2 水分計：ECH20 傾斜計：MEMS 2 軸：SCA100T-D01 3 軸：LIS331DLH 記録：MicroSD 外部通信：RS485	 	分離型傾斜モジュール 2 軸 MEMS 傾斜計をケース外へ。分離型傾斜モジュールとし土中埋設できるようにした。
普及品 Ver.5	2013.4	RF 無線：MU2 水分計：ECH20 傾斜計：MEMS 2 軸：SCA100T-D01 3 軸：LIS331DLH 記録：MicroSD 外部通信：RS485		RTC（RealTimeClock）の誤差を改善、通常腕時計と同じ精度を有する。 分離型傾斜モジュールに温度計を実装。 <u>2014/2 埼玉県秩父市</u>

注）下線：本論文で記載した実証実験サイト

小型孔内傾斜計の開発については、斜面崩壊検知センサーが現場実証試験によってある程度動作が安定してきたことに併せて、斜面崩壊検知センサー普及品 Ver.2 の頃に関係に着手し、小型孔内傾斜計の試作品 Ver.1 を製作して現場実証試験を行った。斜面崩壊検知センサーVer.3 において小型孔内傾斜計に対する通信機能を強化した。

センサーノード（孫機）は、データロガー（親機）との通信を行うため斜面崩壊検知センサー（子機）との兼用機（特定省電力無線も可能）、および、短距離無線モジュールのみを搭載したセンサーノード専用機を試作した。小型孔内傾斜計とセンサーノードの開発の経緯を表3 - 2 に示す。

表3 - 2 小型孔内傾斜計およびセンサーノードの仕様の経緯

Version	時期	構成	写真	備考
小型孔内 傾斜計 試作品 Ver.1	2009.9	傾斜計：MEMS 2 軸：SCA100T-D01 磁気センサ 温度センサ 外部通信：RS485		<u>2010/4 六甲砂防で現場実証試験</u>
小型孔内 傾斜計 試作品 Ver.2	2011	傾斜計：MEMS 2 軸：SCA100T-D01 磁気センサ 温度センサ 外部通信：RS485		<u>2010/10 都江堰市地すべりで試験</u> <u>2011/6 都江堰市で人工降雨試験。</u>
センサー ノード 試作品 (兼用機) Ver.1	2013	傾斜計：MEMS 2 軸：SCA100T-D01 磁気センサ、温度センサ 外部送信： 特定種電力無線 外部受信： 短距離無線 内部伝送： UART シリアル通信	 斜面崩壊検知センサー とデータロガー兼用機	子機兼孫機の兼用器 と孫機専用器の2機種 を試作
センサー ノード 試作品 (専用機) Ver.1	2013	傾斜計：MEMS 2 軸：SCA100T-D01 温度センサ 外部通信： 短距離無線 1EEE802(2.4GHz)	 専用機（通信部） MEMS 傾斜計	<u>2013/11 高知県黒鳥谷川で動作試験</u>

注) 下線：本論文で記載した実証実験サイト

3.2 双方向無線通信システムの開発

3.2.1 通信系の開発の概要

日本で屋外のセンサーが利用している通信方法としてテレメータがある。テレメータは、河川やダム
の管理を目的として、雨量・水位等のデータ伝送に広く使われている。山間の僻地に設置するため、回
線は無線を利用し、商用電源を使用しない場合には、太陽電池を使用するなど、センサーネットワーク
との類似点が多い。しかし、既存テレメータは広域無線であり、コストやシステム規模は過大となる。
センサーネットワークでは、小規模化、低価格化という条件を満足する必要がある。

本研究では、データロガーとしての親機と斜面崩壊検知センサーとしての子機の間を免許の不要な特
定小電力無線（周波数 429.250～429.7375MHz）で結び、さらにセンサーノードとして孫機（短距離無線
である IEEE 802 規格の周波数 2.4GHz 帯）を開発した。データロガーからデータサーバー間は携帯モ
バイル網を利用し、データサーバーから関係者（行政、住民、開発者など）への配信はインターネット
を用い、通信系のハード、および、ソフトプログラムを開発した。データロガー（親機）と斜面崩壊検
知センサー（子機）間は最大 600m の距離内、斜面崩壊検知センサー（子機）とセンサーノード（孫機）
間は最大 50m の距離内で通信することができ、センサーノードを現地に多数設置できるようにした。

本システムには、データ通信の低コスト化とデータの無線通信化、設置の簡便化、ホストサーバーで
のリアルタイム自動危険診断、住民への警報信号の発信の自動化などを組み込む。そのため、センサー
ネットワーク特有の課題として、センサーの物理位置の検知、時刻同期、マルチアクセス制御、ネット
ワーク上でのサービス発見・サービス生成、センサーをネットワークに接続する際のインターフェース
仕様（IEEE 1451）に応じた開発など、多くの課題⁷⁹⁾に対応するとともに、自然災害下の屋外での
稼働という厳しい環境でセンサーネットワークを実現できるようにする。

3.2.2 システム構成

センサーネットワークは、平成 15(2003)年以後、IEEE 802.15.4 における ZigBee の標準化(2003
年 5 月)の進展を受け、急速に各産業界の注目を集めるようになった。しかし、高速版の無線通信(2.4
GHz)の場合は、センサー間の有効通信距離は 30～100m に過ぎないため、無線センサーユニットで
集められたデータを遠距離に転送するツールを選ぶことが必要になった。本研究で選択できる通信手法
としては、インターネット通信（光ファイバー、ADSL などの高速アクセス通信システム）とモバイル
通信、衛星通信などの移動通信に限られている。

リアルタイム危険予測の目的は、計測情報・防災情報を行政と一般市民とが共有し、必要に応じて的
確な情報発信を行うことである。そのため、高度な情報通信技術を用いて、斜面崩壊検知センサー（子
機）で計測したデータをデータロガー（親機）に中継し、携帯モバイル網を介して、ホストサーバーに
リアルタイムで転送し、広域データベースに蓄積し、そのデータを分析してインターネットを通じて必
要に応じて、警報信号を関係機関（および住民）に発信する情報通信システムを開発する。

計測データのデータベースをホストサーバー上に実装すると、現地基地局（親機）から受信したデー
タをホストサーバー上で解析し判定することが可能となる。その結果、斜面崩壊の兆候を示す場合には、

予め登録されたアドレスに斜面崩壊警報メールを送信することができる。インターネットシステムの構築にはすでに開発していた防災情報のWeb情報提供システム技術⁸⁰⁾をベースとして利用した。

開発したモニタリングシステム⁷⁹⁾⁸¹⁾は、図3-1に構成を示すように、無線データ転送技術・携帯モバイル技術・インターネット技術を利用して、リアルタイムに情報収集・分析・提供などを行う。データロガー～ホストサーバー～行政や開発関係者の間は携帯モバイル網とインターネットを介して、データ転送や転送タイミングの命令に関して双方向で対応できるものとする。こうした双方向性により、住民のリスク認知・避難行動を積極的に支援し、防災・減災に応用しえるものになると考えられる。

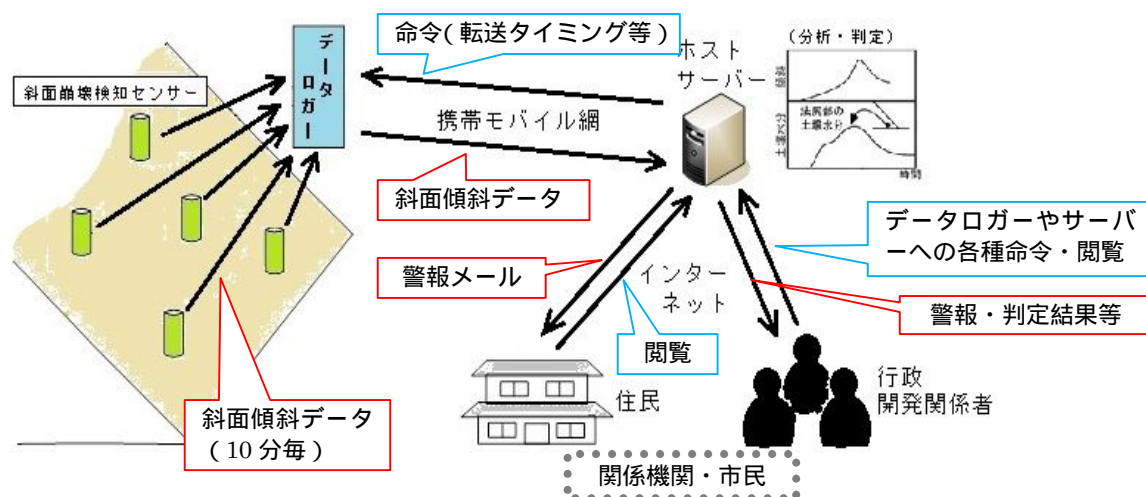


図3-1 複数のセンサーユニットを用いたリアルタイム斜面監視システム⁷⁹⁾

3.2.3 通信系（親機・子機）の仕様

1) データロガー（親機）

本機器は、斜面崩壊検知センサーからの無線信号を受信し、携帯電話網を使って外部機器にデータを出力する。写真3-1に受信器と中継器のケース内部の写真を示す。また、表3-3に現時点（平成27年1月）での仕様を示す。

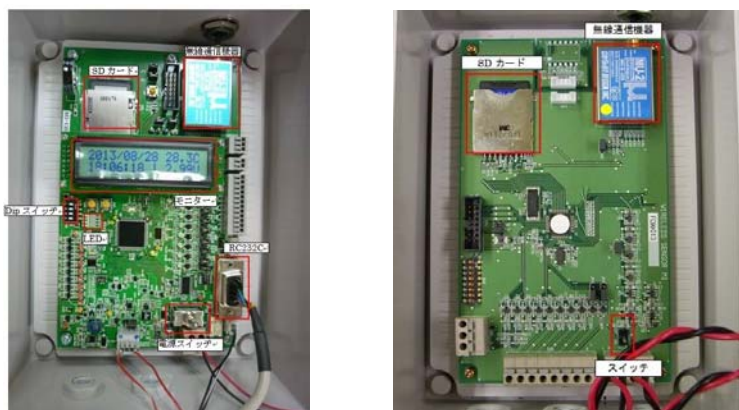



写真3-1 データロガーの受信器・中継器内部（左：受信器、右：中継器）

表 3 - 3 データロガー（親機）の仕様（平成 27 年 1 月現在）

項目	内容
無線通信	
無線適合規格	特定小電力無線（ARIB STD-67 適合（技術基準適合証明取得済）、免許不要）
無線通信機器	MU-2-429（特定省電力シリアルデータ伝送無線モデム） 
送受信周波数	429.250 ~ 429.7375MHz
データ転送距離	無障害時（地上高 1.5m）で約 600m（好条件下で最大 1200m） 見通しの悪い林内 100 ~ 200m程度
受信	
受信センサー数	10 センサー程度（管理可能センサー最大 25 台）
受信信号内容	時刻 センサーID 番号 センサーバッテリー電圧 無線センサーユニット温度 体積含水率計測値 2 軸傾斜計状態信号（X、Y 軸） （参考：3 軸傾斜計状態信号（X、Y、Z 軸））
出力	
出力信号	RS232C、10mW（受信器のみ）
外部出力	USB
データ保存	SD カードで 2GB、最大 50 万データ
電源	
長期観測	ソーラーパネルによる供給を基本とする
短期観測	単 1 乾電池 4 本で 2 週間程度
その他	
ケースサイズ	高さ 218.4mm × 幅 160.0mm × 奥行き 100.0mm （蝶番、アンテナなど除く）
ケース材質	プラスチック
重量	約 0.4 kg
防水機能	日本防水 JIS 基準、保護等級 4（X4）適合
温度条件	適切温度 - 10 ~ 80
注意事項	結露しないこと
オプション	D/A 出力 12 ビット × 2CH A/D 入力 12 ビット × 8CH 接点出力 2 ~ 5 点

2) 斜面崩壊検知センサー（子機）

斜面崩壊検知センサーはデータロガー（親機）と同様に、特定小電力無線によって親機受信機へデータ送信する。センサーノードとの通信部分は子機・孫機兼用機の場合であり試作段階にある。現時点での仕様を表3 - 4に示す。

表3 - 4 斜面崩壊検知センサー（子機）の通信部分の仕様（平成27年1月現在）
（検知部分は表3 - 8を参照）

項目	内容	備考
無線通信		
無線適合規格	特定小電力無線（ARIB STD-67 適合）	データロガーと同
無線通信機器	MU-2-429	
送受信周波数	429.250～429.7375MHz	
データ転送距離	無障害時（地上高 1.5m）で約 600m 見通しの悪い林内 100～200m程度	
送受信（データロガーとの間）		
送受信センサー数	10 センサー程度（管理可能センサー最大 25 台）	データロガーと同
送受信信号内容	時刻 センサーID 番号 センサーバッテリー電圧 無線センサーユニット温度 体積含水率計測値 2 軸傾斜計状態信号（X、Y 軸） （参考：3 軸傾斜計状態信号（X、Y、Z 軸））	
受信（データノード（孫機）兼用機の場合）		
無線規格	短距離無線通信 IEEE802 規格	
送受信周波数	2.4GHz 帯	センサーノード兼用部分については試作段階
データ転送距離	50m（見通しがよければ 100m）	
信号内容	表 3 - 5 参照	
データ転送		
シリアル通信	U A R T ボーレート：115,200bps or 230,400bps	データロガーと同
データ保存	SD カードで 2GB、最大 50 万データ	
電源	単 2 乾電池 4 本で 6 ヶ月稼働（公称値）	

3) センサーノード（孫機）

センサーノードからの送信は短距離無線により行う。センサーノードから斜面崩壊検知センサーを介してデータロガーへデータを送信する必要があるため、センサーノードと斜面崩壊検知センサーの兼用機（表3 - 4 参照）も試作した。表3 - 4 に通信系の仕様を示す。

表3 - 5 センサーノードの通信部分の仕様（平成27年1月現在）

項目	内容	備考
無線通信（センサーノード同士の間、および、斜面崩壊検知センサー兼用機との間）		
無線適合規格	短距離無線通信 IEEE802 規格	Zigbee に相当
送受信周波数	2.4GHz	
データ転送距離	50m（見通しがよければ100m）	
送受信信号内容	時刻 センサーID番号 センサーバッテリー電圧 センサーユニット温度（MEMSチップ内蔵温度） 2軸傾斜計状態信号（X、Y軸：MEMS素子内32回平均）	
データ保存	SDカード	
電源	単2乾電池2本で1年間稼働	10分間隔送信時

3.2.4 無線通信試験

1) 試験目的

通信可能距離や植生の影響等を通信試験により無線通信機能を把握し、現地での適応性の検討における基礎資料として、通信試験では次の2つの試験を実施した。

最長通信可能距離試験

樹木等影響試験

2) 試験内容

最長通信転送可能距離試験

写真3 - 2、図3 - 2に示すような土木研究所構内の見通しがとれる道路上に、崩壊検知センサー（子機）とデータロガー（親機）をそれぞれ規定した試験距離毎に対向させ、子機が発する検知信号を親機で受信可能か否か（または受信強度測定）の試験を行った。ここでは次の範囲で変化させた。

- ・試験距離は、50、100、200、300、340、400、500、600m
- ・受信装置高さ（アンテナ高さ）は、0.0、0.5、1.0、2.0m
- ・センサー高さは、0.0、0.5、1.0、2.0m



写真 3 - 2 土木研究所における最長通信転送可能試験



図 3 - 2 土研構内全景（通信試験位置）

樹木等影響試験

樹木等影響通信試験では、写真 3 - 3 に示すように子機と親機を樹木が茂っている場所に設置し、それぞれ規定した試験距離毎に対向させ、子機が発する検知信号を親機側で受信可能か否かを確認するものとした。



写真 3 - 3 土木研究所における樹木等による通信影響試験

3) 試験結果

最長通信転送可能距離試験の結果

表3 - 6 に最長通信可能距離試験結果を示した。異なるアンテナ形状（折り曲げ状と伸ばす状態）で8 ケースを実施した。センサー高さが0 m（地表に置いた場合）の場合は、通信可能距離が 300mに達した。また、アンテナを伸ばした状態でセンサーユニット高さを 1.0mとした場合、通信可能な距離が 600mとなった。

表3 - 6 最長通信可能距離試験結果

○センサーアンテナ折り曲げ							○センサーアンテナ伸ばす				
No.	距離 (m)	受信機高さ (m) (アンテナ高 さ)	センサ高さ				受信機高さ (m) (アンテナ高 さ)	センサ高さ			
			0m	0.5m	1.0m	2.0m		0m	0.5m	1.0m	2.0m
1	50	0.0					0.0				
		0.5					0.5				
		1.0	○	○			1.0				
		2.0					2.0				
2	100	0.0					0.0				
		0.5					0.5				
		1.0	○	○			1.0				
		2.0					2.0				
3	200	0.0	×				0.0				
		0.5	○				0.5				
		1.0	○				1.0				
		2.0					2.0				
4	300	0.0					0.0				
		0.5	○				0.5				
		1.0	○	△			1.0				
		2.0	○				2.0				
5	340	0.0					0.0				
		0.5					0.5				
		1.0	×	○	○		1.0				
		2.0					2.0				
6	400	0.0					0.0				
		0.5	×				0.5		○	○	
		1.0	×	×	○		1.0	×	○		
		2.0		×			2.0	×			
7	500	0.0					0.0				
		0.5					0.5				
		1.0		×	×		1.0	×	○	○	
		2.0		×	×	○	2.0			△	
8	600	0.0					0.0				
		0.5					0.5				
		1.0					1.0		×	○	
		2.0					2.0	×			

○: 通信可能
△: 一部通信不可能な場合がある
▲: 一部通信可能な場合がある
×: 通信不可

樹木等影響試験の結果

樹木等影響通信試験結果を表3 - 7 (a) (b) (c) に示した。センサー高さを0 m（地表に置いた）とした場合、ならびに、0.5mとした場合、試験距離が 100m程度まで通信が可能であった。また、センサーを埋設（センサー頂部が地表面とほぼ同じ高さ）した場合でも 100m程度までは通信が可能であった。

表 3 - 7 樹木等影響通信試験結果

(a) センサーアンテナアンテナ伸ばさない(受信機高さ: 1m)

No.	距離 (m)	センサ送 信位置	センサ高さ				
			土中埋設		0m	0.5m	1.0m
			土かぶせない	土かぶせる			
1	100	樹木なし	○	○	○	○	
		根本			○		
2	200	樹木なし			▲	○	
		根本				△	△
3	300	樹木なし			×	△	○
		根本				×	

(b) センサーアンテナアンテナ伸ばす(受信機高さ: 1m)

No.	距離 (m)	センサ送 信位置	センサ高さ				
			土中埋設		0m	0.5m	1.0m
			土かぶせない	土かぶせる			
1	100	樹木なし					
		根本					
2	200	樹木なし					
		根本			△	○	○
3	300	樹木なし					
		根本					

(c) センサーアンテナアンテナ伸ばす(受信機高さ: 0.5m)

No.	距離 (m)	センサ送 信位置	センサ高さ				
			土中埋設		0m	0.5m	1.0m
			土かぶせない	土かぶせる			
1	100	樹木なし			○		
		根本			○		
2	200	樹木なし			×		
		根本					
3	300	樹木なし					
		根本					

○: 通信可能

△: 一部通信不可能な場合がある

▲: 一部通信可能な場合がある

×: 通信不可

4) 結果の整理

通信試験を行った結果、次のことがわかった。

センサーの高さを 0 m とした場合、通信可能距離は 300m 程度であった。センサーの高さを 1 ~ 2 m に上げた場合、通信可能距離は 500 ~ 600m 程度まで延伸した。センサーの高さ 0 m とし、通信が樹木で遮断される場合、通信可能距離は 100m 程度であり、センサーの高さをあげた場合、通信可能距離は 300m 程度まで延伸した。

土に埋設した場合においても通信可能距離は 100m 程度確保できた。樹木で通信が遮断される場合、通信可能距離は多少減衰するが、アンテナを伸ばすと受信感度(距離)も良くなり、通信可能距離も延伸する。以上より、通信距離を確保するためには見通しを確保することが有効であることがわかった。

3.2.5 短距離無線を用いたセンサーノードの開発

1) 目的

本研究では、短距離無線を用いて、安価で小型かつ無線中継機能を有するセンサーノード(孫機)を、これまで開発してきた斜面監視システムに組み込めるように新たに開発した。

崩壊危険性のある斜面であっても、亀裂や滑落崖が認められない場合や地すべりブロックが明確でない場合、どのように崩壊するか一概にわからないし、法面掘削工事では工事の進捗と降雨の状況などにより想定しない場所で崩壊が起こりえる。これらの場合、1つの斜面に1つの検知センサーを設置するのではなく、斜面の面積に対してグリッド状に配置することにより崩壊危険性を検出しやすくなると考えられる。

明らかに亀裂や滑落崖が確認できる場合であっても、地質調査データがなく崩壊メカニズムがわからない状況下の対応では、想定される崩壊ブロックに応じて十分な数の計測機器を設置する必要性が生じる。すなわち、データロガーを中心に、斜面崩壊検知センサーを中継器として利用し、その下にセンサーノードを多数配置して、検知センサーの密度を確保することにより精度を向上するものである。

図3-3のように、現場で重点的に監視したい場所に、多数のセンサーノード(孫機)を設置する。孫機、および、子機にIEEE802規格(2.4GHz帯の電波で一般に普及しているZigBeeも含まれる)の短距離無線モジュールを搭載する。親機と子機は、本研究グループがこれまでに開発してきたモニタリング機器であり、429MHzの特定省電力無線を用いて、現場地域に1箇所設置する親機にすべてのデータを集め、SDメモリに記録し、必要に応じて携帯電話回線を使ってインターネットを介してサーバーへ送信する。

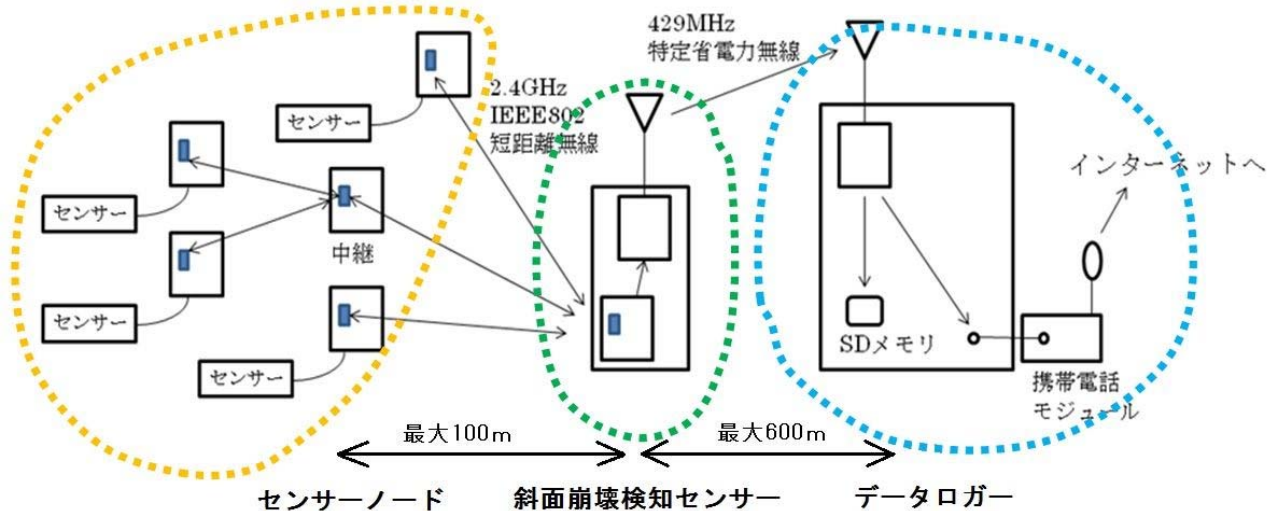


図3-3 斜面崩壊モニタリングシステムの構成図

データロガー(親機)～斜面崩壊検知センサー(子機)間は、最大600m程度の距離で通信が可能のため、広域にわたる対象斜面をカバーすることができるが、無線モジュールのコストがかかる。一方、短距離無線モジュールは安価であるが、通信距離が短く、野外計測で、離れた箇所に点在する対象斜面

をカバーするには適さない。それぞれがカバーする範囲を重ね合わせることで、効率的な斜面監視を実現しようとするものである。

センサーノード（孫機）となる短距離無線モジュールは、最大 50m 程度の通信距離を持ち、孫機自体が中継機能を持ち、I E E E 802 規格に従って自動的に周辺のマジュールを探索してデータの伝送経路を構築する。従って、子機から 50m 以上離れた範囲にも孫機を設置することができ、監視システムを構築後でも、必要に応じて任意に新しい孫機を追加することもできる。

2) センサーノードの仕様

センサーノードは、斜面に数多く設置することを目的として、斜面崩壊検知センサーでは傾斜角検知をアナログ出力で体積含水率計を搭載していたものを、デジタル出力とし体積含水率計を省いて部品点数を少なくし、原価的にも半額程度に抑えた。以下に現時点（平成 27 年 1 月現在）の仕様を示す。

構成	: 傾斜検知部、無線伝送部、有線伝送部（子機との兼用機の場合）
2 軸 M E M S 傾斜計	
・ 型番	: SCA100T-D01（Murata Electronics）
・ 検知角度	: ± 30 度（水平をゼロとして）
・ 精度	: 0.035 度（水平に対し 0 ~ 1 度の間で）
・ 出力	: デジタル出力（11bits、1 秒内で 32 回測定し平均値を出力）
無線通信（表 3 - 5 参照）	
・ 無線適合規格	: I E E E 802.15.4 / ZigBee
・ 信号内容	: 時刻、センサー ID 番号、センサー温度、電圧、2 軸傾斜計信号（X 軸、Y 軸）
・ データ転送距離	: 50m 程度（見通しがよい場合 100m）
有線通信	: U A R T（表 3 - 4 参照、子機との兼用機の場合）
その他	: データ保存、電源は表 3 - 5 参照

3) 試作内容

センサーノード（孫機）、および、孫機・子機兼用機に組み込む短距離無線モジュールを開発し、動作の確認を行った。製作した無線モジュールは I E E E 802 モジュール（佐鳥電機(株)製）を採用し、使用目的に適したネットワーク管理、データ転送のソフトウェアを開発した。また、無線モジュールを介してデータを送受信し、センサーからのデータ取得、電源管理などを行うセンサーノード（孫機）の回路図、および、基盤（図 3 - 4、写真 3 - 4 を参照）を製作し、そのための制御プログラムを開発した。

孫機の短距離無線モジュールは、本体基板の M P U とは独立した M P U を持ち、無線モジュール間のデータ転送ネットワークの自動形成、データ転送のタイミング制御による衝突防止管理、送信休止時のスリープ制御による省電力管理を担い、子機からの動作コマンドを本体基板に伝えるとともに、本体基板からのデータを適宜転送して子機に送り届ける。本体基板の M P U 側では、センサーのデータを取得

し、短距離無線モジュールに受け渡すだけで、データの子機へ送ることができる。従って、現地でのモニタリングの目的、状況に合わせて、孫機の使用を柔軟に作り替えることが容易な構成になっている。

孫機・子機兼用機における本体基盤と短距離無線モジュールの接続図を図3 - 5に示す。このように、本体基板（Host MCU）と、短距離無線モジュールの間の通信は、シリアル通信（UART - ボーレート 115,200bps or 230,400bps）を用いた。WakeUp と INT の I / O 端子間の接続を持ち、本体基板側から無線モジュールへデータ転送などの指示を送るときには WakeUp、無線モジュールから本体基板へデータ送受信などのイベントを報告するときには INT 信号を用いて、互いに割り込みを通知するようにした。これにより、両者ともほとんどの時間をスリープ状態で待機することができ、省電力化を図れた。

これまで開発してきた親機、子機の長距離通信に使っている無線モジュールは、1台1万5千円程度の価格で購入でき、今回開発した短距離無線モジュールは3,500円程度で市販されている。本体基板も簡略化できるため、監視システム全体のコストを大きく下げることができると考えられる。

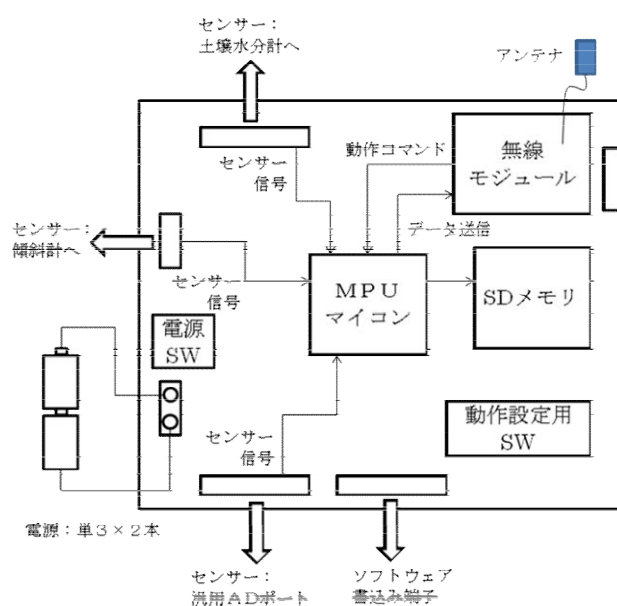
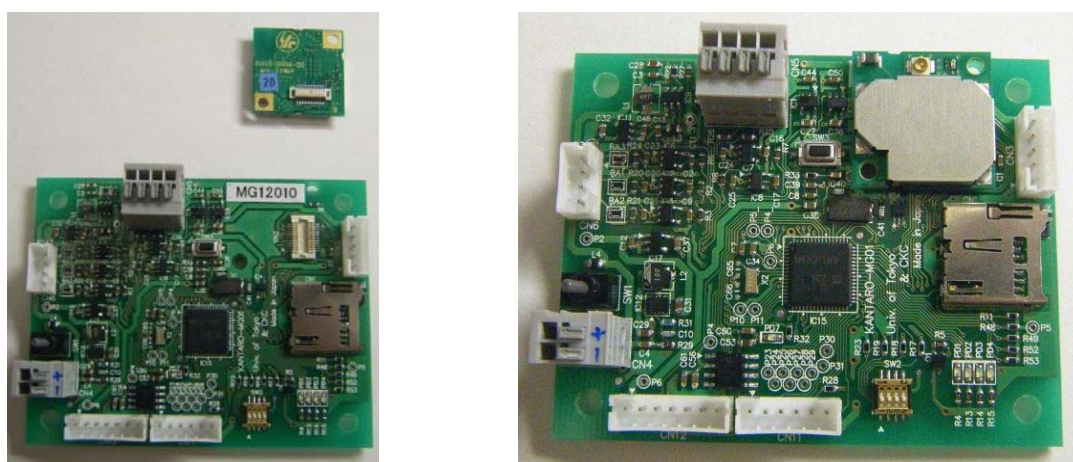


図3 - 4 製作した孫機の基板の構成



a) 孫機（下）と無線モジュール（上） b) 無線モジュールをマウントした状態

写真3 - 4 製作したセンサーノード（孫機）の基板

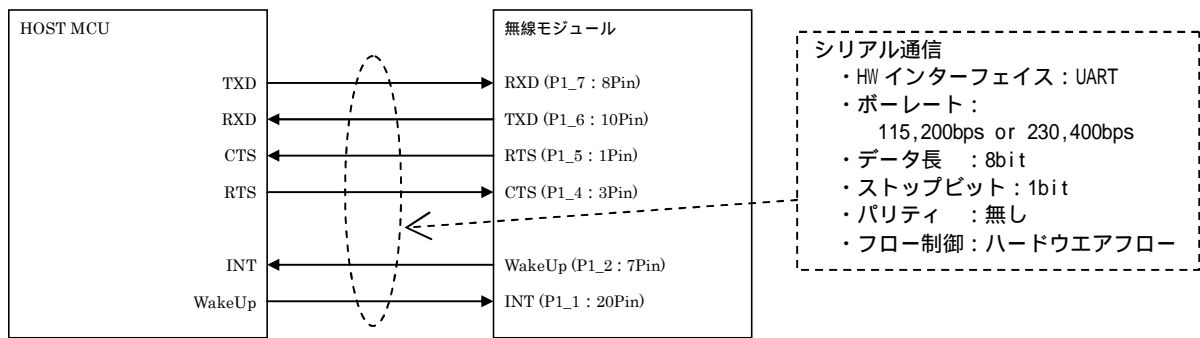


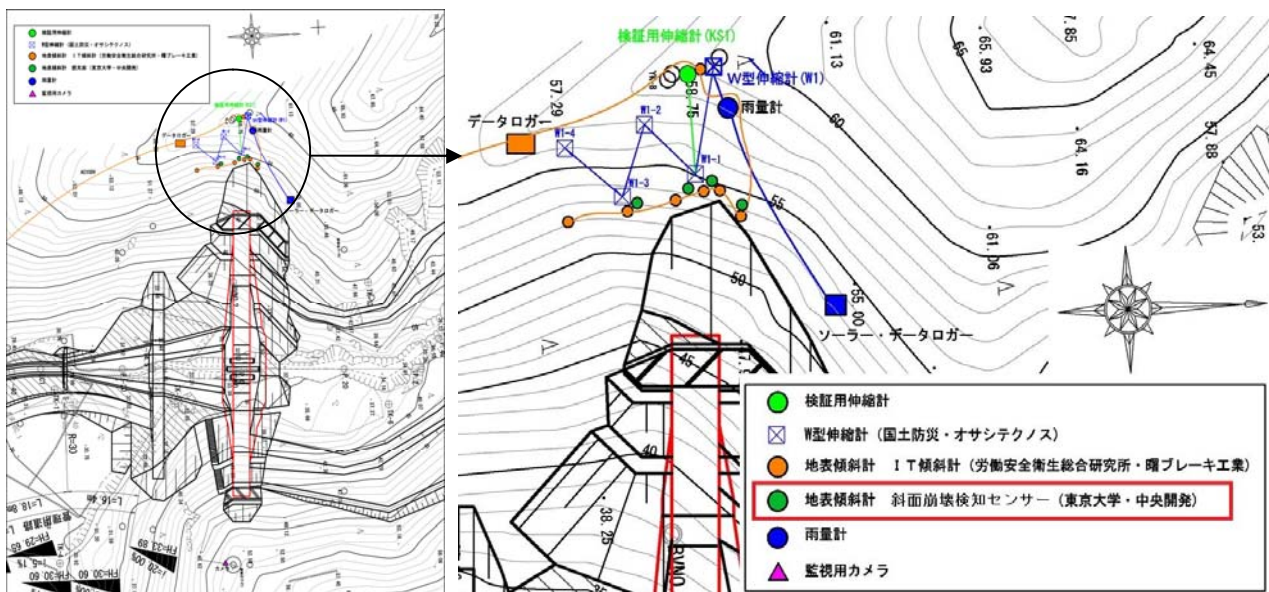
図3 - 5 本体基板と無線モジュールの接続図
(斜面崩壊検知センサー(子機)およびセンサーノード(孫機)の兼用機の場合)

4) 現場確認試験

設置状況

本体基板、および、無線モジュールを製作してプログラムを作成した。試作品について通信、および、データ転送の動作確認を行い、その後、高知県黒鳥谷川の実際の砂防ダム堰堤の掘削斜面近傍上部において、平成 25 (2013) 年 11 月末から平成 26 (2014) 年 3 月初めまでの約 100 日間、現場動作試験を行った。

黒鳥谷川の現場には、データロガー (親機) 1 台、斜面崩壊検知センサー (子機) 4 台 (うち 1 台は孫機兼用)、センサーノード (孫機) 3 台を設置し、動作を確認した。図 3 - 6 の設置機器配置図には斜面崩壊検知センサー 4 台の設置位置を示し、3 台の孫機は孫機兼用の子機の近辺に設置した。写真 3 - 5 に現場写真を示す。図 3 - 7 ではセンサーノード (孫機) から斜面崩壊検知センサー (子機および孫機兼用機) を介して、データロガーまでのデータ転送の流れを矢印で示す。



(a) 全体図

(b) 拡大図

図 3 - 6 設置機器配置図

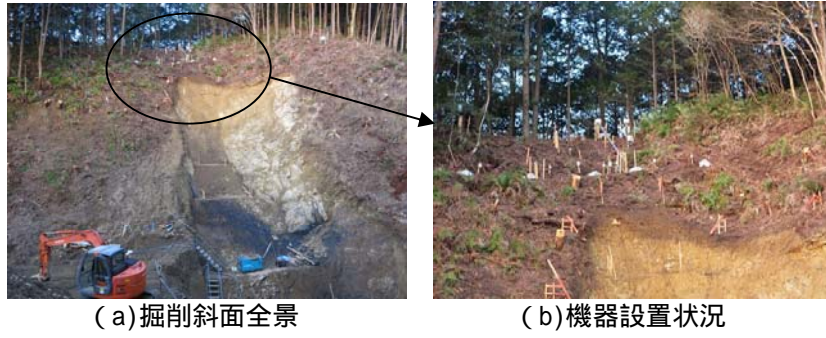


写真 3 - 5 現場写真

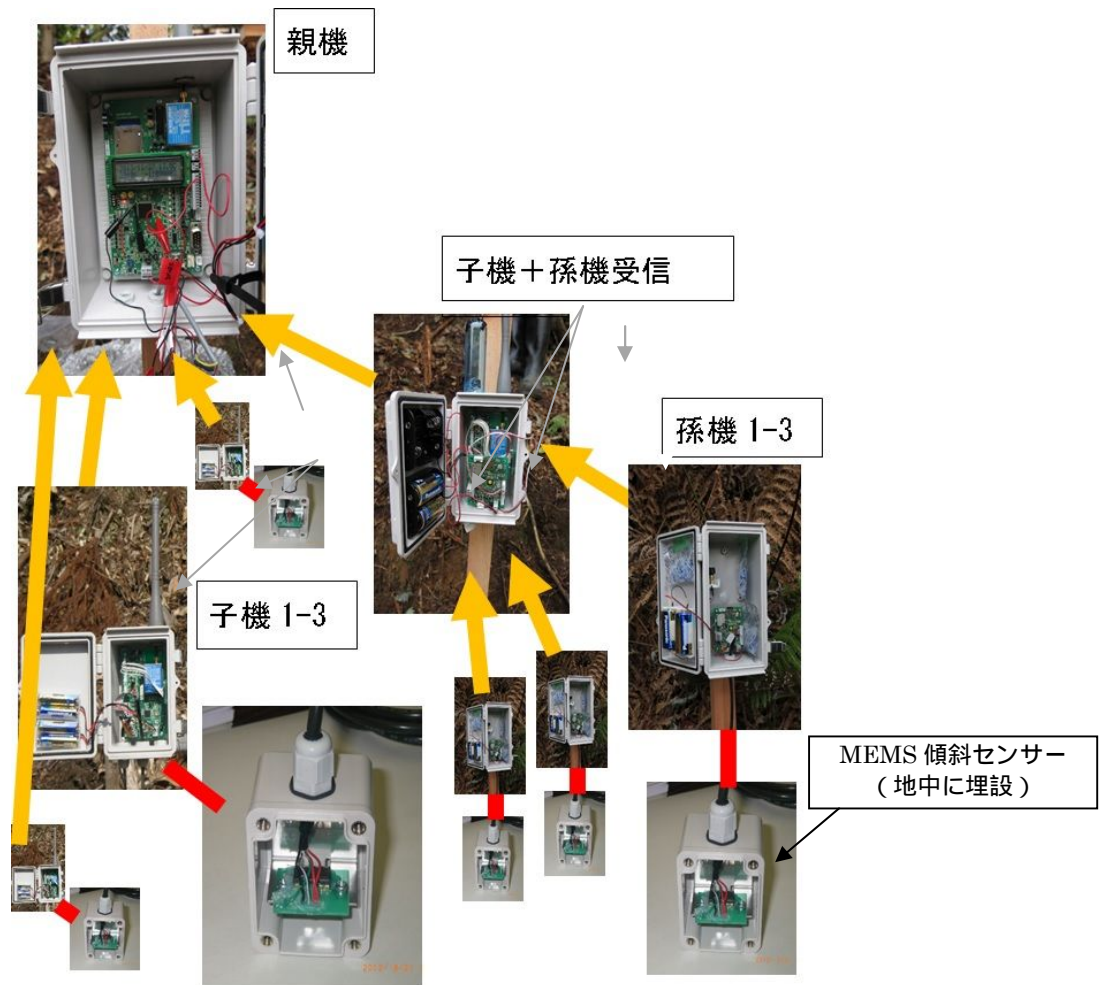


図 3 - 7 子機・孫機・兼用機の写真

斜面災害検知センサー（子機）の動作確認

図3 - 8 ～ 図3 - 10 に、斜面災害検知センサーNo.1～No.3の傾斜データ計測結果を示す。これらにみられるように、X軸・Y軸方向の傾斜について、正常なデータ計測を行うことを確認した。また、子機No.3では土壌水分も正常に計測した。斜面崩壊検知センサーのデータについては温度補正を行うことにより気温の日変化による温度変動を補正し、いずれの子機にも問題がないことを確認した。

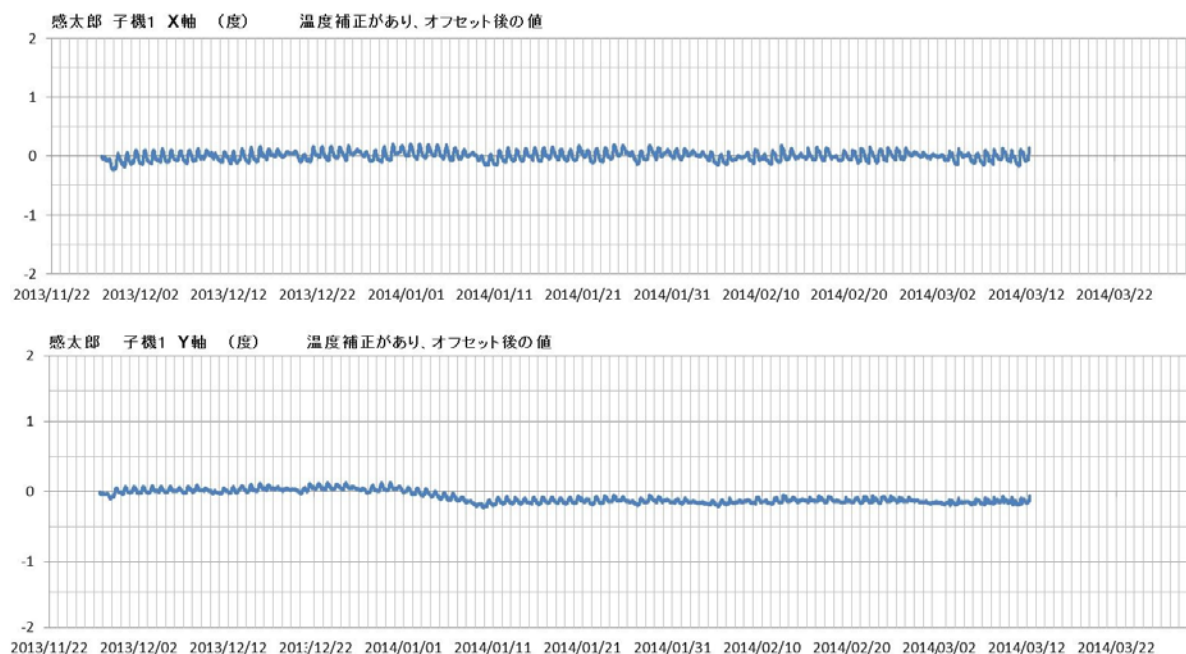


図3 - 8 斜面災害検知センサー（子機）No.1の計測結果
（上段：X軸、下段：Y軸、温度補正あり）

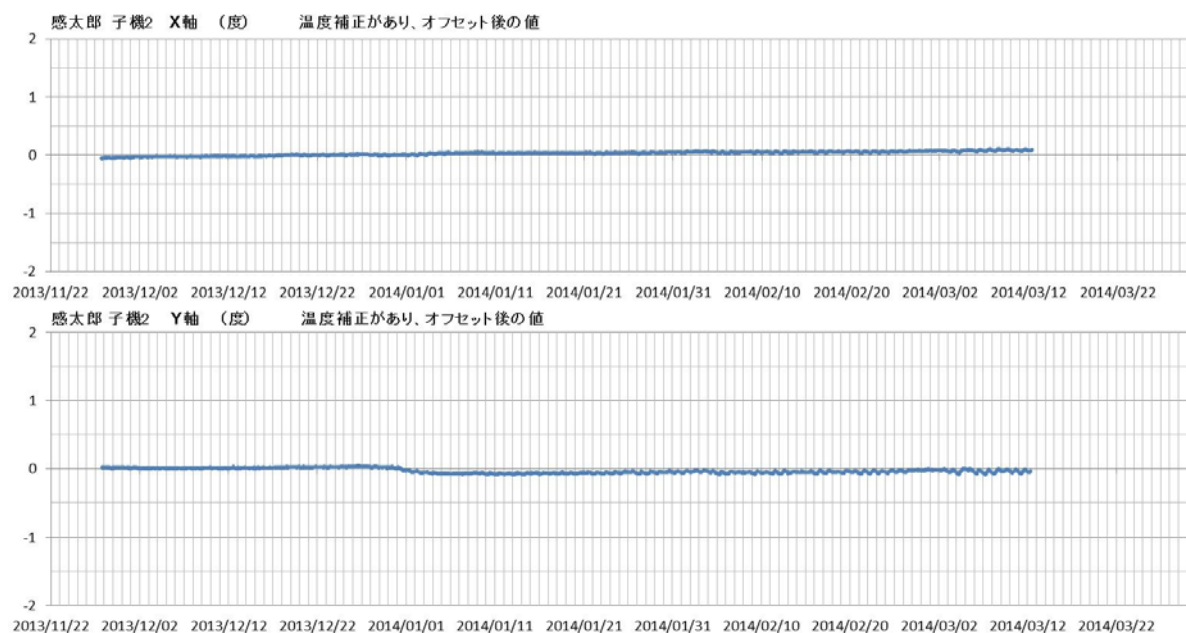


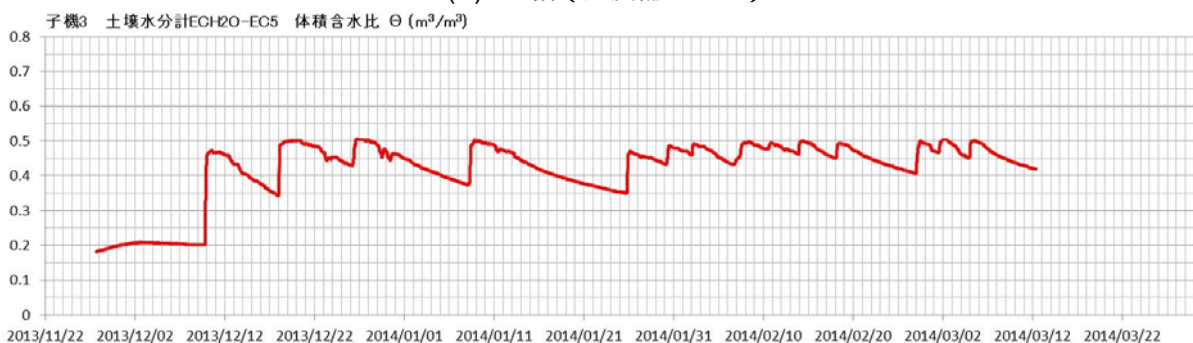
図3 - 9 斜面災害検知センサー（子機）No.2の計測結果
（上段：X軸、下段：Y軸、温度補正あり）



(a) X軸 (温度補正あり)



(b) Y軸 (温度補正あり)



(c) 体積含水率

図3 - 10 斜面災害検知センサー (子機) No.3 の計測結果

センサーノード (孫機) の動作確認

図3 - 11、および、図3 - 12に、センサーノード (孫機) No.2、No.3の室内検定結果を示す。室内において全ての孫機が正常に動作したことを確認して、現場試験に臨んだ。図3 - 13にみられるように孫機 No.1は現場試験1日目 (平成25 (2013) 年11月27日) で電源が切れ、原因の調査が必要となった。

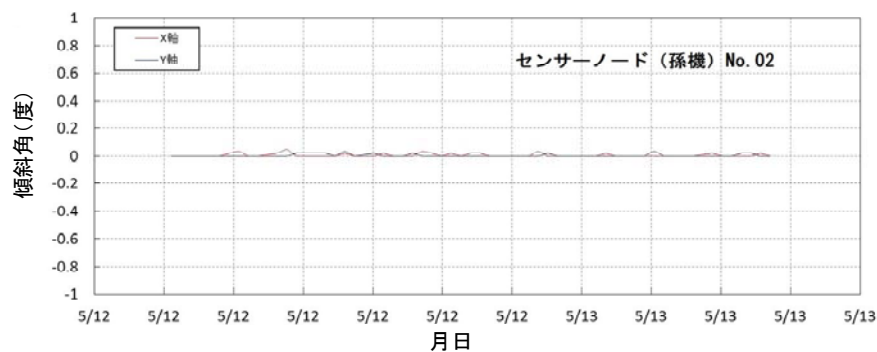


図 3 - 1 1 センサーノード（孫機）No.2 の室内検定結果

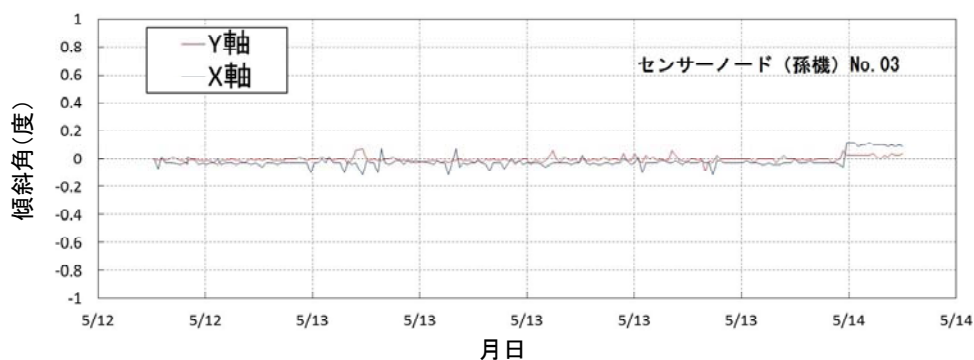


図 3 - 1 2 センサーノード（孫機）No.3 の室内検定結果

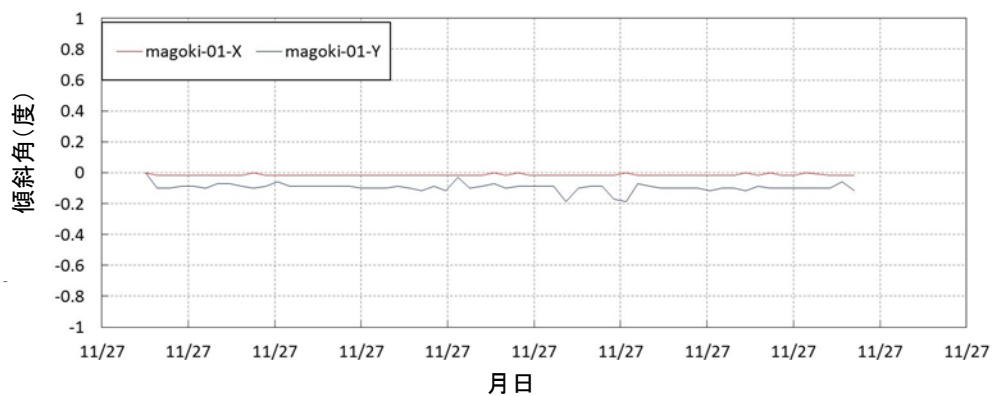


図 3 - 1 3 孫機 No.1 における現場試験の計測結果

図 3 - 1 4、および、図 3 - 1 5 に、孫機 No.2、および、孫機 No.3 の平成 25 (2013) 年 12 月 8 日～31 日までの現場計測結果を拡大して示す。掘削工事の状況と日雨量を同図内に併記した。これを見る限り、掘削工事の実施期間中において、かつ、数 10mm の日雨量の中において、ノイズが $\pm 0.2^{\circ}$ 程度あるものの、データ転送が正常に行われることが確認でき、斜面の変動状態について（この期間中は問題がないという）基本的な動作確認を行うことができた。

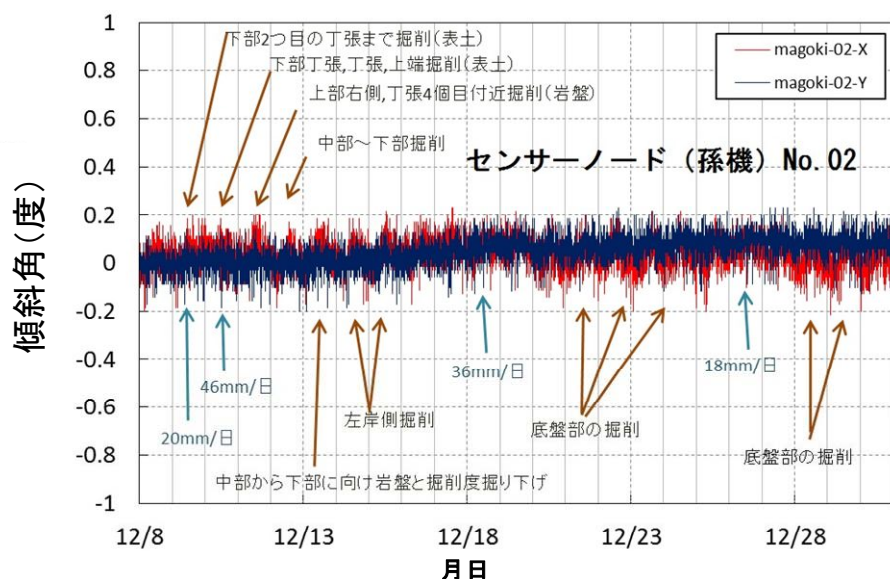


図 3 - 1 4 孫機 - 2 の現場計測結果

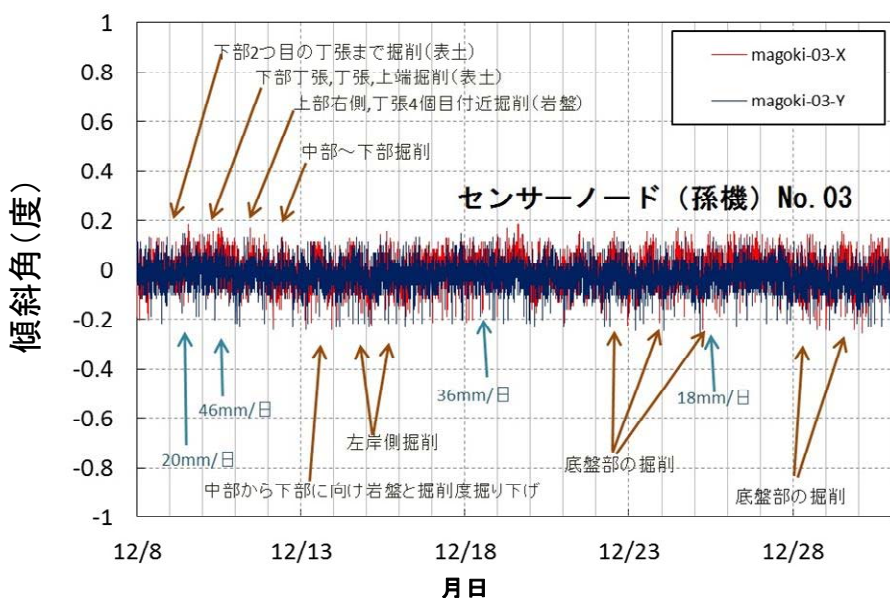


図 3 - 1 5 孫機 - 3 の現場計測結果

3 . 2 . 6 まとめ

M E M S 素子を内蔵した傾斜検知ユニットを試作し、双方向無線による斜面災害防止のための通信システムを試作した。システムは親機であるデータロガー、子機である斜面崩壊検知センサー（小型孔内傾斜計を含む）、孫機であるセンサーノードからなり、親機～子機間は最大 600m で特定省電力無線（429.250～429.7375MHz 帯）、子機～孫機間は最大 50m で短距離無線 IEEE802 規格（2.4GHz 帯）で孫機同士もネットワークを形成でき、リアルタイムで安定した通信ができることを実斜面で確認した。

データロガー～ホストサーバー間は携帯モバイル網を用い、ホストサーバーに蓄積したデータを閲覧・分析・評価でき、その結果を予め定めておく判定基準に従って警報を関係者へ送信できることを確認した。

3.3 斜面崩壊検知センサーの開発

3.3.1 開発の概要

既往の研究⁵⁾⁶⁾によると、豪雨に起因する斜面崩壊は、局所的な動きから広範囲な斜面変動に拡大、あるいは、崩壊しやすい斜面から順次崩壊が進行していくことが報告されている。仮にある地域周辺の斜面崩壊リスク情報を、崩壊の直前、または、崩壊直後に入手できれば、その斜面災害の影響や対策を判断する上で有力な情報を得ることになる。よって、斜面崩壊リスクに関する情報をできるだけ多くの地点で遅延なく収集できるようにするために、安価かつ簡単に設置できる斜面監視システムの開発を行うものである。

斜面崩壊検知センサーの研究は、平成 17 (2005) 年から開始され、その経緯については、表 3 - 1 に示した。初期の試作品では、室内で温度サイクル試験 (- 20 ~ 80)、無線通信能力試験、消費電流の確認試験などの基礎的試験を行い、平成 20 (2008) 年には六甲山の砂防対策斜面にて実地の動作確認試験を行った。その結果、実際に崩壊の危険性のある自然環境下で動作することを確認した。

3.3.2 斜面崩壊検知センサーの仕様

斜面崩壊検知センサーは、斜面を監視するパラメータとして、既往研究¹⁰⁾¹¹⁾¹³⁾に基づいて、傾斜角と体積含水率に絞り込んで無線ネットワークとして構築する。できるだけメンテナンスフリーとし、乾電池だけで長期間駆動できる簡易な無線センサー計測ユニットとして試作を開始した。

斜面崩壊検知センサーの検知部などの仕様を表 3 - 8 に示す。本機器は、内蔵する MEMS 傾斜検知により設定時間間隔毎に傾斜角度を測定する。また、外付けの体積含水率計によって土壤水分 (体積含水率) を測定し、特定小電力無線によりデータロガーの受信機にデータ送信するものである。

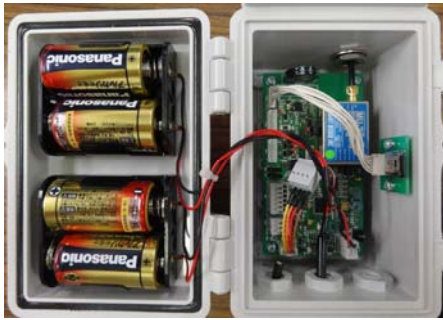
最初の試作品は、無線通信回路、MEMS 傾斜計を内蔵した円筒を土中に設置して土壤水分計を外付けとしたが⁸⁾²⁾、実証試験以後は通信性能を確保するため無線通信回路と傾斜計を別のケースに分離して無線通信回路・アンテナを地上に設置し、傾斜計は地中に埋め、体積含水率計を外付けとした。

センサーの主要な構成は、傾斜検知部、体積含水率検知部、無線伝送部からなり、防水ケースに収められている。本研究では精度の高い 2 軸 MEMS 傾斜検知を用いている。通常、現場においても 2 軸を用いるが、参考まで 3 軸 MEMS 素子の数値も掲載した。MEMS 傾斜素子としての傾斜測定精度は 0.0025 度である。斜面崩壊検知センサーとしては、本研究結果に従い、MEMS センサー個々の温度特性や、気象条件、現場の見通し状況などによって異なる場合がある。電源 (単 2 乾電池 4 本) による稼働時間も計測間隔や温度条件により異なるが、表中の稼働期間 (6 ヶ月) は、10 分間隔で傾斜測定した場合の安全側の値である。写真 3 - 6 にセンサーケース内部と設置状況の写真を示し、図 3 - 16 にセンサーの通信機器の構成を示す。図 3 - 17 には、ケース内に傾斜計センサーを内蔵している場合の標準的な設置方法、および、傾斜計を分離して地中埋設する場合の設置方法の模式図を示す。

表 3 - 8 斜面崩壊検知センサーの仕様（平成 27 年 1 月現在、無線部は表 3 - 4 参照）

項目	仕様	備考
構成	傾斜検知部（MEMS 素子） 土壌水分検知部 無線伝送部 防水ケース（プラスチック） バッテリー	
2 軸傾斜計		
検知角度（MEMS 傾斜計）	± 30 度	斜面崩壊検知センサーとしての精度は気象条件や設置環境により異なる場合がある。
精度（MEMS 傾斜計）	0.0025 度	
精度（斜面崩壊検知センサー全体として）	0.02 度程度 （気象条件や設置環境による 注 1）	
型番	SCA100T-D01（VTI）（VTI Technologies 製） 	
X・Y 軸の傾斜の定義		
（参考）3 軸傾斜計		
検知角度（MEMS 傾斜計）	± 90 度	
精度（MEMS 傾斜計）	0.04 度	
体積含水率計		
測定方式	A D R 式（ECHO 型番 EC5-5 プローブ） 	含水率 0 ～ 100% でアナログ出力約 0.22 ～ 0.8V であるが、土壌に含まれる鉱物や塩分で含水率は異なる。
分解能	0.002m ³ / m ³	
計測精度	± 3%	
サイズ	ロッド 5 c m	
無線伝送		
無線適合規格	ARIB STD-T67 適合	表 3 - 1 - に参照
送受信周波数	429.250 ～ 429.7375MHz	
データ転送距離	無障害時約 600m	
その他		
サイズ	高さ 158.4mm × 幅 100mm × 奥行き 85mm	
重さ	約 0.3k g（電池を除く）	
電源	単 2 乾電池 4 本（6 ヶ月稼働）	計測間隔 10 分、公称値
防水機能	日本防水 JIS 基準、保護等級 4（X4）適合	
温度条件	適切温度 - 10 ～ 80	
取り付け方法	斜面に杭を打ちネジなどで固定する	

注 1）温度による変動やランダムノイズを含む。温度変動についてはキャリブレーションを、ランダムノイズについては MEMS 素子内での短時間移動平均を検討中である。



(a)通信器内部



(b)MEMS 傾斜検知モジュール
(地中埋設型)



(c)設置状況

写真 3 - 6 斜面崩壊検知センサーと設置状況^{8 3)}

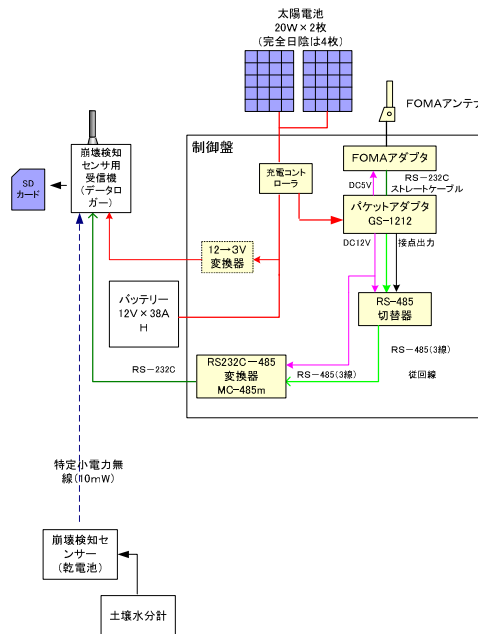
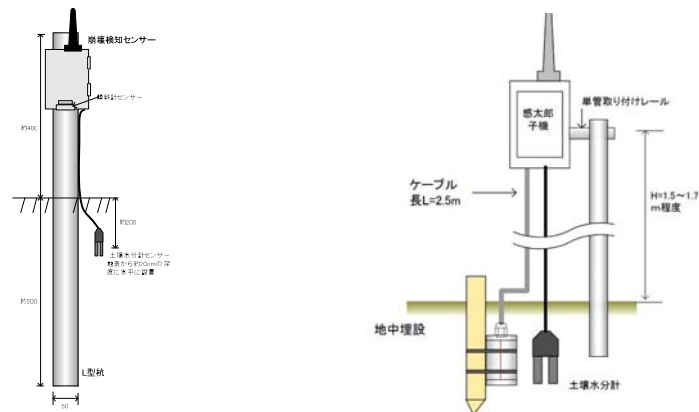


図 3 - 1 6 斜面崩壊検知センサーの通信機器構成



(a)標準的な設置方法

(b)傾斜計を分離し埋設する設置方法

図 3 - 1 7 斜面崩壊検知センサーの設置方法

3.3.3 動作確認試験

1) 温度環境変化に対するMEMS傾斜検知ユニットの動作確認

試験方法

- ・使用機器：ダバイエスペック社製 冷熱衝撃試験機
- ・冷熱衝撃が下記の条件を1サイクルとした環境下に12サイクル間、MEMS傾斜検知ユニットに導通した状態で放置し、終了後に導通状態について動作チェックを行った。
- ・環境条件：高温：80、1時間、低温：-20、1時間（室温放置なし）



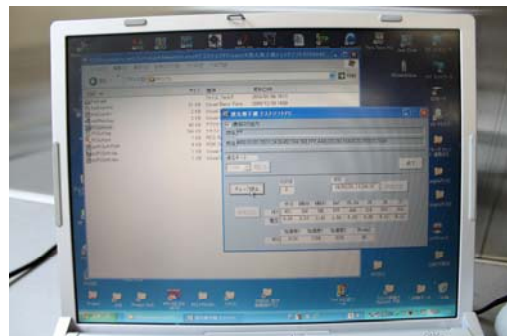
写真3-7 冷熱衝撃試験の実施状況

試験結果

上述した試験方法に基づき、実施した冷熱衝撃試験結果により、センサーが-20～80の繰り返し温度変化環境で導通状態を保ち、動作チェックを行った結果、異常がないことを確認した。-20～80（11時間）の温度差の冷熱衝撃試験で正常に動くことと、実際の運営時において急な気温における変化にも耐える設計となっていることを確認した。



(a) 試験中の様子



(b) 試験画面

写真3-8 検査ソフトにおける冷熱衝撃試験中のMEMS傾斜検知ユニットの動作確認

2) 消費電流の確認

試験方法

安定化電源装置によりMEMS傾斜検知ユニットにDC3.0Vの電源を供給する。図3-18に示すように、この電源装置とタイプセンサーの間に1Ωの負荷抵抗を挟み、電圧の変化(1mV=1mA)を測定して、下記で示す条件で消費電流を計測した。

- ・オシロスコープ : GL900-4
- ・実験室温 : 24
- ・サンプリング時間 : 10μS
- ・フィルタ : 500Hz

<スリープ時の条件>

- ・CPU電源 : ON
- ・3軸MEMS角度センサー電源 : ON
- ・その他の電源 : OFF

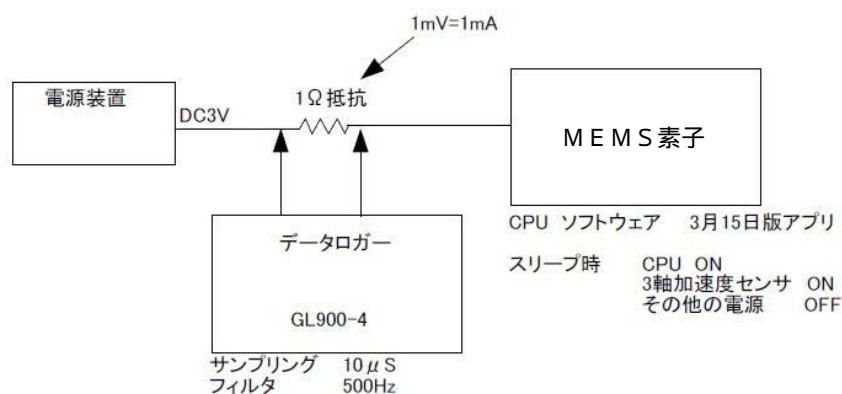


図3-18 測定計装図

試験結果

図3-19に電源を入れた直後の起動中のセンサーの消費電流を示す。センサーのパラメータ初期化が短時間（約10秒間）で終了していることがわかる。センサーは通常稼働時に10分間隔の繰返し周期でデータを収集し送信する。図3-20に示すように20分間における測定結果をしめす。センサーは起動中（データ収集・無線送信）の時間を無視できるぐらいに短く、ほとんどスリープ状態（0.413mA）で消費電流を控えている。今回の試験結果を下記のようにまとめる。

- ・起動中の消費電流（図3-19、10分間あたり）
 - ・トータル起動時間 : 1110 mS
 - ・起動時間の平均消費電流 : 27.800 mA
- ・スリープ中の消費電流（図3-20、10分間あたり）
 - ・スリープ時間の測定時間 : 1000 mS
 - ・スリープ中の平均消費電力 : 0.413 mA
- ・起動の繰返し周期 : 10 min = 600 sec

- ・一周期あたりのスリープ時間 : 598.89 sec (= 600 - 1.11)
- ・スリープ中の消費電流計 : 247.3416 m A sec (= 598.89 × 0.413)
- ・起動中の消費電流計 (10 分あたり) : 30.858 m A sec (= 27.8 × 1.11)
- ・1 周期の総消費電流計 (10 分あたり) : 278.1996 m A sec (= 247.3416 + 30.858)
- ・平均消費電流 : 0.463666 m A (= 278.1996 / 600)

よって、平均消費電流は約 0.4637 m A であった。斜面崩壊検知センサーにおける消費電流の確認試験は、室内条件で実施したため、温度変化による影響を考慮していない。アルカリ電池使用時に低消費電力回路を駆動するときには低温時の電池電圧降下をほぼ無視できることから、今回の計測値が実際の稼働時の電力消費量になると考えられる。

センサーの新規電池容量がアルカリ単三 4 本で換算すると約 8000 m A (2000 × 4 = 8000 m A) で、10 分間隔の繰り返し周期の平均消費電流 (= 0.463666 m A h) で換算すると稼働時間 17,253 時間 (= 8000 / 0.463666) すなわち、約 718 日の計算稼働時間となる。なお、アルカリ電池は自己放電特性を持つため、データ収集時間を 10 分間隔とした場合、斜面崩壊検知センサーの推奨稼働時間は 1 年半になるとみられる。

この電流消費試験の結果に基づいて、さらに電源管理プログラムを改良した結果から、4 個のアルカリ乾電池を使用して 10 分おきのデータ送信した場合で 3.8 年の運転が可能であることを確認した^{8 2)}。電池の寿命はデータサンプリング間隔、および、通信の頻度の設定によって変わってくるが、ある程度長期間の観測に耐えられるものと考えられる。

- ・推奨稼働時間 : 1 年半程度 (運転可能時間 = 3.8 年)

電池を一度セットすると一年以上動作するということで、利用者が毎年決まった日 (1 月 1 日や誕生日など) に忘れず電池交換すればよいなど、メンテナンスし易いという実用上のメリットがある。

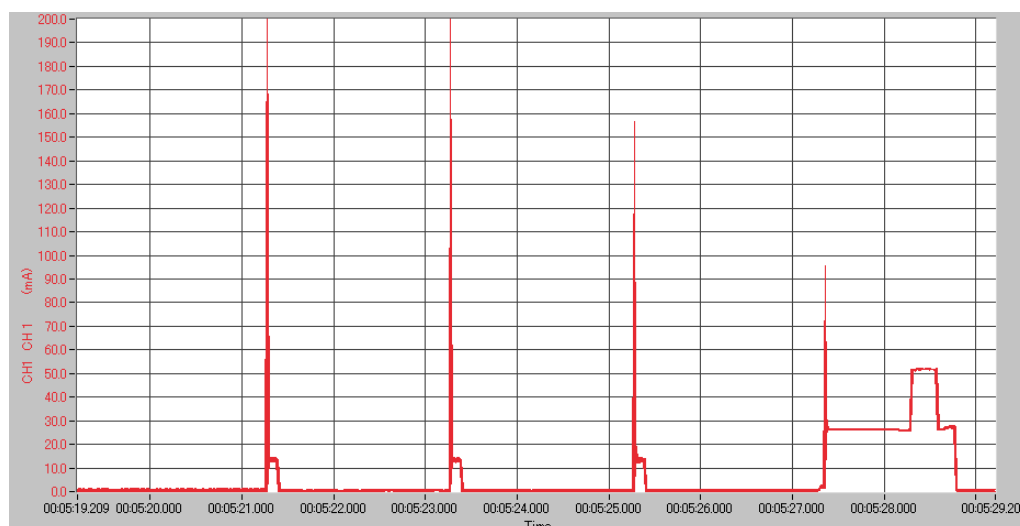


図 3 - 1 9 センサーが電源を入れた直後の起動中の消費電流拡大図



図 3 - 2 0 20 分間における測定消費電流

太陽電池を併用した場合

現場試験で太陽電池モジュールにより電力を補う場合^{8 7)}を考える。センサーの平均消費電流 (= 0.463666 mA) から、

$$\begin{aligned} \text{太陽電池の1日あたりの必要発電電流量} &= 0.463666 \times 24 / (0.85^{*1} \times 0.95^{*2}) \\ &= 13.78 \text{ (mAh/日)} \\ &= 0.01378 \text{ (Ah/日)} \end{aligned}$$

* 1 : 出力補正係数 (気象、パネルの汚れ・経年変化による補正) = 0.85

* 2 : 充放電損失補正係数 = 0.95

例えば、最大出力電流 = 0.21 A のモジュールを使用する場合、必要枚数は、

$$\text{太陽電池の必要枚数} = 0.01378 / (0.21 \times 3.3^{*3}) = 0.020 < 1 \text{ (枚)}$$

* 3 : 1 日あたりの平均日照時間 = 3.3 (h)

全ての電力を太陽電池モジュールから得るためには 1 枚のパネルで充分容量が足りることになる。必要なバッテリー容量は連続不日照日を 4 日とし鉛蓄電池の寿命確保のため放電深度を 50% とすると、

$$\text{バッテリー蓄電容量} = 0.01378 \times 4 \text{ (日)} / 0.5 = 0.011 \text{ (Ah)}$$

以上から、太陽電池モジュール併用により内蔵乾電池の電量消費量を抑えることが可能となる。表 3 - 9 は参考例である。

表 3 - 9 太陽電池モジュールの例
(ケー・アイ・エス社製太陽電池モジュール GT1618-MF)

項目	仕様
最大出力 (Pm)	1.9W
最大出力 動作電流 (Ipm)	0.21A
最大出力 動作電圧 (Vpm)	9.0V
短絡電流 (Isc)	0.23A
開放電圧 (Voc)	11.0V
寸法 (mm)	136 × 182 × 13
重さ (Kg)	0.4
価格 (税込)	¥ 6,985

3.3.4 神戸市六甲砂防斜面における長期動作確認試験

1) 試験目的

平成 20 (2008) 年 4 月から、六甲山の千丈谷試験フィールド、および、芋川谷 (いもがわだに) 試験フィールドに、斜面災害検知センサー計 8 機を設置し、2 年半にわたって動作試験と定期点検 (9 回) を行い、センサーの耐久環境性能 (耐久性能)、検知性能などを把握した。図 3 - 2 1 に試験を行った機器の構成図を示す。

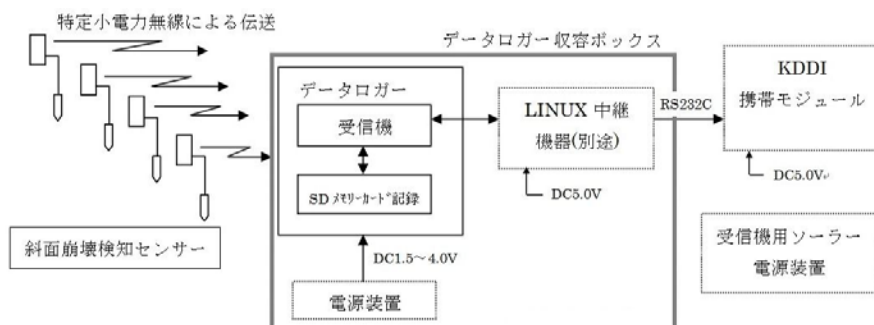
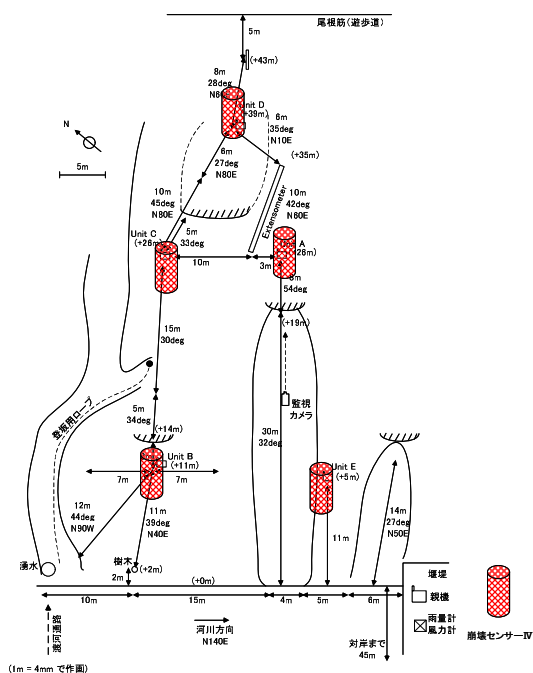


図 3 - 2 1 機器構成図

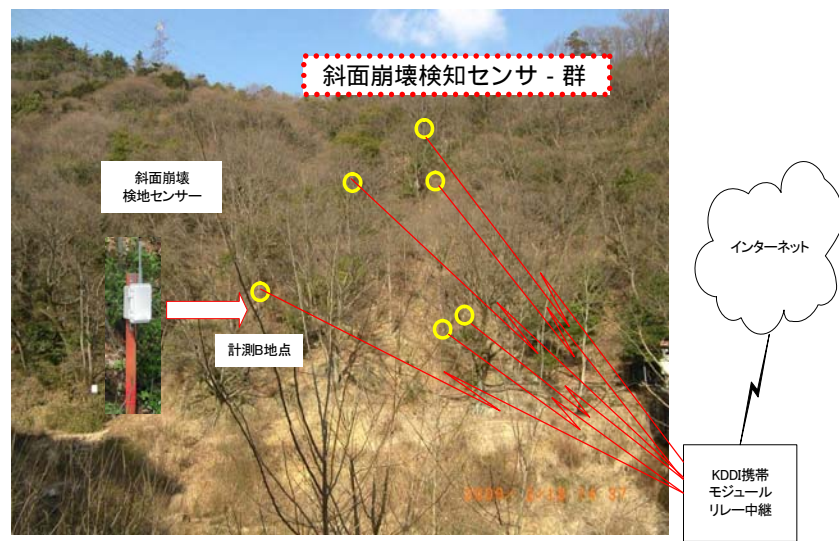
2) 試験方法

千丈谷試験フィールド

図 3 - 2 2 に示すように、斜面に斜面崩壊検知センサーを 5 台、無線受信データ記録装置 1 台、携帯転送装置 1 台、制御用リレー機器 (Linux) 1 台を設置した。



(a) 斜面崩壊検知センサー配置図 (千丈谷試験フィールド) (次頁に続く)



(b)現地写真

図3 - 22 千丈谷試験フィールドにおける斜面崩壊検知センサー配置図と現地写真

芋川谷試験フィールド

図3 - 23に示すように、斜面に斜面崩壊検知センサーを3台、無線受信データ記録装置1台携帯転送装置1台を設置した。



図 3 - 2 3 苧川谷試験フィールド

3) センサーの設置方法

斜面崩壊検知センサーの設置は、図 3 - 2 4 に示すようにスチール製杭を打設し、センサーを固定した。無線通信のため、センサーの設置を地面より 100 cm 以上の高さに設置した。

ここで試作した斜面崩壊検知センサーでは、電源や無線通信部をケースに入れ M E M S 傾斜検知部は別の防水ケースに入れて地面に直接設置する形とした。また、外付けした体積含水率計は地面内に埋設した。使用した土壌水分計には高周波回路が内蔵されており、水分計に余分な力加わらないように穴を掘って挿入して土を被せて設置した。

表層崩壊は、深さ 1 m 程度の風化層で起きるものが大半である。スチール杭は、この風化層を貫通して底部の、やや安定した基層まで到達させる。崩壊時には、この基層部が固定端となり、杭体が傾斜し、センサーに角度変化が検知される。写真 3 - 9、写真 3 - 1 0 に設置の状況を示す。

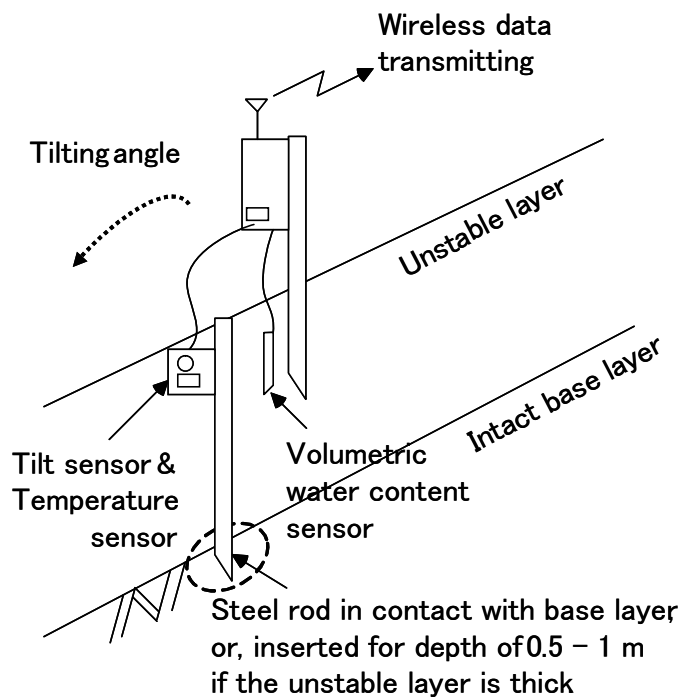


図 3 - 2 4 斜面崩壊センサー設置方法



(a) 斜面崩壊検知センサー



(b) 無線受信 (LINUX ・ KDDI) モジュール

写真 3 - 9 機器設置状況



(a) 斜面崩壊検知センサー



(b) 無線受信口ガー

写真 3 - 1 0 機器設置状況 (芋川谷試験フィールド)

4) 試験結果

定期点検結果

平成 21 (2009) 年 3 月 18 日の千丈谷フィールドの定期点検で、送信が停止した斜面崩壊検知センサー 3 機を交換した。調べた結果、ケースの中に落葉ゴミなどが入っており、悪戯が原因とみられた。

定期点検は、平成 20 (2008) 年 6 月 24 日、8 月 7 日、10 月 2 日、12 月 4 日、平成 21 (2009) 年 3 月 18 日、8 月 27 日、11 月 18 日、平成 22 (2010) 年 4 月 15 日、10 月 13 日の計 9 回、実施した。試験初期はセンサー部に水が浸入するなど機密性が問題だったが、パッケージの密封性を改良し問題がなくなった。

平成 22 (2010) 年 10 月の定期点検の目視結果、電池電圧チェックの結果ではケースに浸水・結露はなく、データも順調に送信されていることを確認した。

センサー性能について

図 3 - 2 5 は、千丈谷試験フィールドの観測地点 B で設置した初期の型 (1 軸、地中 30cm に埋め込む) 傾斜計における観測結果と新開発した崩壊検知センサーに組込んだ M E M S (2 軸) 傾斜計観測結果の経過図である。同図の温度計測図 (上から 3 番目) に示すように気温が 30 ° を超える変動幅はあるものの、Y 軸が $\pm 1.0^{\circ}$ のスケールでみた傾斜値では、7 ヶ月の監視を経ても大きな変化はほとんど見られなく、センサーを設置した斜面は安定しているとわかった。

崩壊検知センサーに組込んだ M E M S (2 軸) 傾斜計観測結果 (同図の上から 2 番目) では、平成 20 (2008) 年 6 月上旬のメンテナンスにより傾斜角度の変化が見られた。従来型の傾斜計結果と比べるとデータのバラツキが大きく、これは、設置時にセンサーを固定する杭の足元が緩んでいたため、M E M S 傾斜検知部が、同図の風速計測図 (一番下) に示すように風力などの外部力の動きを検知したことから、M E M S 素子が温度の日変化の影響を受けたことが原因と思われる。

斜面の傾斜値・伸縮値以外に、土壌水分も重要な判断指標の一つであるため、センサーに ECH20 体積含水率計を組込んだ。雨は降ると体積含水率が上昇しリアルタイムに雨量指数と土壌水分の関係を

もとめることができ、斜面崩壊の重要な判断パラメータになると考えられる⁸⁴⁾。

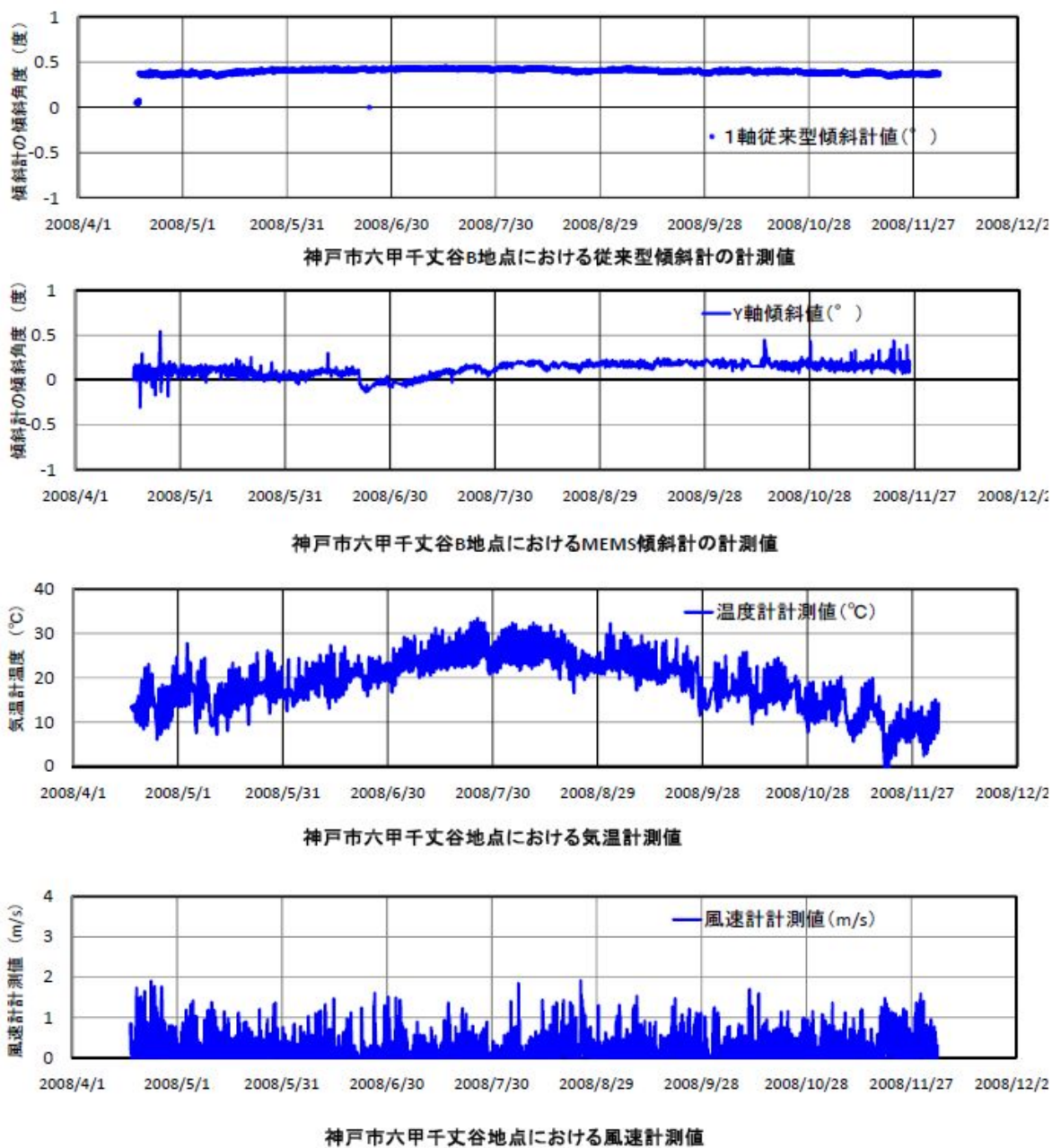


図3 - 25 各気象状況における観測結果の確認⁸⁵⁾

外部要因がセンサー性能に及ぼす影響について

図3 - 26に、平成20(2008)年5月1日からの一週間における気温と従来型1軸傾斜計で観測した結果の経時図を示す。1週間の間にMEMS傾斜計ではおよそ0.06度の変動が生じた。傾斜計値の変化は、気温変化曲線と一致しており、気温変化による影響だと考えられる。

同図のMEMS傾斜計のX軸とY軸の観測結果から、X軸とY軸値は一週間の間におよそ0.25度の変動幅があった。これは図3 - 25に示すように気温・風速の変化などの外部力による影響と思われる⁸⁵⁾。

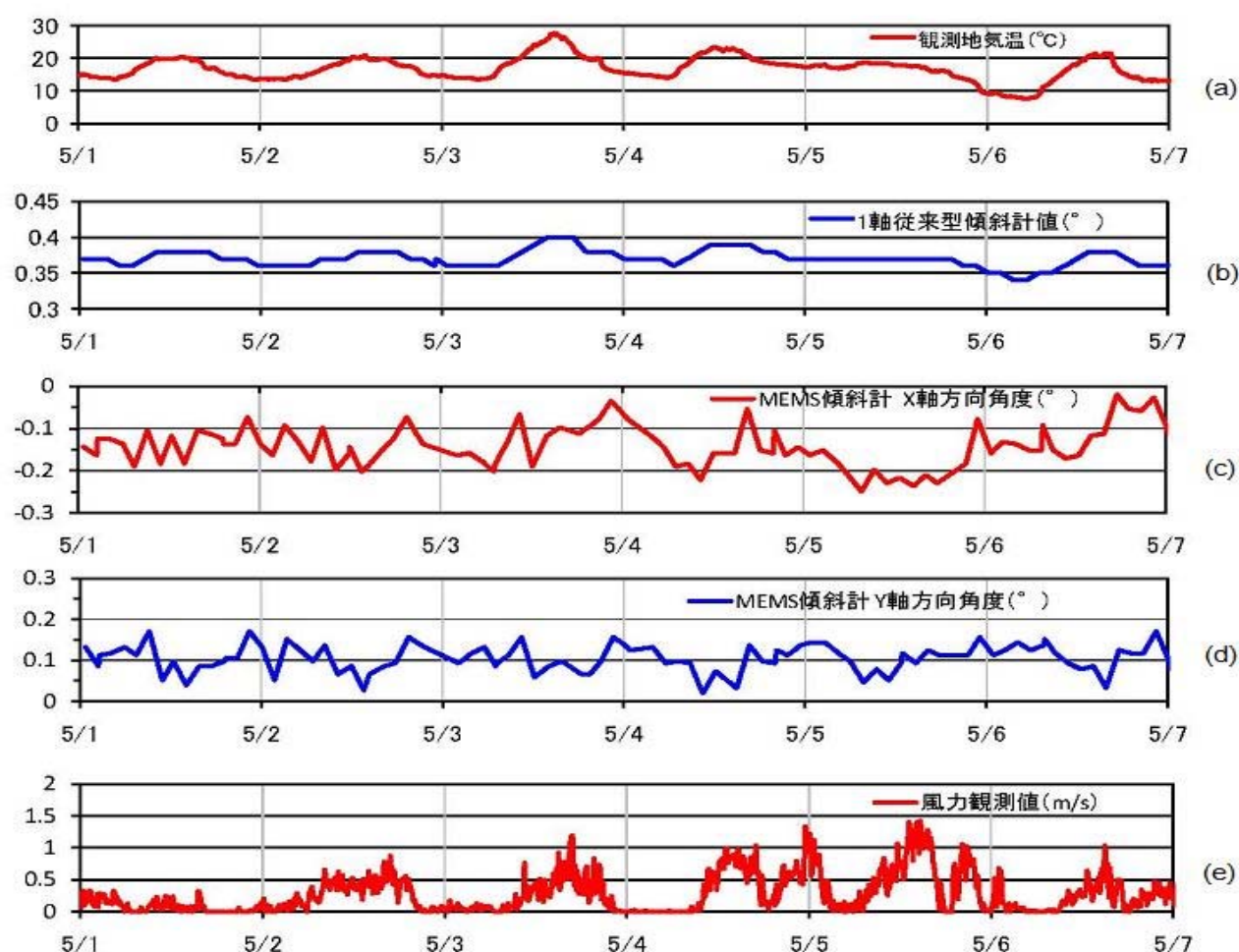


図3 - 26 各気象状況における観測結果の詳細確認⁸⁵⁾

3.3.5 まとめ

開発した斜面崩壊検知センサーについて仕様を定め、室内での温度環境変化に対する動作確認、消費電流の確認試験を行った。

次いで、屋外の自然斜面において2年半という長期間にわたり観測および耐久試験を行った。その結果、豪雨・気温の変化などの自然環境に耐えて、その後、現時点まで正常に稼働していることを確認し

ている。

体積含水率計を装着したことで、現地で降雨があったかどうかを土中水分に基づいて確認できるようになり、センサーに異常値があった場合、降雨を誘因とした斜面崩壊によるものかどうかの判断⁸⁶⁾をしやすくなった。

これまで取得したデータを分析し、長期間メンテナンスなしで容易に設置・運用可能な斜面崩壊に対する検知センサーとして、基礎的データを蓄積することができた。通信系も含めて、斜面崩壊検知センサー（子機）およびデータロガー（親機）の動作を確認できた。

3.4 小型孔内傾斜計の開発

3.4.1 開発の概要

斜面崩壊検知センサーは、斜面の表層傾斜や土壌水分のデータについて監視・収集できるが、斜面の地中深くの変位は検出の対象になっていなかった。そこで、斜面崩壊検知センサーを深度方向に連結した小型孔内傾斜計を開発した。

斜面崩壊検知センサーユニットを、深度方向にパイプ内に連続的に並べ、パイプを斜面に打ち込むことにより、斜面の動態観測をできる小型孔内傾斜計を開発した。また、地磁気センサーを内蔵することにより方位を検知できるようにした。消費電流の確認、実験地盤での動作試験、および、神戸市六甲砂防フィールドの実際の自然斜面で動作することを確認した。

小型孔内傾斜計の開発により、コーン貫入試験のように打ち込むことによって迅速に設置（60分程度）でき、地中深い地盤の挙動を監視し、地中傾斜変位の異常を検出することが可能になる。センサーユニットの駆動は乾電池のため、電力が来ていない場所でも長時間観測でき、斜面崩壊監視に活用できる。災害復旧現場における2次災害防止、工事の安全確保などにおいても適用することが可能である。

3.4.2 小型孔内傾斜計の仕様

小型孔内傾斜計は、傾斜検知部と方位検知部からなり、無線伝送部を持たず斜面崩壊検知センサーに接続してデータを無線伝送する。温度計は地中深部を計測するため斜面崩壊検知センサーより精度のよいものを用いた。なお、地中に貫入したときに傾斜角や方位角が鉛直・水平から曲がるため、初期の傾斜角と方位角から補正して設定する必要がある。現時点（平成27年1月）での仕様を以下に示す。

構成	: 傾斜検知部、方位角検知部、温度検知部
2軸傾斜計	
・型番	: SCA100T-D01 (Murata Electronics)
・検知角度 (MEMS 傾斜計)	: ± 30 度 (水平に対して)
・精度 (MEMS 傾斜計)	: 0.0025 度 (アナログ出力)
・変位計測精度 (1 ユニット)	: $\pm 0.04\text{mm}$ (1 ユニット長 = 1000mm の場合)
補正用方位角検知部	
・地磁気センサー	: デジタル・コンパスモジュール HMC6352 (Honeywell 社)
・分解能	: 0.1 度
・精度	: 1.0 度
・傾斜補正	: 次頁 (注1) 参照
温度計	
・最大動作温度	: +125
・最小動作温度	: -55
・精度	: ± 0.5
その他	
・接続できる最大ユニット数	: 16 ユニット
・消費電流	: 8.75mA Sec (1 ユニット)、140mA Sec (16 ユニット)

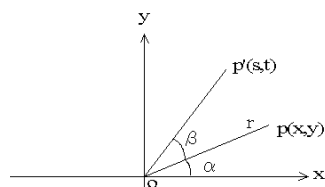
注 1) 方位角度による傾斜補正の仕方

< 座標の回転 >

A 図のように 2 次元平面上の $p(x,y)$ が直線 op の長さを一定に角度 α だけ回転し $p'(s,t)$ になった場合、

$$\begin{pmatrix} s \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos & -\sin \\ \sin & \cos \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

で表される。



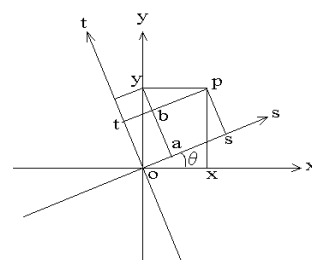
A 図：座標の回転

< 座標軸の回転 >

B 図のように座標系 $x-o-y$ にある点 $p(x,y)$ が 回転した座標 $s-o-t$ で $p(s,t)$ に変換される場合、

$$\begin{pmatrix} s \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos & \sin \\ -\sin & \cos \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

で表される。



B 図：座標軸の回転

3 . 4 . 3 小型孔内傾斜計の試作

1) 試作機の構成

直径 25mm のパイプの内部にセンサーユニットを仕込み、連続したパイプ全体を斜面地盤に貫入できるようにした。小型孔内傾斜計の概念図、および、外観を図 3 - 2 7 に、傾斜測定の位置関係、および、全景を図 3 - 2 8 に示す。計測器を打ち込むことにより簡便に設置できるため、災害発生直後から斜面に設置して動態観測を始められる。

迅速な設置を目的としており、センサーが組み込まれたパイプを打ち込むだけで、短時間に設置を完了することができる。センサーユニットに MEMS 傾斜検知部を組み込んでおり、複数のユニットを深さに応じて連結すればよい仕組みになっている。斜面地盤内の鉛直方向に等間隔で配置することで、斜面深部の 2 次災害の前兆となるような微小な変位挙動を検知することができる。センサーユニットには地磁気センサーを組み込んであり、地磁気に対するユニットの向きを正確に測定し、傾斜計のデータを補正できるようにした。各ユニットの計測データは、最上位に位置する無線付きユニットに回収され、429MHz の特定小電力無線（通信可能距離が最大 600m）でデータロガーへ送信する。距離が長い場合には、途中に中継機器を増やすことにより目的地まで通信できる。

データサーバーでは、インターネット上の Web ページでデータを閲覧できるようにする。予め定めた管理基準に従って斜面変状に関わる異常なデータや予兆を検知すると、関係者へ警報を送信できる仕組みとなっている。

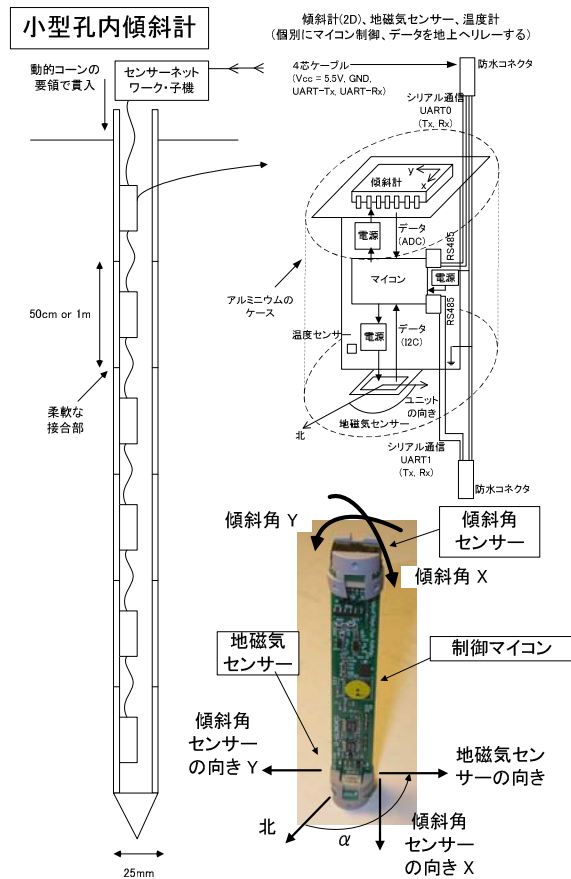


図 3 - 2 7 小型孔内傾斜計の概念図

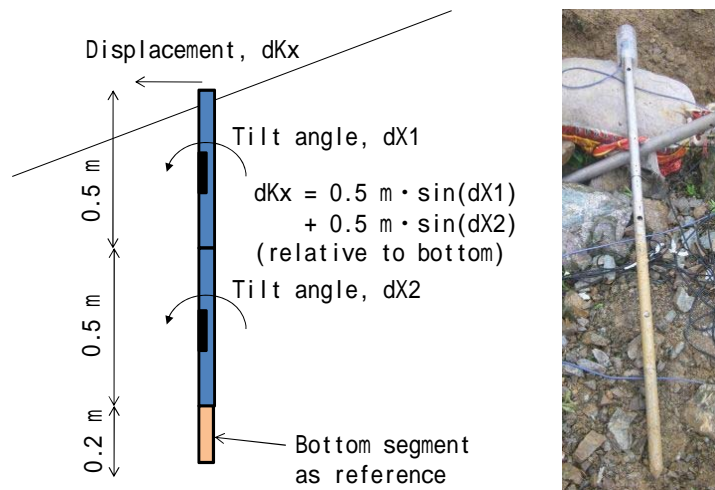


図 3 - 2 8 小型孔内傾斜計の動作 (左) と概観写真 (右)

2) 地磁気計によるセンサーの向きの検知

地盤内の傾斜変位を計測する場合、傾斜計の向きを確認する必要があり、地磁気を基準に正しい向きを向いているか確認できるようにする必要がある。ロッド内部にセンサーユニットを組み込む過程で、

ロッド接続部のネジ止めがずれる場合があることや、貫入したときにロッド自体が回転する懸念もあることから、貫入後に各ユニットがランダムな方向を向いて設置される可能性もあった。そこで、センサーユニットに地磁気計を組み込んで、設置後に各ユニットの方位を検知し、傾斜センサー計測データを補正して知りたい方向成分に変換することとした。

地磁気センサーが、地中や金属ロッドの中で正しい方位を測れることを確認するため、センサーをPVC、アルミ、スチール、ステンレスのパイプに組み込んで、ローム層の平地で地下1mに埋めて、地磁気のN極方向に対して360度回転し、地磁気センサーの出力値と比較した。図3-29に結果を示す。センサーを使用する前に、センサーの個体差を測定するキャリブレーションが必要であるが、その後は、地中で、PVC、アルミ、スチール、ステンレスの中であっても、誤差3度以内で正しい方角を検知できた。強磁性体のスチールのパイプの中では、パイプの持つ磁気の影響を強く受け、正しい方位検知ができないことがわかった。また、付近に鋼製の埋設管や矢板などがあったり、地盤が砂鉄を多く含んでいた場合、正しく測れない可能性がある。図3-29の結果から、貫入時に必要な強度と、防錆などの耐久性を考慮して、ステンレスのロッドを用いる⁸⁸⁾こととした。

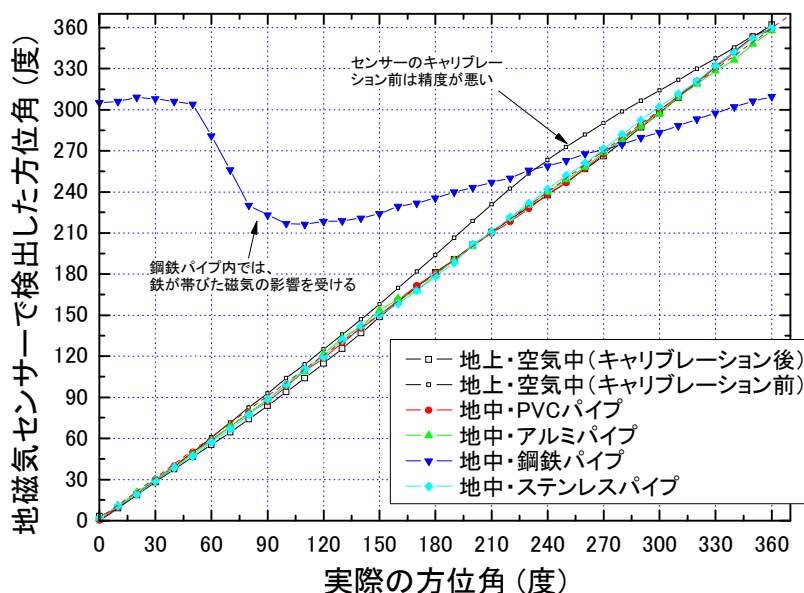


図3-29 地磁気センサーの地中性能試験

図3-27に地磁気センサーの位置を示す。地磁気センサーの向きを北から反時計回りにとしたとき、傾斜角センサーは、X方向に $-1/2$ 、Y方向に $+$ となる。それぞれの方向の傾斜角センサーの出力をX、Yとし、斜面の方向を北から反時計回りにとすると、斜面の最大傾斜方向の傾斜角は、次式で計算できる。

$$\zeta = X \sin(\alpha - \beta) - Y \cos(\alpha - \beta)$$

なお、地磁気は地球内部で発生し常に変動⁸⁹⁾している。過去360万年でN極とS極が11回逆転し、過去40年間では1.3%程度永年変化した。日本の地磁気は磁束密度で約46,000 nT（ナノテスラ）であり、東京付近で日変化は通常数10 nT程度（地磁気の強さの0.02%程度）、太陽フレアによる磁気

嵐が発生した場合で数 100 n T (同 0.2%程度) 変化する。ダム湛水の水圧変化による変化で 2~8 n T (同 0.04~0.17‰)、地震活動が活発になったとき変動は断層モデルの予測値で 10~100 n T 程度 (同 0.02~0.2%)、火山活動が活発になった場合は山体温度が上昇し磁気は弱まる、とされる。

人工物による影響としては、普通自動車 が 100m 程度の距離に近づくと 1 n T 程度 (同 0.02‰) の影響、50m まで近づくと 8 n T 程度 (同 0.17‰) の影響がある。建物では鉄の使用量によって違いがあるが、自動車と異なって建設後も影響が持続する。電車では駆動のための電流が地中に一部漏洩するため 35 k m 程度先まで地磁気観測への影響が及ぶとされる。よって、現場では近い場所に鋼製の物質が埋まっていないか、地表近くに車両などを置かないようにする必要がある。

なお、磁針方位は、東京付近で西偏 (偏角) 6 度、伏角 49 度となっており留意する必要がある。

3) 消費電力

被災現場ではほとんど電源がとれないのは一般的であり、監視システムはいかに消費電量を抑えるかが大きな課題である。開発した孔内傾斜計の消費電流測定を行った。図 3 - 3 0 に結果を示す。一回データを収集するのに必要な消費電流は、ユニット 1 段あたり 8.75 m A sec. であった。今回のシステムでは最大 16 段を接続でき、ユニットの数に比例して最大消費電流は 140 m A sec. となる。市販のアルカリ乾電池、または、小型の太陽電池で長時間の対応が可能であるとわかった⁸⁸⁾。

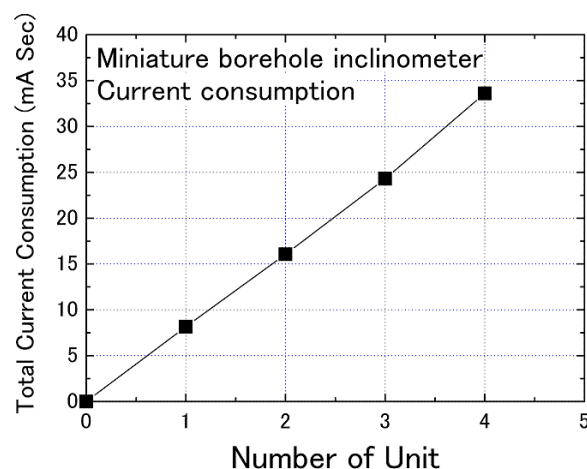


図 3 - 3 0 センサーユニットの消費試験

4) 傾斜試験

小型孔内傾斜計を、図 3 - 3 1 に示す模型地盤に埋めて、全体を傾斜させる試験を行った。傾斜計は、意図的に ≈ 40 度ほど回転した向きに設置した。小型孔内傾斜計ユニットの X 軸、Y 軸の出力は、それぞれ異なる値を示すが、上式の補正計算により、実際に近い傾斜角が得られている。

図 3 - 3 2 に示す検定試験⁸⁸⁾のように、傾斜角が大きいと誤差が大きくなるが、実際の斜面防災で観測される 100 mm / m 以下の範囲では、十分な精度が得られた。

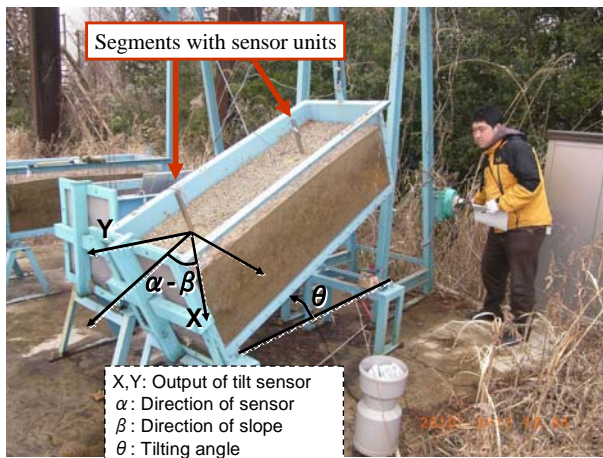


図 3 - 3 1 センサーユニットの確認試験

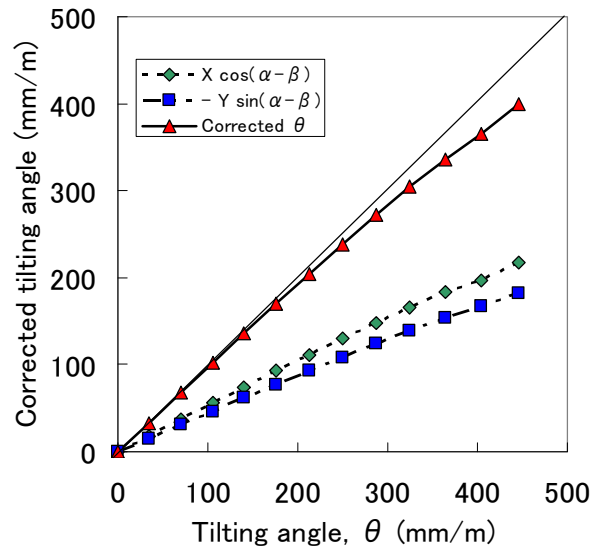


図 3 - 3 2 センサーユニットの確認結果

3 . 4 . 4 神戸市六甲砂防斜面における確認試験

1) 機器の設置

小型孔内傾斜計を神戸市六甲の斜面に設置して実証実験を行った。小型孔内傾斜計を TC 1 に設置し、データロガー（親機）を TC 1 から東南東に約 200m のところに設置し、動作を確認した。

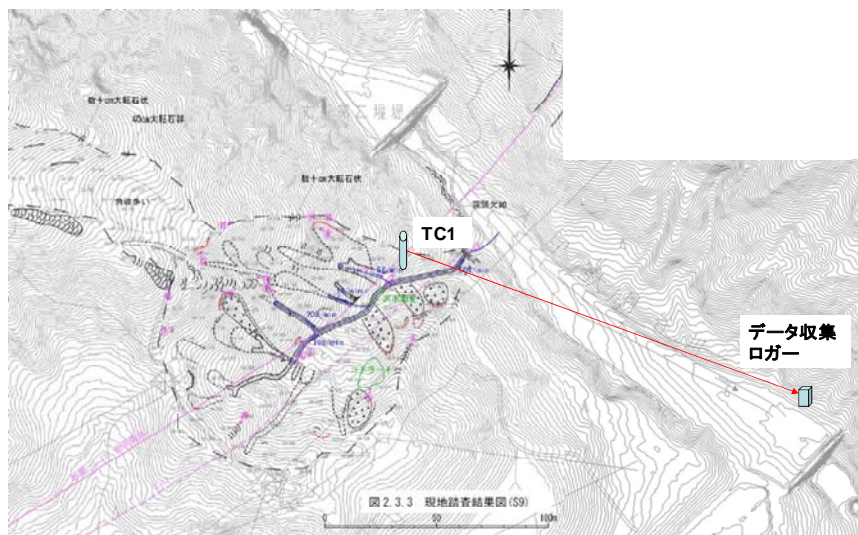


図 3 - 3 3 六甲斜面の小型孔内傾斜計の位置と周辺地形

小型孔内傾斜計の設置、運用の手順、耐久性、計測データの安定性などを確認するため、平成 22(2010)年 4 月 21 日から平成 23(2011)年 6 月 25 日までの約 1 年 2 ヶ月間(430 日間)にわたり、六甲山地東部の南斜面(S9 斜面)に小型孔内傾斜計を設置した。周辺地形と設置位置を図 3 - 3 3 に示した。

この地域は、六甲花崗岩（黒雲母花崗岩）の地質で、表層に数 10 c m ~ 3 m 程度の風化土層がある。この中で、高さ 4 m 程度の段差になっている部分の崖上に小型孔内傾斜計を設置した。

写真 3 - 1 1 に設置状況を示す。ロッドは 1 段の長さが 50 c m で、互いにネジで接続する構造になっている。内部のセンサーユニット同士の電氣的接続には 4 芯の防水コネクタを用い、その上に防水テープを巻いて保護した。写真 3 - 1 1 (b) と写真 3 - 1 2 に示すように、コーン貫入試験の要領でロッドの最上部に錘受けを取り付け、重錘を打ち付けて地盤に貫入させた。一つのロッドを最上部まで貫入したら、次のロッドを継ぎ足して、硬い地層に当たるまで繰り返した。最初の試作品ではロッド同士の接続部をステンレス製（写真 3 - 1 2 (c) ）としたため、接続部が曲がりにくかった点を付記する。

この現場は、風化の度合いが高く容易に陥入できた。1 本 50 c m のユニットを 7 段、計 3.5 m の深さまで貫入し、固い地層に突き当たったため貫入を終了した。初めての作業で試行錯誤しながらであったが、1 段について 30 分程度で貫入することができ、正味設置作業で 3.5 時間、準備も含めて 5 時間程度で設置を終了した。設置作業時は、地上のモニタリングシステム子機の代わりに、写真 3 - 1 3 に示すように P C につないで、データを監視しながら進めた。



(a) 地上のセンサー子機



(b) 設置の様子

写真 3 - 1 1 六甲斜面の小型孔内傾斜計の設置状況



(a) 全景



(b) 载荷端ロッドの先端部

(次頁につづく)



c) パイプの接続



(d) コネクタの接続と防水

写真 3 - 1 2 六甲斜面の小型孔内傾斜計の設置状況

接続台数		地磁気センサ校正					終了	
id	tag	温度	地磁気	傾斜X	傾斜Y	V5.0A		
0	X	16.25	180.8	-0.3483	-0.7502	4.37		
1	X	0.50	189.2	0.5583	34.5104	4.94		
2	X	2.25	270.9	-0.3315	-2.5398	4.30		
3	X	7.50	310.1	1.4307	-2.2881	4.36		
4	X	7.75	27.2	0.2366	-1.3085	4.32		
5	X	8.00	63.8	0.4085	-0.4711	4.88		
6	X	9.00	132.3	-0.6108	0.8898	4.33		
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								

写真 3 - 1 3 小型孔内傾斜計のデータの読み取り画面例

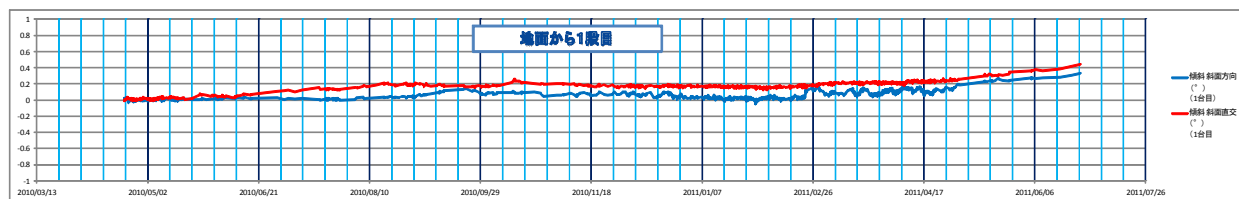
2) 計測結果

表 3 - 1 0 に各ユニットの深さと傾斜角度の初期値を示す。この後、1 年 2 ヶ月間計測した結果、各段において、図 3 - 3 4 に示すような変位を観測した。それらの累積値をまとめた結果、図 3 - 3 5 に示すような変位を確認した。

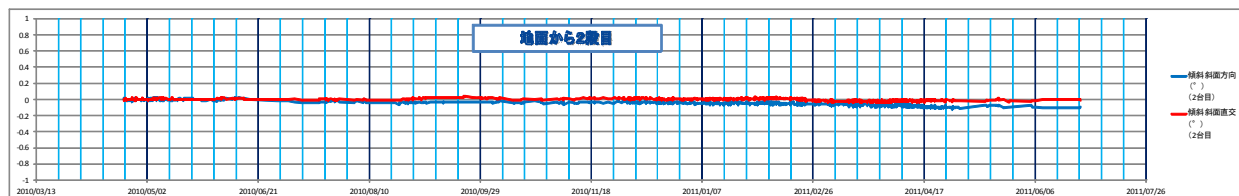
温度については図 3 - 3 6 に示すような季節的な変動を確認した。この結果、小型孔内傾斜計が実斜面で実際に機能することを確認できた。

表 3 - 1 0 小型孔内傾斜計ユニット各段の初期状態

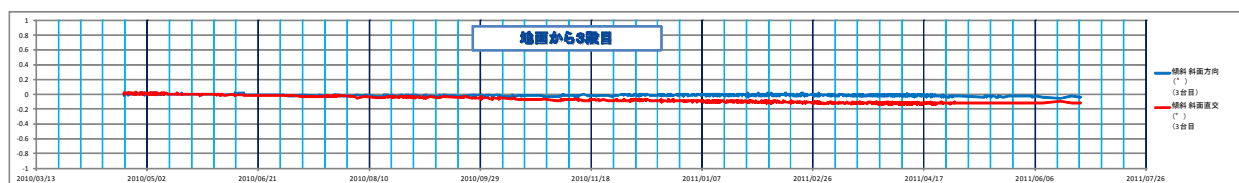
傾斜 斜面方向 角度(度)	傾斜 斜面直交 角度(度)	傾斜 斜面方向 変位(mm)	傾斜 斜面直交 変位(mm)	地面から 深さ(mm)
0.330442005	0.444645196	1.783789099	-0.157478742	0
-0.091797073	-0.019846273	-1.099861389	-4.037740077	500
-0.039414246	-0.116844265	-0.298780801	-3.864548672	1000
-0.026487741	-0.057057899	0.045173384	-2.844890106	1500
0.051706655	-0.174613232	0.27632253	-2.346966002	2000
-0.020042426	-0.109848142	-0.174903159	-0.823178092	2500
0	0.015518881	0	0.135427789	3000
0	0	0	0	3500



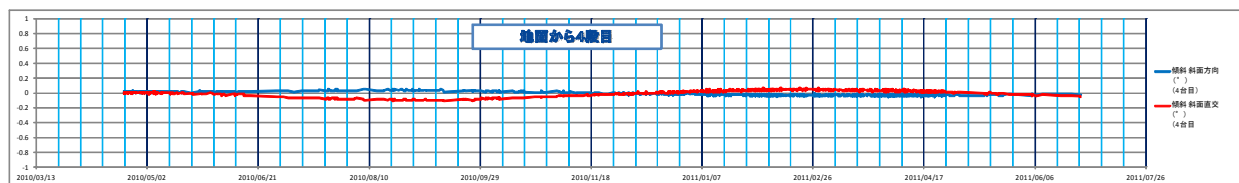
(a) 地表面から 1 段目



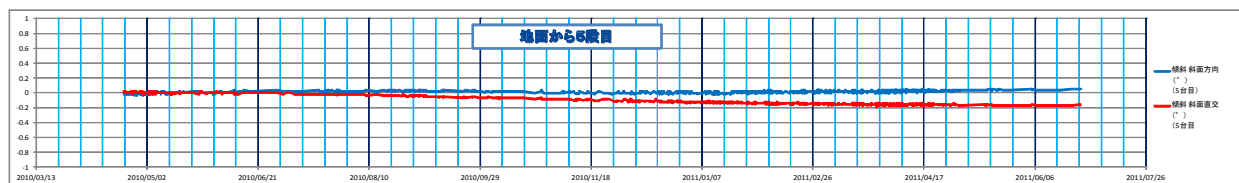
(b) 地表面から 2 段目



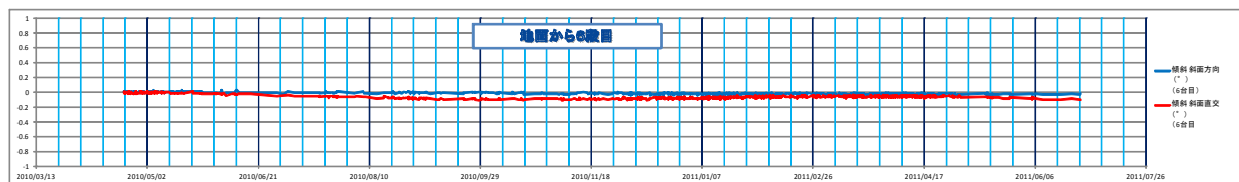
(c) 地表面から 3 段目



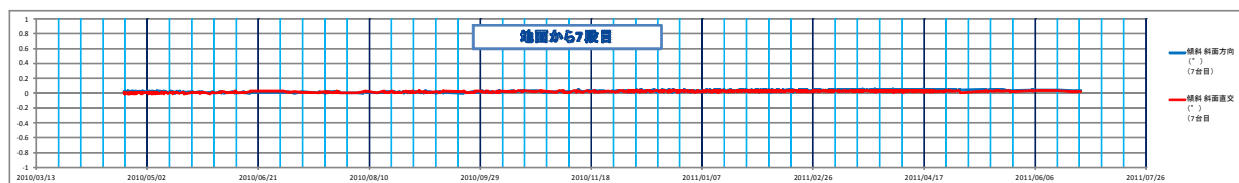
(d) 地表面から 4 段目



(e) 地表面から 5 段目



(f) 地表面から 6 段目



(g) 地表面から 7 段目

図 3 - 3 4 各ユニットの 2 軸方向傾斜角度における一年間計測結果

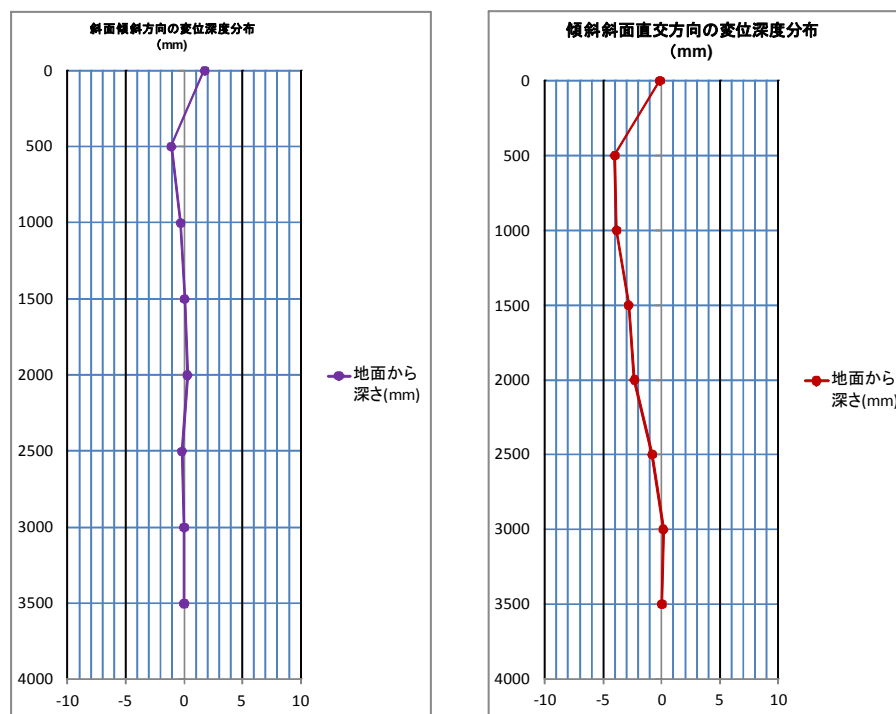


図 3 - 3 5 地表変位深度分布図

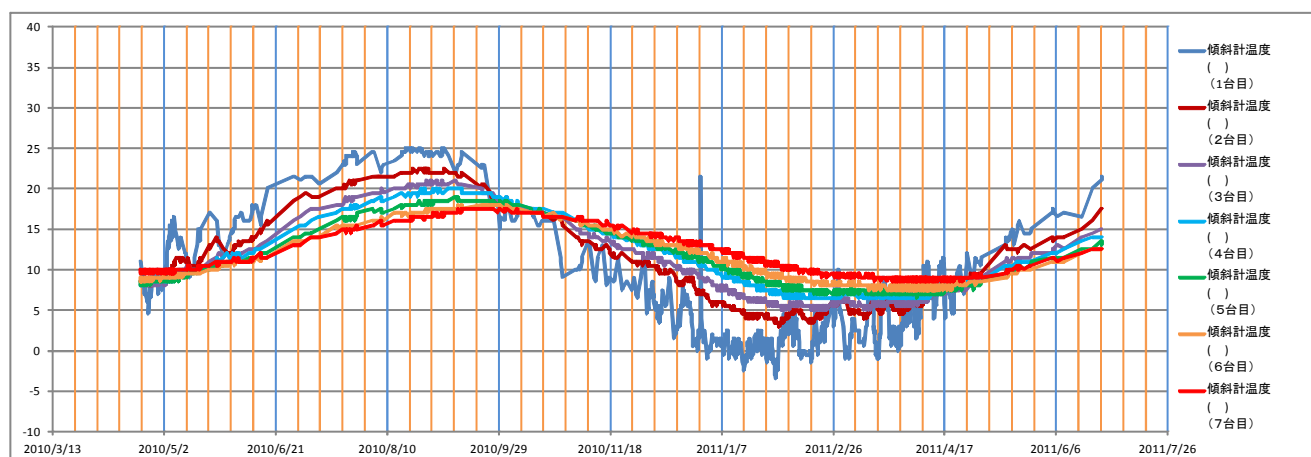


図 3 - 3 6 各ユニットの温度変化

3 . 4 . 5 まとめ

斜面崩壊検知センサーを深度方向に連結した小型孔内傾斜計を試作し動作を確認した。設置は、コーン貫入と同様に地中に打ち込むだけのため、1 ユニットあたり 30 分程度で迅速に完了できた。最大消費電流は 140mA で、市販のアルカリ乾電池や小型の太陽電池で長時間の稼働が可能であり、センサーを最大 16 ユニット接続できる。また、地磁気センサーを内蔵し方位を誤差 3 度以内で正しく計れ、方位補正できた。小型孔内傾斜計について、実地のフィールドで動作確認を行った結果、電源がない被災地でも乾電池だけで長時間対応でき、災害復旧現場における 2 次災害防止や迅速な復旧工事に活用できる見通しを得ることができた。

4．実証実験

4．1 概要

3章において仕様を設定し試作・動作確認を行ったデータロガー、斜面崩壊センサー、小型孔内傾斜計について、日本および中国の実際の現場において実証実験を行った。表4 - 1に、これまで行った長期動作確認試験、および、実証実験を時系列で示し、それらについて記載した章を示した。

全ての実証実験においてデータロガー（親機）～斜面崩壊検知センサー（子機）間のデータ転送は無線通信で行った。中国では中国国内の通信法制上の制約から、データロガーで蓄積したデータはSDカードに保存し、定期的にSDカードから回収した。また、小型孔内傾斜計は、中国・都江堰市の2つの現場で実験を行った。

表4 - 1 実証実験の概要

No.	章	国	設置場所	設置目的	年月	期間	早期警報システム				備考 他の機器
							データロガー	斜面崩壊検知センサー	小型孔内傾斜計	センサーノード	
1	3.3.4	日本	兵庫県神戸市六甲山千丈谷、芋川谷	長期動作確認試験（斜面崩壊検知センサー）	平成20(2008)年4月～22年10月	2年半	2	8 (千丈谷5) (芋川谷3)	—	—	現在も継続
2	4.4	中国	重慶市万州地区三峡ダム湖岸晒网坝地すべり地	実証実験（ダム湛水時）	平成20(2008)年10月～22年10月	2年間以上	1	3	—	—	
3	4.5	日本	福岡県冷水峠国道脇崩壊斜面	実証実験（2次災害防止）	平成21(2009)年8月～11月	約3ヶ月間以上	1	3	—	—	
4	3.4.3	日本	兵庫県神戸市六甲山東部斜面	長期動作確認試験（小型孔内傾斜計）	平成22(2010)年4月～23年6月	1年2ヶ月（430日間）	—	1 (通信用)	1 (0.5mx7段)	—	
5	4.7	日本	山形県酒田市高規格道路工事切土掘削法面	実証実験（工事安全管理）	平成22(2010)年8月～12月	4ヶ月以上	1	3	—	—	
6	4.3	中国	四川省都江堰市塔子坪地区地すべり斜面	実証実験（小型孔内傾斜計）	平成22(2010)年10月～11月	約1ヶ月（26日間）	—	—	1 (1mx12段)	—	
7	4.2	中国	四川省都江堰市虹口・塔子坪地区地すべり斜面	実証実験（人工降雨実験）	平成23(2011)年6月29日～30日	2日間	1	4	2 (0.5mx2段)	—	伸縮計2、体積含水率計2など
8	4.6	日本	福岡県田川郡添田町国道脇崩壊斜面	実証実験（2次災害防止）	平成23(2011)年7月～11月	4ヶ月以上	1	3	—	—	伸縮計3、孔内傾斜計4など
9	5.4.2	日本	埼玉県秩父市道路掘削工事法面	実証実験（工事安全管理）	平成26(2014)年2月～5月	3ヶ月以上	1	5	—	—	
10	3.2.5	日本	高知県黒島谷川砂防工事斜面	長期動作確認試験（センサーノード）	平成26(2014)年11月～31月	約3ヶ月（100日間）	1	4 (※)	—	4 (※)	(※)子機と孫機の兼用機1を含む

: 日本で実施
 : 中国で実施
 : 実証実験

4.2 中国・都江堰市における斜面崩壊実験による検証

4.2.1 実験の概要

平成 23 (2011) 年 6 月 29 日～30 日の 2 日間にわたり、中国・四川省都江堰市の虹口・塔子坪地区の地すべり斜面下部で、人工降雨による斜面の崩壊実験を行い、小型孔内傾斜計、斜面崩壊検知センサーを含む各種のセンサーを設置してその挙動を計測し比較した。写真 4 - 1 に現地の様子を示す。ここでは、主に斜面の変位、傾斜に関する測定結果について検討し、小型孔内傾斜計などの性能を比較評価した。



(a) 実験現場の全景



(b) 人工降雨の様子

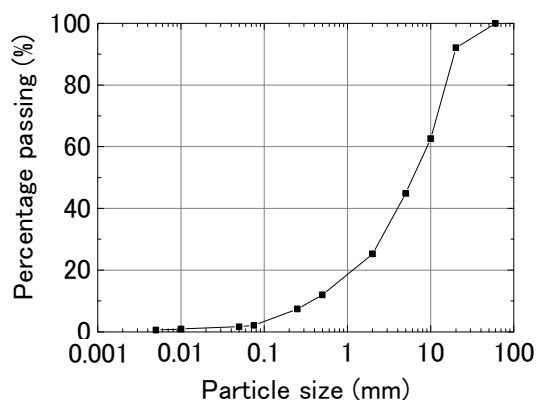


(c) 人工斜面下部の状況

写真 4 - 1 小型孔内傾斜計の概念図

4.2.2 実験箇所と機器設置

実験箇所は、周囲より局所的に、幅 3m、高さ 1.5m 程度高く盛り上がった尾根部分であり、斜面の傾斜角は約 18° である。土性は図 4 - 1 に示すように細粒分を含む砂礫土であり、一部に、崩壊の過程で、写真 4 - 1 (c) に見られるような最大 50 cm 程度の巨礫が複数出てきた。図 4 - 2 の貫入試験結果 (N_s 値) が示すように、風化安山岩斜面の崩落土が緩く堆積した場所である。



Natural water content = 9.1 %

Specific gravity = 2.492

With natural water content:

$c = 18.2$ kPa, $\phi = 23^\circ$

With saturation:

$c = 11.2$ kPa, $\phi = 16^\circ$

Permeability = 0.00011 m/s

Properties of material (< 100 mm) of the slope for artificial rainfall test.

図 4 - 1 実験場所の粒度試験結果

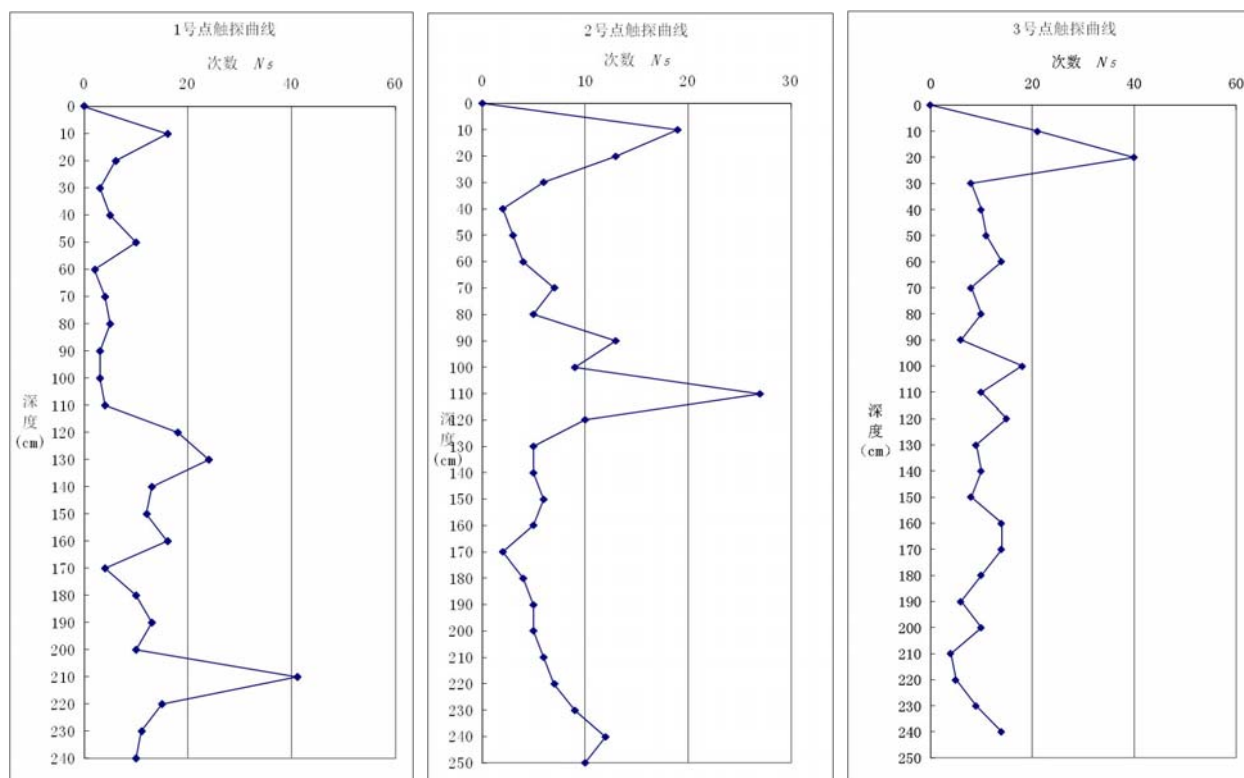
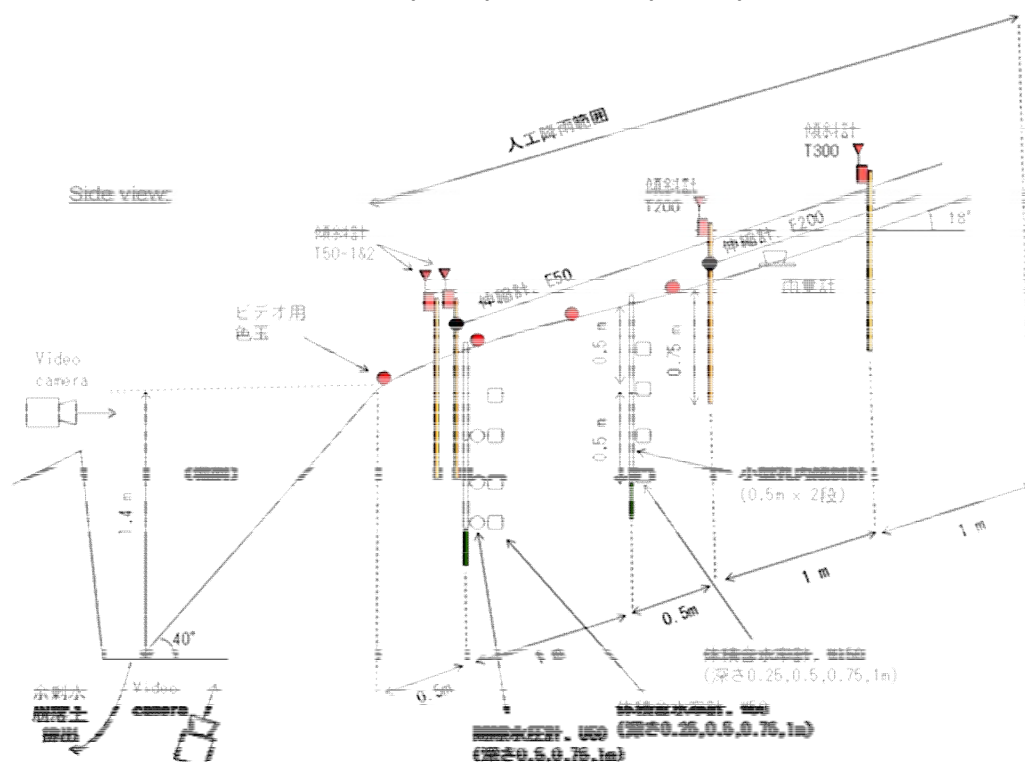


図 4 - 2 実験箇所の地盤特性 (N_s 値)

図4 - 3に示すように、幅 1.5m、長さ 4 mの範囲に、人工降雨装置を設置した。また、降雨範囲の下端部を、深さ 1.4m(ただし 1 日目は 1.0m)、傾斜角約 40 度で掘削して、斜面の不安定化を図った。小型孔内傾斜計は、斜面の下端から 50 cm (K 50)、150 cm (K 150) の位置に設置した。



(a) 横断面



(b) 平面図

図4 - 3 斜面と人工降雨範囲および計測器の配置状況

小型孔内傾斜計は、図4-4に示すように0.5m×2段の構成とし、さらに最下端に20cmのダミーロッドを接続して、これを不動点と仮定して、深さ0.5m、および、地表面近くの水平変位を測定する構成にした。ロッド間の接続方法は、試作段階の方法をさらに改善して、互いのロッドの内側に薄肉アルミ管を挿入してリベットで固定することで、薄肉アルミ管を介して上下をつなげる仕組みとした。薄肉アルミ管は、ある程度の曲げ力を加えると図4-5の写真のように変形しやすいので、ここがヒンジとなり、ロッドは剛体として回転する。また、薄肉アルミ管がロッドの内側に装着するため、ハンマーで地盤内にロッドを打ち込むことが可能である。ただし、地中に礫がある場合など、数回打ち直す場合があるので、直径が等しい簡易動的コーンをはじめに打ち込んだ後に、同じ穴に小型孔内傾斜計を挿入した。

また、図4-3(b)に示すように、斜面下端から0.5mの位置の両脇に2箇所(T50-1および2)、2m、3mの位置に各1箇所(それぞれ、T200、T300)、傾斜計(斜面崩壊検知センサー)を設置した。図4-6のように斜面崩壊検知センサーの鋼杭は、斜面に深さ0.75mまで挿入した。T50-2とT200については、地表から0.2mの位置に伸縮計(それぞれE50、E200、図4-3(a))を接続し、斜面崩壊検知センサーで測った傾斜角と、伸縮計で測った変位量とを比較することにした。

その他、斜面下端から0.5m、1.5m地点の深さ0.25m、0.5m、0.75m、1mに体積含水率計を埋設した。斜面下端から0.5mの地点の深さ0.5m、0.75m、1mにサクション測定用のセラミックカップをつけた間隙水圧計を埋設した。人工降雨範囲の中央部には、雨量計を設置して全体の降雨量を知る目安とした。計器類の全体的配置を図4-3(a)(b)に示す。

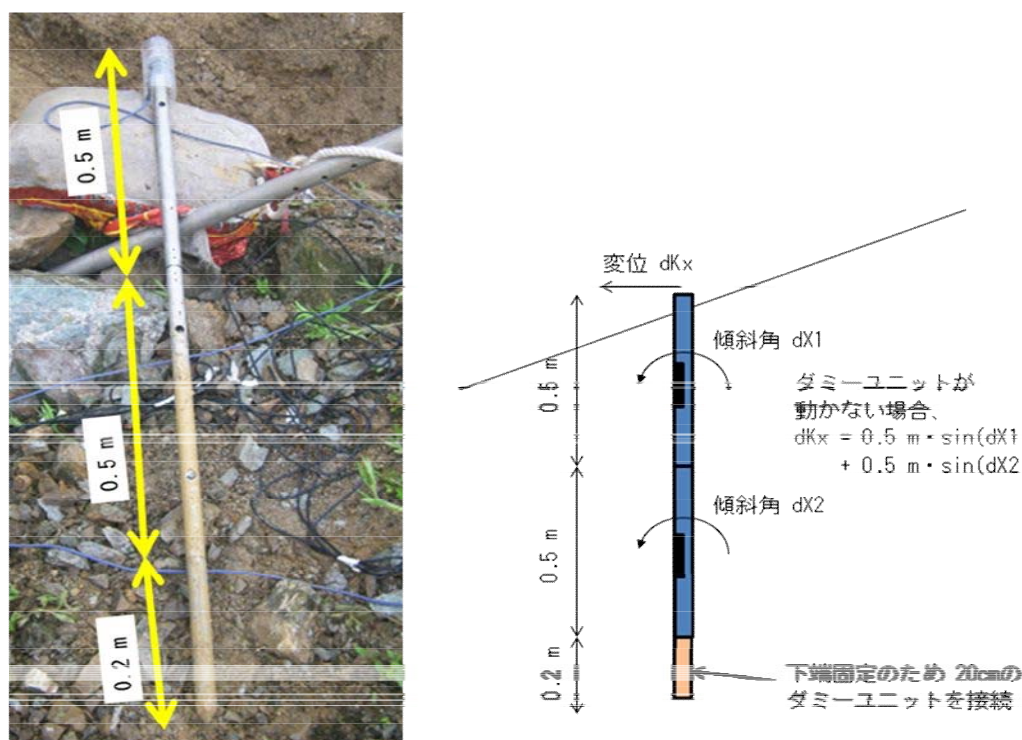


図4-4 小型孔内傾斜計の設置状況



図 4 - 5 小型孔内傾斜計のロッドの接続



写真 4 - 2 小型孔内傾斜計の設置の様子

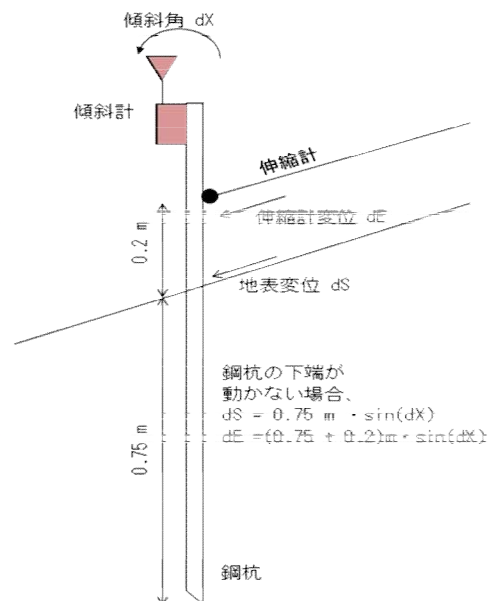
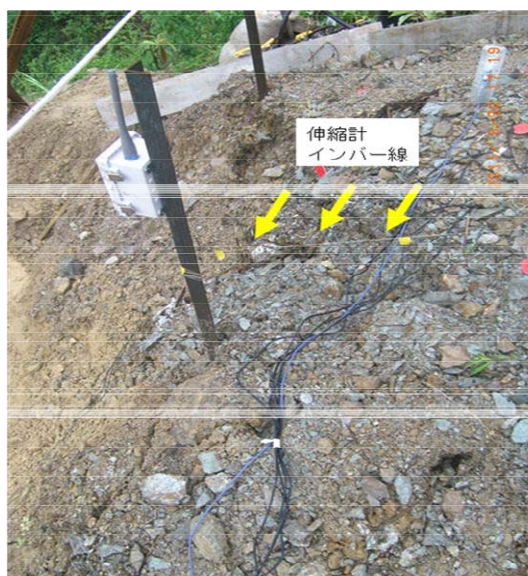


図 4 - 6 傾斜計（斜面崩壊検知センサー）の設置状況

4.2.3 人工降雨試験結果

1) 人工降雨と崩壊の状況

平成 23 (2011) 年 6 月 29 日 11 時半頃～16 時過ぎ、および、翌日 30 日 9 時頃～17 時過ぎまで (いずれも中国時間) の 2 日間にわたって、人工的に降雨を降らせた。この状況を図 4 - 7 に示す。2 日目には、自然の雨も断続的に降ったため、降雨量はそれも含んだものとなっている。

1 日目は、斜面下端の掘削深さを 1 m として、時間雨量に換算して 100～120mm/h、総雨量で 510mm の雨を降らせたが、斜面は変位しなかった。そこで、2 日目は、掘削深さを 1.4m まで掘り下げ、1 時間累積雨量で約 200mm から最大 292mm、総雨量で 649mm (2 日間累積では 1159mm) の雨を断続的に与えた。すると、盛土下端から掘削部分が崩落し、上方へ向かって進行的な崩壊が進んだ。斜面下端の掘削範囲が V 字状で空間が狭く、崩落した土砂で埋まると崩落面を支えてしまうので、適宜、取り除いた。その除去作業のタイミングも図 4 - 7 に併記した。

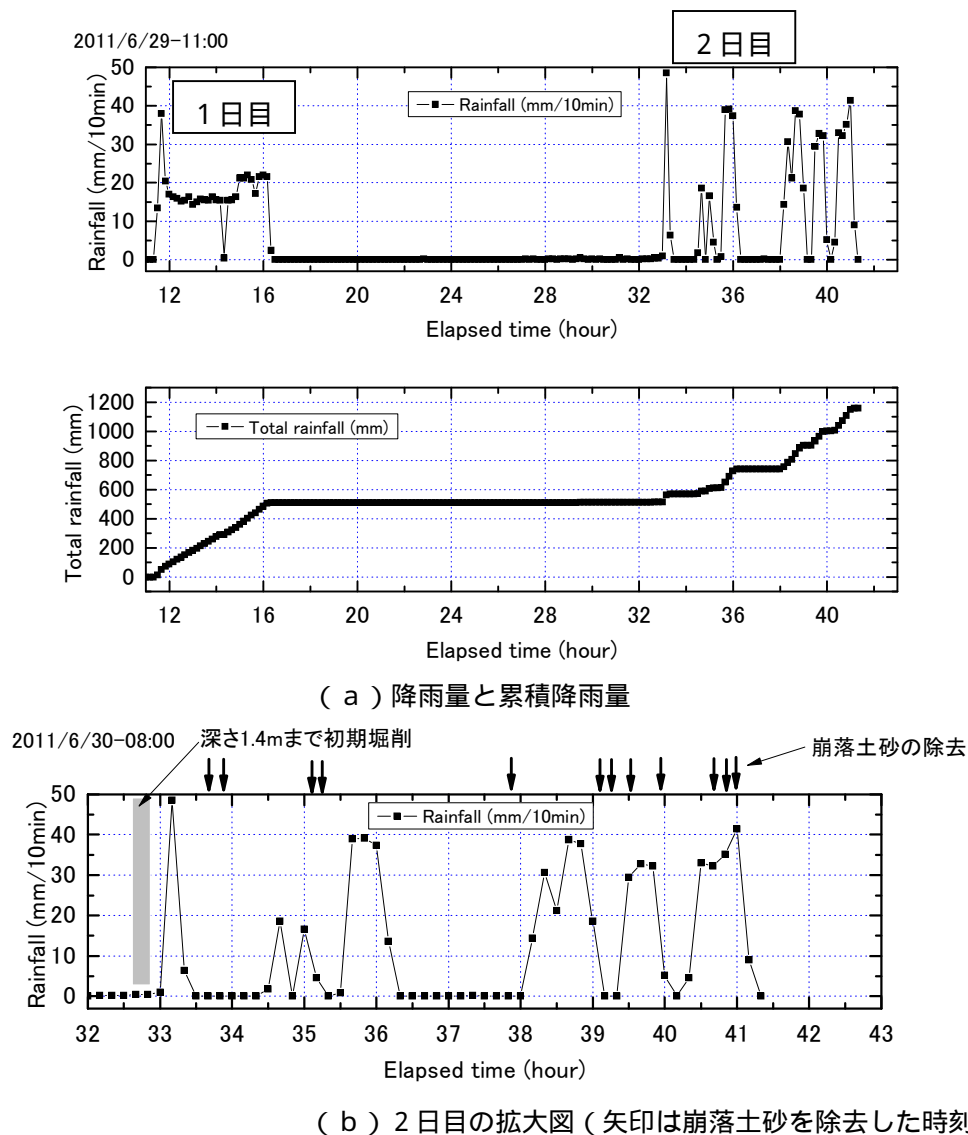


図 4 - 7 斜面崩壊実験の降雨量の記録

図4 - 8に実験終了時の最終の崩壊範囲、写真4 - 3 (a) ~ (i) に時間経過順に崩壊の様子を示す。透水性の高い土質のため、降雨は速やかに浸透し排水されたので、崩落を起こすには大きな降雨強度を与える必要があった。2日目は、自然の雨も降って、人工降雨範囲以外の部分も吸水したことも、崩落を起こす要因になった可能性がある。崩落が始まると、斜面下端の崩落面は多量の水を含み、ふかふかした状態になり、一部に水が浸み出していた。降雨は地中に浸透し、表層流は少なかったため、下端からの崩落は流水による浸食ではなく、吸水による土の強度低下と重力の作用によるものである。

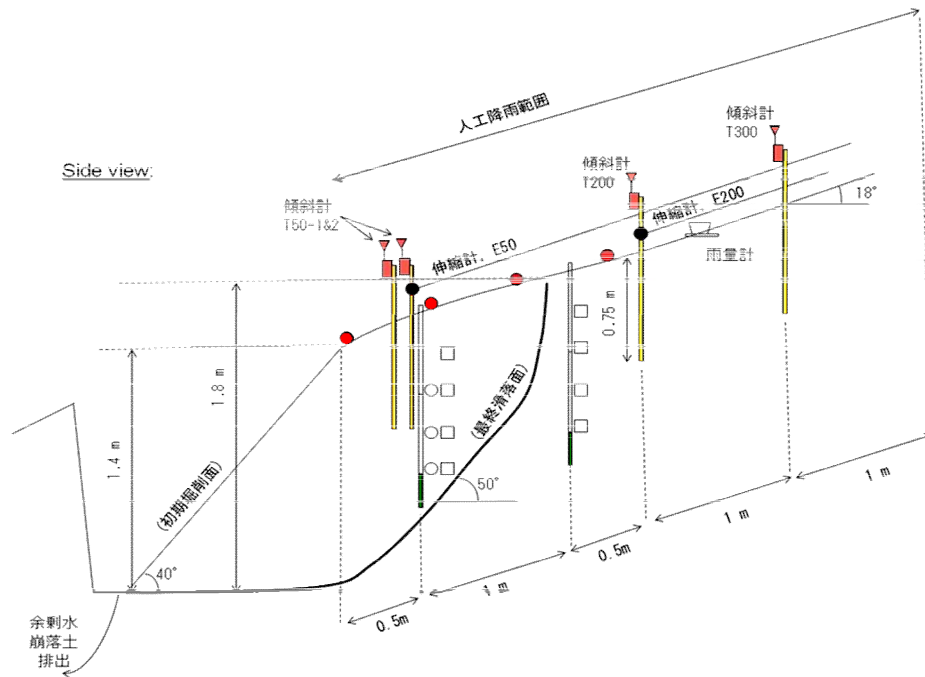


図4 - 8 実験終了時の崩壊範囲



(a) 6月30日9時7分 (32.12 時)
(2日目降雨開始)



(b) 6月30日9時10分 (32.17 時)

写真4 - 3 斜面崩壊の経過
(時刻は中国時間、カッコ内は累積時間)
(次頁につづく)



(c) 6月30日 11時 1分 (35.02 時)



(d) 6月30日 13時 53分 (37.88 時)
(崩落土砂の除去)



(e) 6月30日 16時 17分 (40.28 時)
(K50 はすでに倒壊、T50-1 と T50-2 も傾斜)



(f) 6月30日 16時 19分 (40.32 時)
(T50-1、T50-2 地点に滑落崖が来る)



(g) 6月30日 16時 42分 (40.70 時)
(T50-1 が大きく傾く)



(h) 6月30日 16時 54分 (40.90 時)
(T50-2 が滑落、滑落崖は K150 の手前まで来る)



(i) 6月30日 17時 19分 (41.32 時)
(実験終了)

写真 4 - 3 斜面崩壊の経過
(時刻は中国時間、カッコ内は累積時間)

2) 小型孔内傾斜計の変位

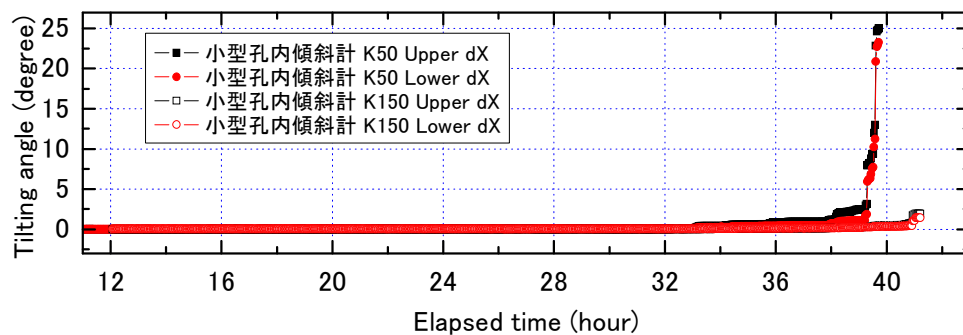
図4-9～図4-11に、小型孔内傾斜計で測定された斜面の変位の経過を示す。図4-9は降雨を与えた2日間のデータ全体を示したものの、図4-10は斜面に変動のあった2日目について拡大し降雨強度のデータを併記したもの、図4-11は変動初期の小さな動きまで見えるようにしたものである。

dXの動きを見比べると、傾斜の向きはほぼ斜面下方を向いている。2日目(6月30日)の降雨開始は午前9時過ぎ(図では時刻33hour以降)だったが、図4-11によれば、下端から50cmの小型孔内傾斜計K50は、これよりも早く動き出している。これは、2日目の降雨開始前に斜面下端部を1.4mの深さまで堀削する作業を行っており、その影響で斜面がわずかに緩んだことに対応していると考えられる。下端から150cmの小型孔内傾斜計K150には堀削時の影響は見られないが、降雨開始以後からわずかな変位⁹⁰⁾を示している。

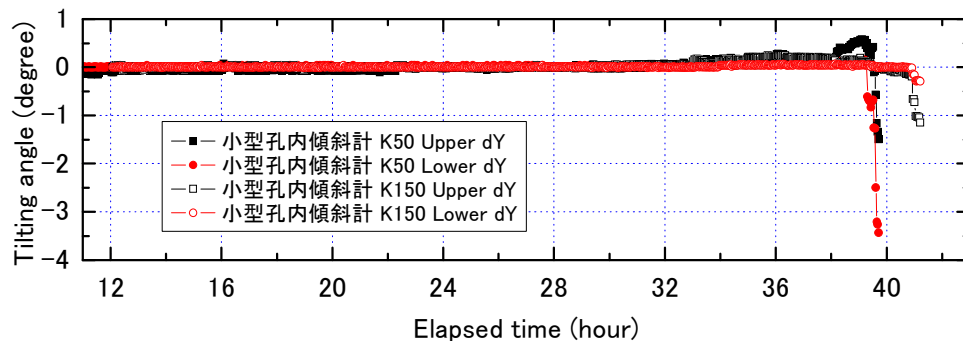
その後、降雨強度の推移に応じてそれぞれ変位が進行した。図4-4のように、小型孔内傾斜計は、深さ50cmごとに2つのユニットで傾斜を測っているが、斜面下端から50cmのK50は、上段のユニットの方が、下段のユニットより大きく傾斜しており、斜面の表層部がより多く変位する変形パターンになっている。これに比べると、斜面下端から150cmのK150は、上下のユニットがほぼ同じ値を示しながら傾いており、深さ1mまで一様なせん断変形が進んだと解釈できる。

実験終了時には、下端から150cmの小型孔内傾斜計K150の手前まで崩落が進んだ。図4-10にみられるように、時刻40～41hour(6月30日17時頃)には崩落がK150近くまで進み、傾斜が急速に進んだものとみられる。

2011/6/29-11:00



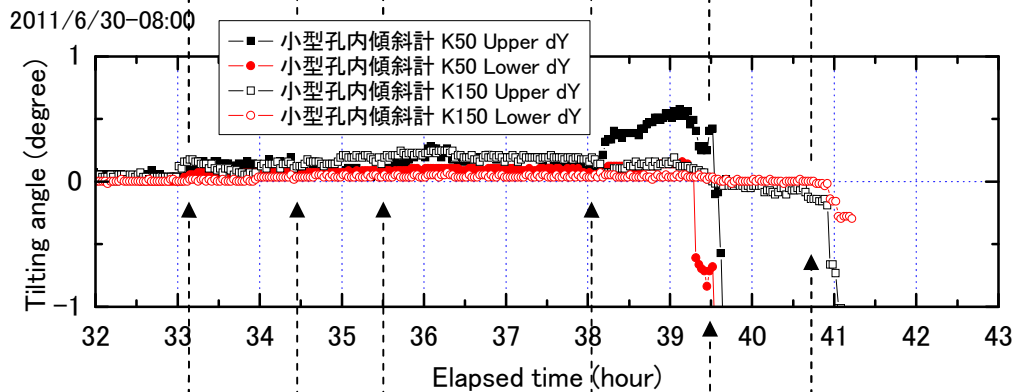
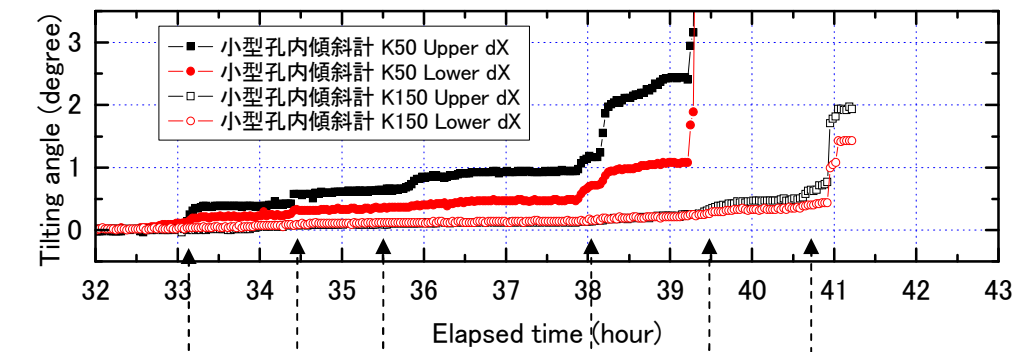
2011/6/29-11:00



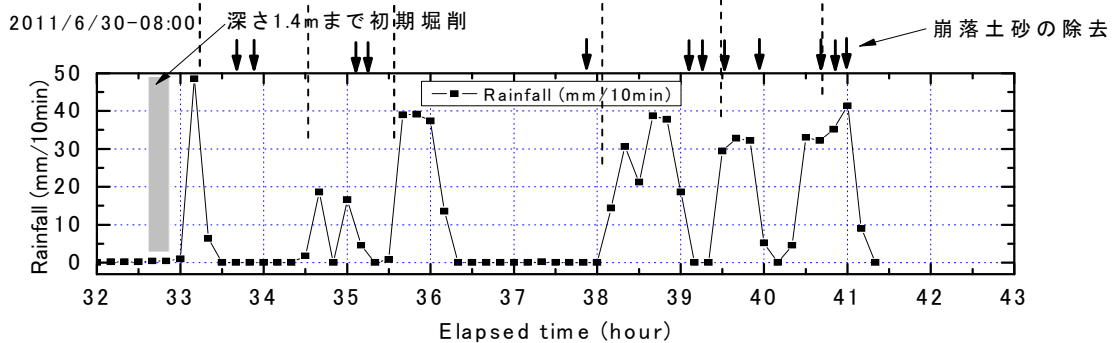
注) K50: 斜面下端から 50cm、	K150: 下端から 150cm、
Upper: 上段の深さ 50cm のユニット、	Lower: 下段の 50cm のユニット
dX: 斜面下方向への傾斜が正、	dY: 斜面下方に向かって右手側への傾斜が正

図4-9 小型孔内傾斜計の計測データ

2011/6/30-08:00



(a) 小型孔内傾斜計の変位



(b) 降雨記録

注) K50: 斜面下端から 50cm
 K150: 下端から 150cm
 Upper: 上段の深さ 50cm のユニット
 Lower: 下段の 50cm のユニット
 dX: 斜面下方向への傾斜が正
 dY: 斜面下方に向かって右手側への傾斜が正

図 4 - 1 0 小型孔内傾斜計の計測データ
 (2 日目のみ、縦軸も拡大、降雨記録も併記)

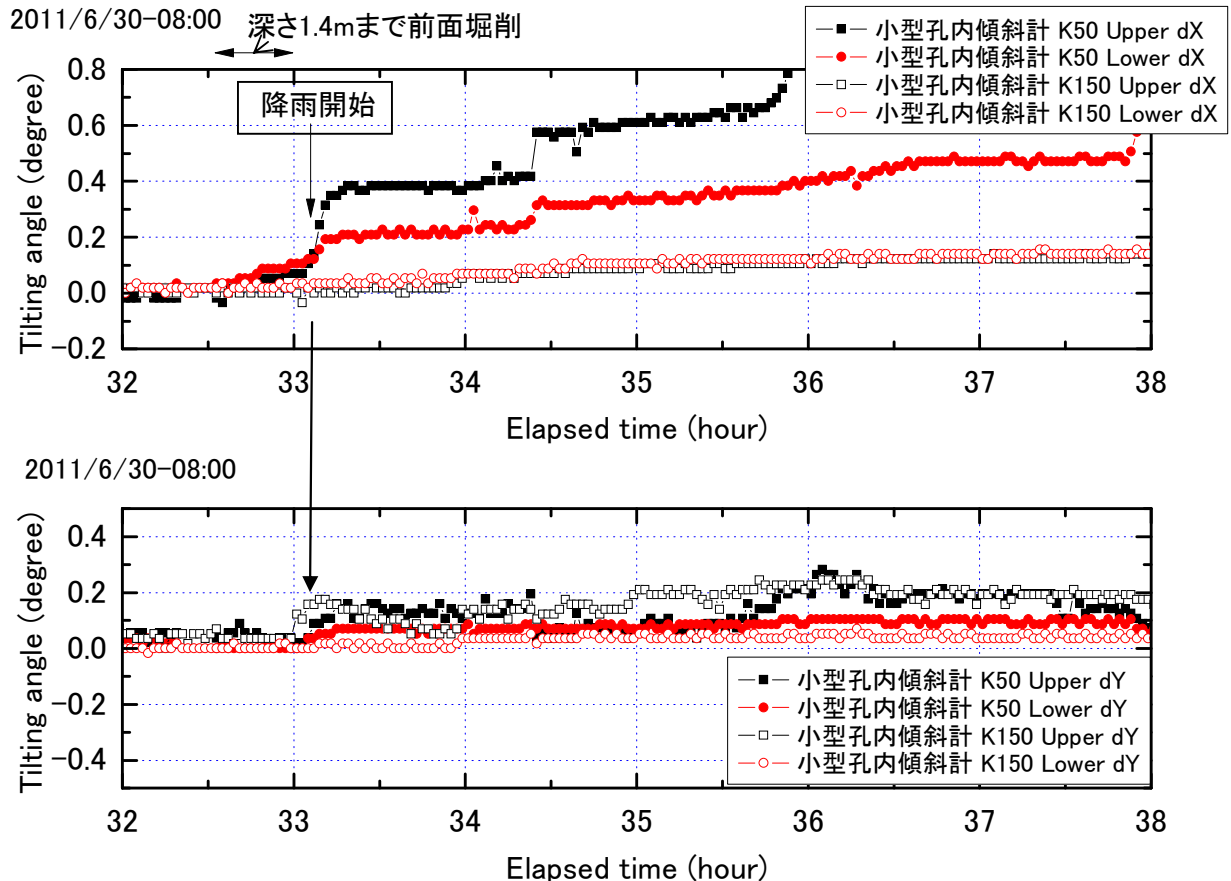


図4 - 1 1 小型孔内傾斜計の計測データ（2日目の降雨初期の拡大図）

3) 斜面崩壊検知センサーの変位

図4 - 1 2 ~ 図4 - 1 3に、斜面崩壊検知センサー(傾斜計)で測定された斜面の変位の経過を示す。図4 - 2 - 1 2は降雨を与えた2日間のデータ全体を示したものの、図4 - 1 3は斜面に変動のあった2日目のみを示したものである。図中のT50 - 1とT50 - 2は、斜面下端から50cmのセンサーで、それぞれ斜面の右側、左側にある。T200は下端から200cm、T300は下端から300cmの傾斜計で、それぞれ斜面の中央付近に位置している。図中のdXは斜面下方向への傾斜を正としたもの、dYは斜面下方へ向かって右手側への傾斜を正としたものである。

各センサーは、図4 - 6のように、深さ0.75mまで打ち込んだ鋼杭に取り付けているので、測られる傾斜角は、この深さの平均的なせん断ひずみに対応すると考えられる。上述の小型孔内傾斜計と同じく、傾斜変位は斜面下方向(dX)が卓越している。

斜面下端から50cmのT50 - 1とT50 - 2には、2日目(6月30日)の降雨開始前の堀削作業(時刻で32.5~33時の間)の影響も見られる。T50 - 2は、dY軸の斜面下方へ向かって右手側(+側)への傾斜の方が卓越しているが、これはT50 - 2の位置が斜面の左手側に位置していることが原因だろう。

斜面下端から200cm、300cmのT200、T300は、T50 - 1および2に比べて傾斜変位は非常に小さいが、T200は、2日目の降雨中に斜面下方へ0.2度程度傾斜している。

2011/6/29-11:00

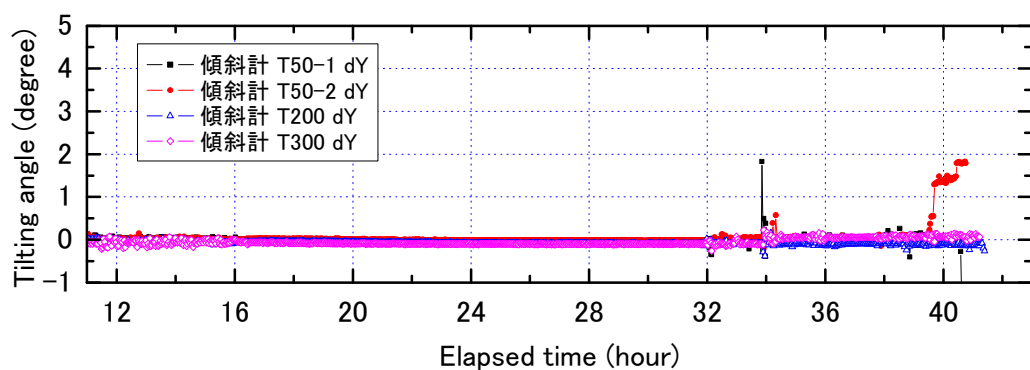
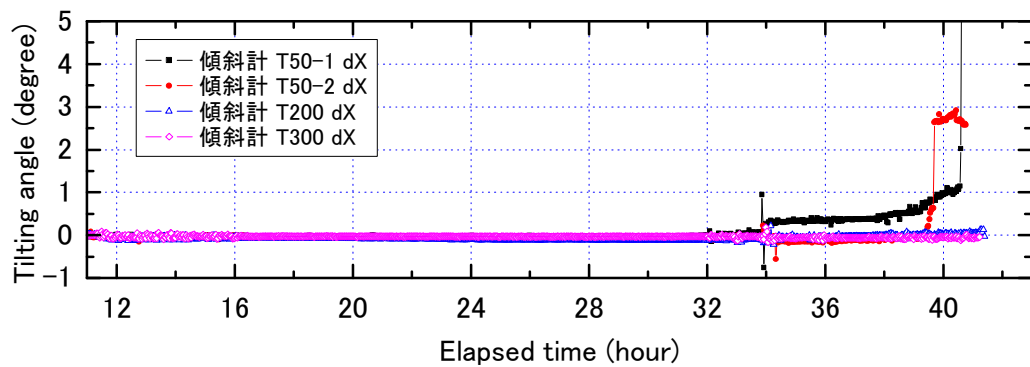


図 4 - 1 2 傾斜計の計測データ（全体）

2011/6/30-08:00

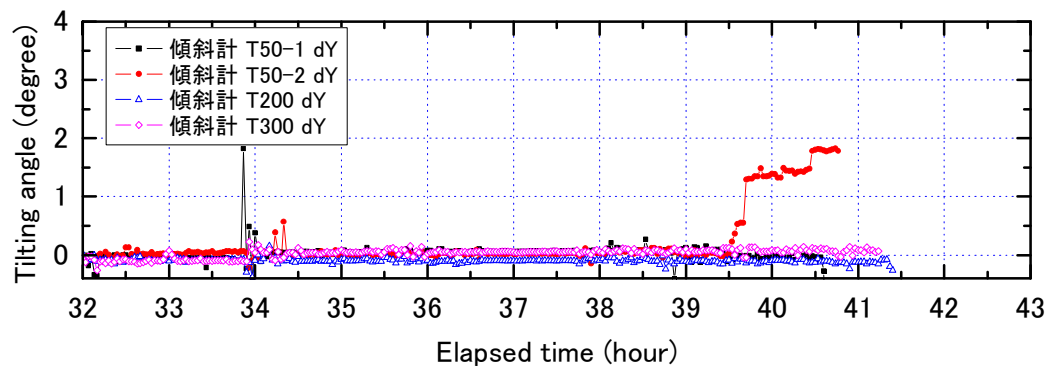
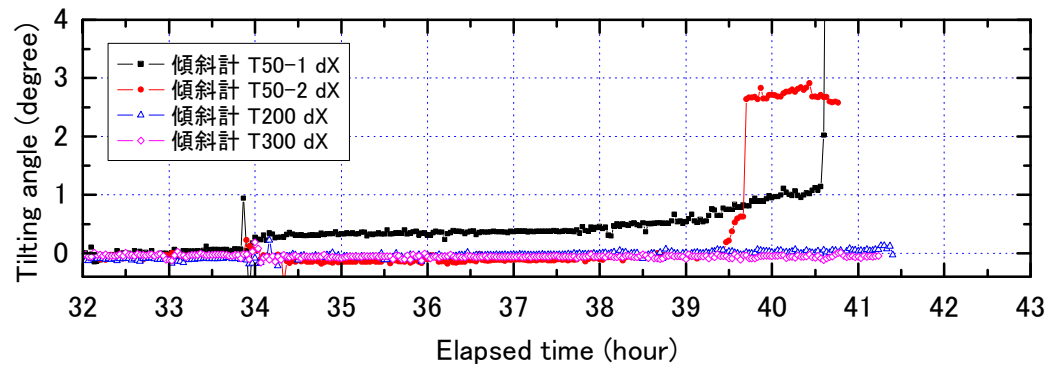


図 4 - 1 3 傾斜計の計測データ（2日目）

4) 地表面変位（斜面崩壊検知センサー、小型孔内傾斜計）による伸縮計との比較

傾斜量の地表面変位換算

図4 - 14は伸縮計のデータである。図4 - 3 (a) および図4 - 6のように、伸縮計E50とE200のインバー線を、それぞれ傾斜計T50 - 2とT200の鋼杭の、地表から0.2m上のところへ連結している。従って、鋼杭の下端を不動点と仮定すれば、地表面の変位dSと、伸縮計の変位dEは、それぞれ傾斜計の傾斜角dXに対して、以下の関係になる。小型孔内傾斜計の変位は、図4 - 2 - 4に示したように、ロッドの上段、下段の傾斜角をそれぞれdX1、dX2とし、地表面変位dKxとして表す。

$$dS = 0.75m \cdot \sin(dX)$$

$$dE = (0.75m + 0.2m) \cdot \sin(dX) = dS \cdot (0.75m + 0.2m)/0.75m = 1.27 \cdot dS$$

$$dKx = 0.5m \cdot \sin(dX1) + 0.5m \cdot \sin(dX2)$$

斜面崩壊検知センサーと伸縮計の比較

伸縮計の計測データを図4 - 14に示し、上式を使って傾斜計の傾斜角から換算した地表面変位dSは、図4 - 15のようになる。変位の微小部分を拡大すると、6月30日の降雨開始直後（図4 - 14、および、図4 - 15の34hours以降）で、傾斜計の方が2mm程度負の方向（斜面上方）に変位しているのに対して、伸縮計のデータは0.1mmしか減っていない。小さな変位なので、傾斜計と伸縮計のどちらかに計測精度上の問題があったのか、傾斜計の鋼杭の下端だけが変位したのかは分からないが、小さい変位レベルで両者に差が現れることを示している。今回、斜面崩壊検知センサー（傾斜計）の地表面変位を深さ0.75mに貫入した鋼棒の傾斜角から換算したところ、伸縮計による変位の測定とほぼ整合する測定結果を得たが、微少な変位に関しては誤差の要因があると言える。

伸縮計のインバー線の変位dEと斜面崩壊検知センサー（傾斜計）の変位dXを比較すると図4 - 16のようになる。変位の大きな傾斜計T50-2と伸縮計E50は、両者の変位置量が1：1になる線に添ってほぼ動いていることがわかる。傾斜計T200と伸縮計E200の比較では変位幅が小さく両軸を拡大したためノイズ成分が相対的に大きくなっているが、両者の変位置量はほぼ1：1の線に沿って変位していると推定される。

2011/6/30-08:00

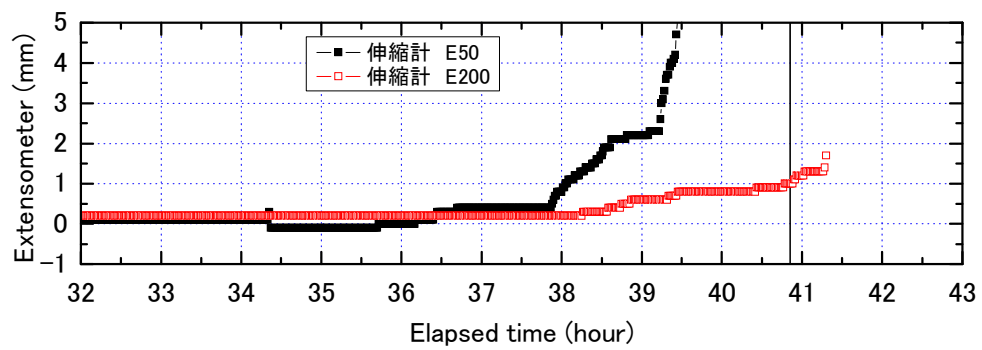
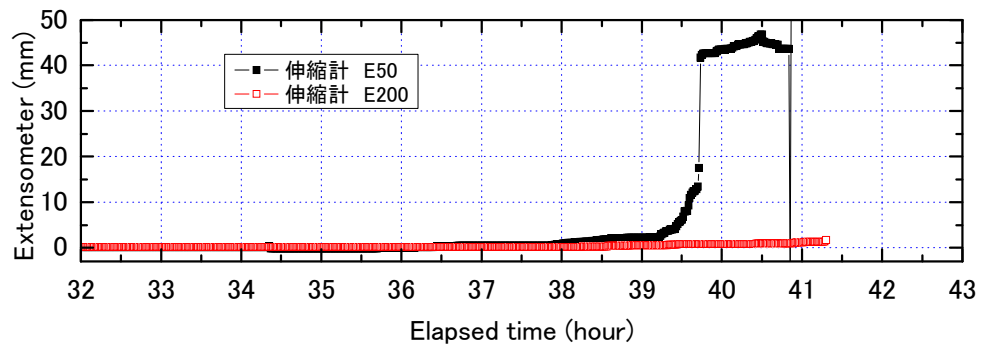


図 4 - 1 4 伸縮計の計測データ
(下図は上図の縦軸を拡大したもの)

2011/6/30-08:00

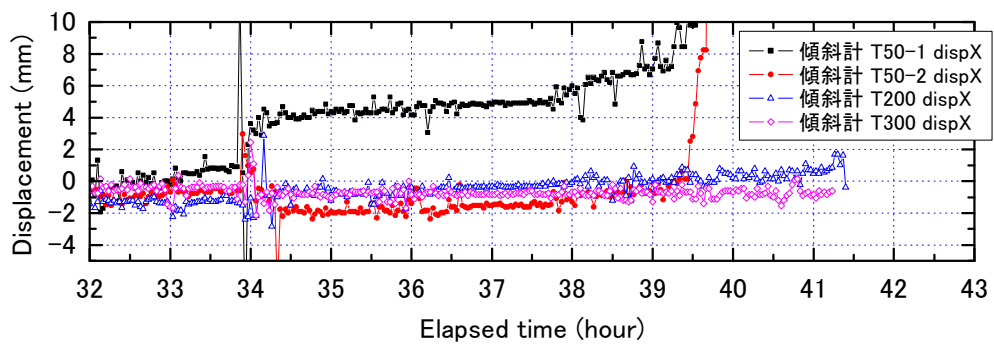
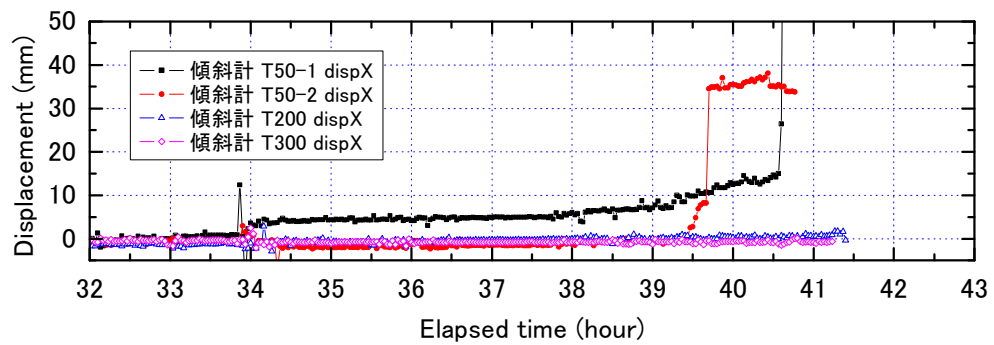
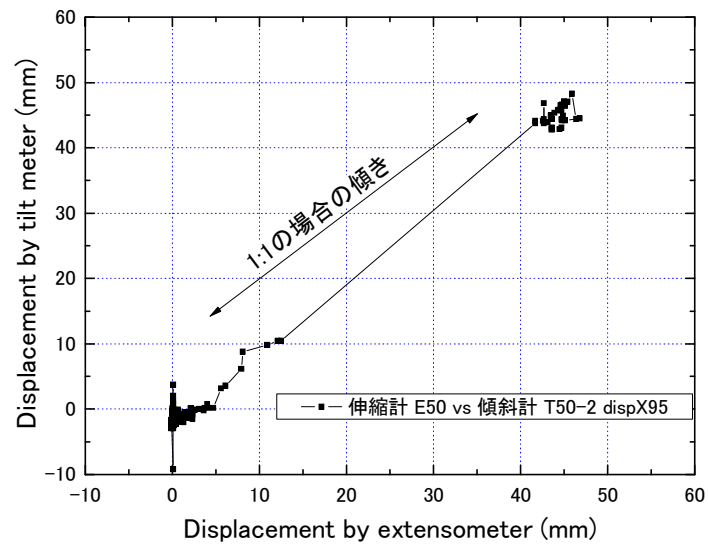
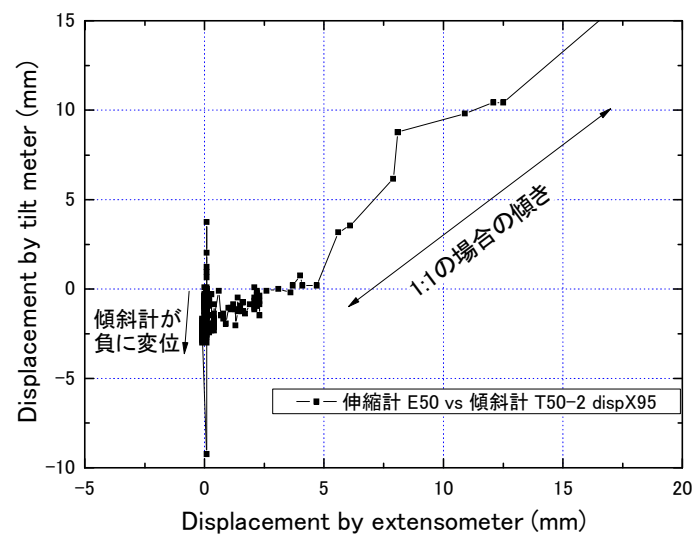


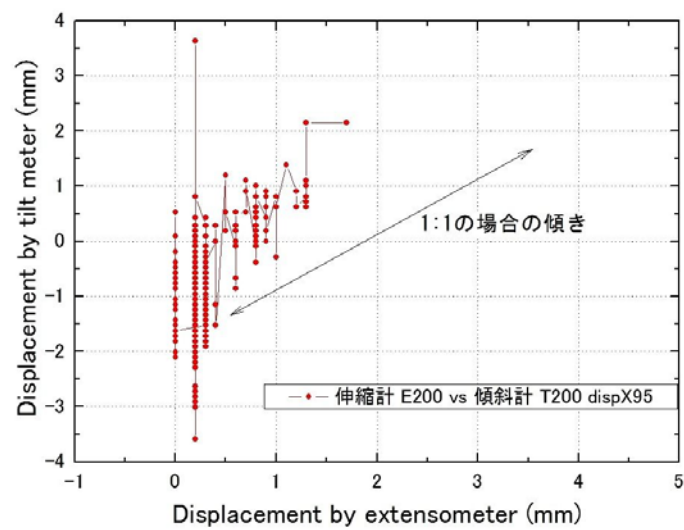
図 4 - 1 5 傾斜計による地表面変位 (換算値)
(下図は上図の縦軸を拡大したもの)



(a) E 50 と T 50-2 の関係



(b) E 50 と T 50-2 の関係 ((a) の縦軸を拡大したもの)



(c) E 200 と T 200 の関係

図 4 - 1 6 傾斜計と伸縮計のデータの比較 (中図は E50 の拡大図)

小型孔内傾斜計・斜面崩壊検知センサー・伸縮計のデータ比較

斜面崩壊検知センサー、小型孔内傾斜計、および、伸縮計のデータを、地表面の斜面下方向の変位量に換算して図4 - 17にまとめる。

斜面下方から50cmに設置した小型孔内傾斜計K50、斜面崩壊検知センサー（傾斜計）T50 - 1およびT50 - 2、伸縮計E50は、水平方向の設置位置が異なるため、同時には変位していないが、早い時期から大きく変位し、崩落した様子がとらえられている。また、それより上方にあるセンサーは、より遅く、より少ない量の変位を示している。写真4 - 3を時間で追うとわかるように、斜面崩壊は退行的に進行しており、それに伴って斜面下方から観測機器が倒壊し、それらが傾斜角の急激な変位となって、K50-upper、T50-2、T50-1、K150-upperの順番に現れたものである。T200とT300については滑落崖よりかなり上位に位置しておりほとんど変化していない。

今回用いた変位、傾斜を測定するセンサーのデータは、互いに整合して、斜面全体の挙動をとらえていると言える。また、斜面下端から150cmの小型孔内傾斜計K150は、早い時期から継続的な変位をとらえていて、下端部での崩落などのイベントの影響が、斜面中央部まで及んだことを示している。

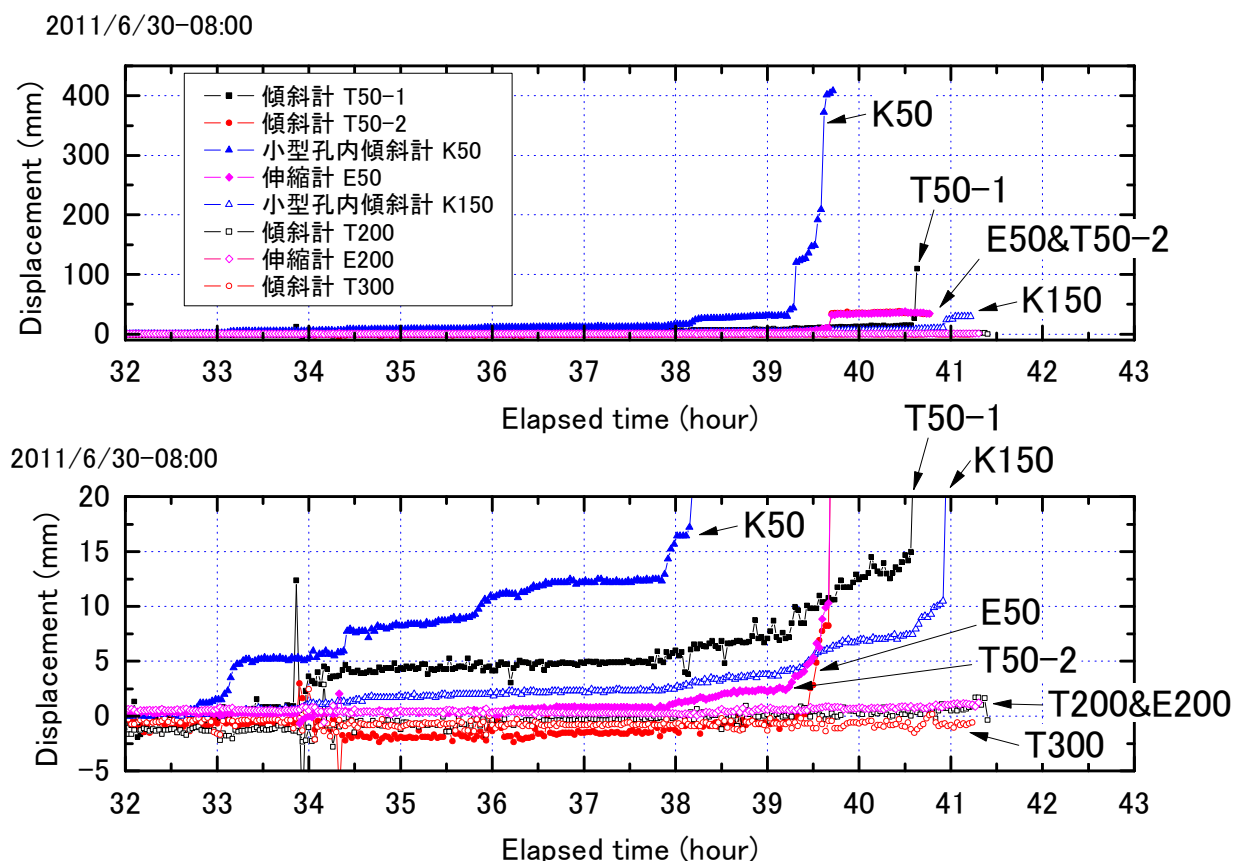


図4 - 17 各センサーによる地表面変位の比較
(下図は上図の縦軸を拡大したもの)

5) 傾斜角変位について

傾斜角変位速度の変化

図4-18に斜面崩壊検知センサーと小型孔内傾斜計の傾斜角の変位を示す。センサーと傾斜変位速度は、K50-upper : 0.15deg/h、T50-1 : 0.4deg/h、T50-2 : 0.11deg/h、k150-upper : 0.02deg/h、T200 : 0.016deg/hであり、T300には変化がなかった。T50-2では0.11deg/hourの後に2.3deg/hourに増加して10分程度で崩落した。このように、傾斜角変位速度は滑落崖が退行的に進行し、それが計器に近づくにつれて徐々に増加し、傾斜角の速度変位が0.15~0.4°/hourを約1~5時間継続した後、急激に崩壊に至っている。変位速度は漸次的に増加しており、概ね0.1°/hourを超える傾斜角速度になった場合には大きな変状直前と考えられ注意を要することがわかる。

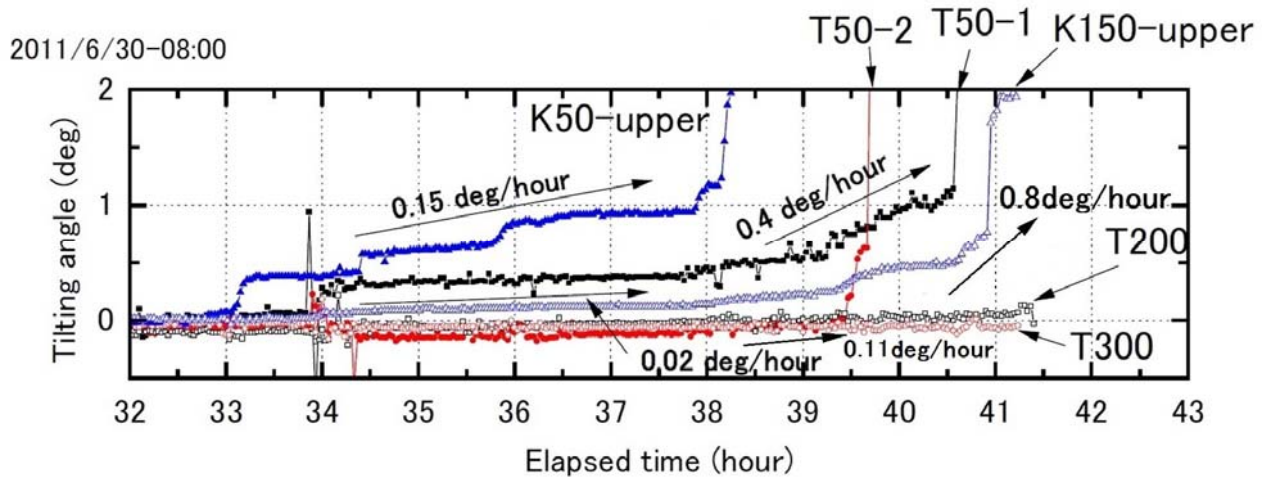


図4-18 斜面崩壊検知センサーと小型孔内傾斜計の傾斜角変位⁹⁾¹⁾

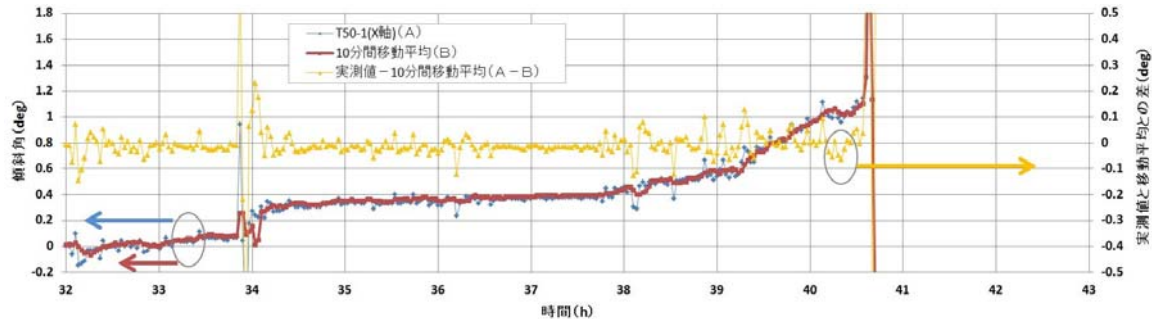
傾斜データのノイズについて

斜面崩壊検知センサーT50-1の実測値、10分間移動平均、および、それらの差(ノイズ)を図4-19(a)に示した。傾斜量の実測データには、34時付近で1度近い飛びデータがあるほか、35.5~36.5時、38時以後でも0.1~2度前後のバラツキをもっている。同図(b)に降雨イベントと崩落土砂の除去の状況図を再掲した。

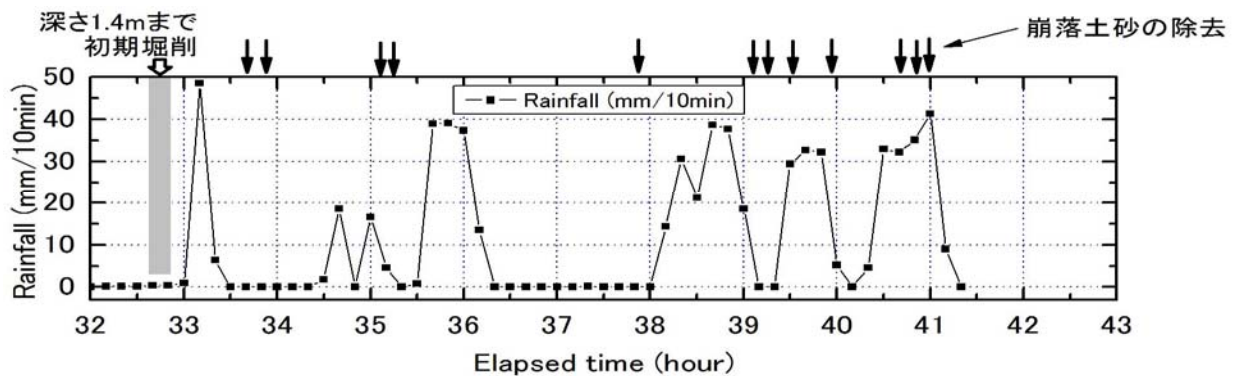
33時以前、および、34時頃のノイズについては土砂掘削の影響が出ていると考えられる。この実験で分離型傾斜モジュールの形で地中に埋めておらず、1mの杭に斜面崩壊検知センサーを取り付けMEMS傾斜検知部を内蔵してあることと、センサーが崩落面近傍の不安定な土塊部分に位置して、土砂掘削の振動を受けやすかったためと思われる。

36時前後、および、38~40時過ぎまでのノイズについては、降雨による影響が一因として考えられる。降雨機は放出口をもつ円筒が前後に回転するスプリンクラー式のものであって、1時間積算雨量で240~300mm程度の多量の降雨であったため、杭先の物理的な振動の影響や電波への影響などが要因として考えられる。

ノイズを取り除く方法としては、MEMSチップ内で平均化処理を現在の3点(2秒間隔)から増やしてワンポイントの異常値を取り除くことと、傾斜検知部を地中に埋設することが考えられ、現時点では傾斜検知部を分離型モジュールにして埋設する方向で改良を加えている。



(a) 斜面崩壊検知センサー (T50-1) の実測値、10 分間移動平均

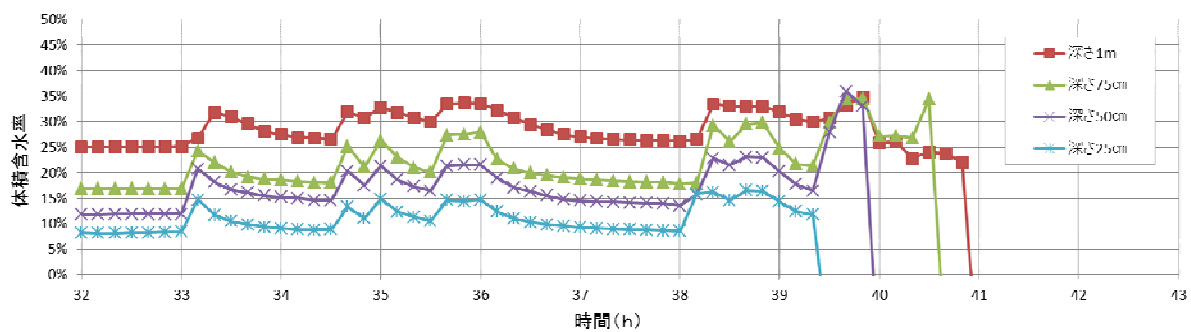


(b) 降雨イベントと崩落土砂掘削

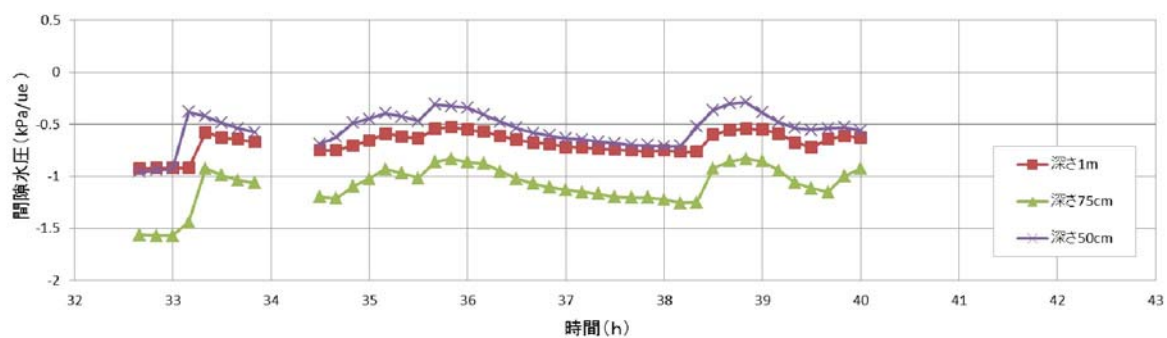
図 4 - 1 9 降雨・掘削と傾斜データの関係

6) 体積含水率、間隙水圧計の変化

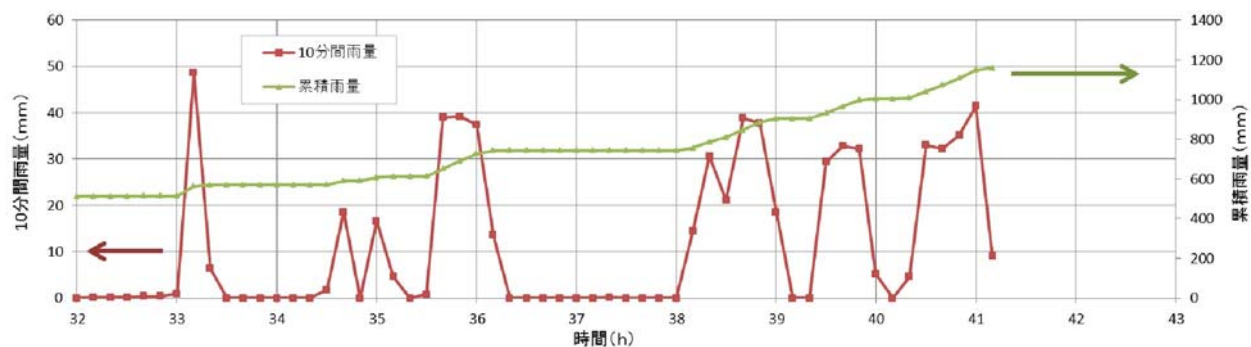
降雨量・累積降雨量、および、W50 の体積含水率、U50 の間隙水圧、T50-1 および T50-2 の傾斜角変位を、図 4 - 2 0 にまとめる。降雨に伴って体積含水率、間隙水圧とも増減している様子がわかる。深さ方向に大きな差異はないが、深さ 1 m の値の方が浅いものに比べて浸透の影響で降雨に対する応答性が鈍くなっている。図 4 - 2 1 にあるように、ほぼ同位置に設置した間隙水圧計 U50 と体積含水率計 W50 の計測値は同一深さ方向で相関がある。



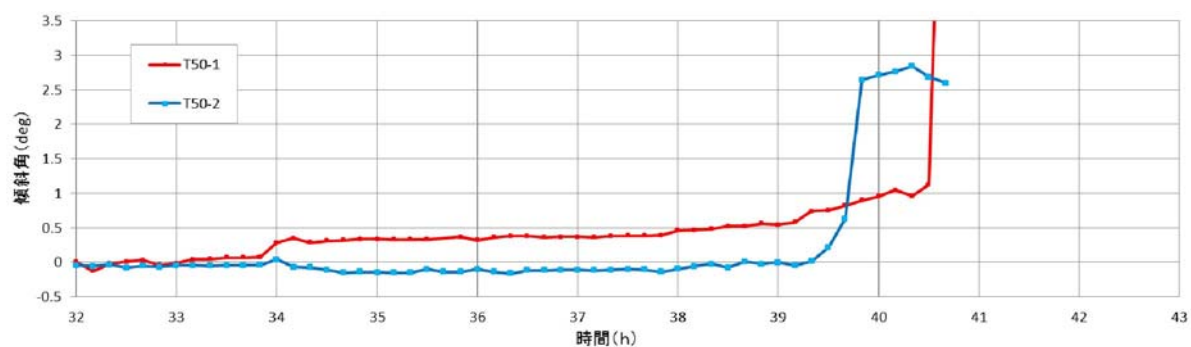
(a) 体積含水率の変化 (W50)



(b) 間隙水圧の変化 (U50)



(c) 降雨量と累積降雨量



(d) 斜面崩壊検知センサーの変化 (T50-1、 T50-2)

図 4 - 2 0 体積含水率・間隙水圧・傾斜角の変化

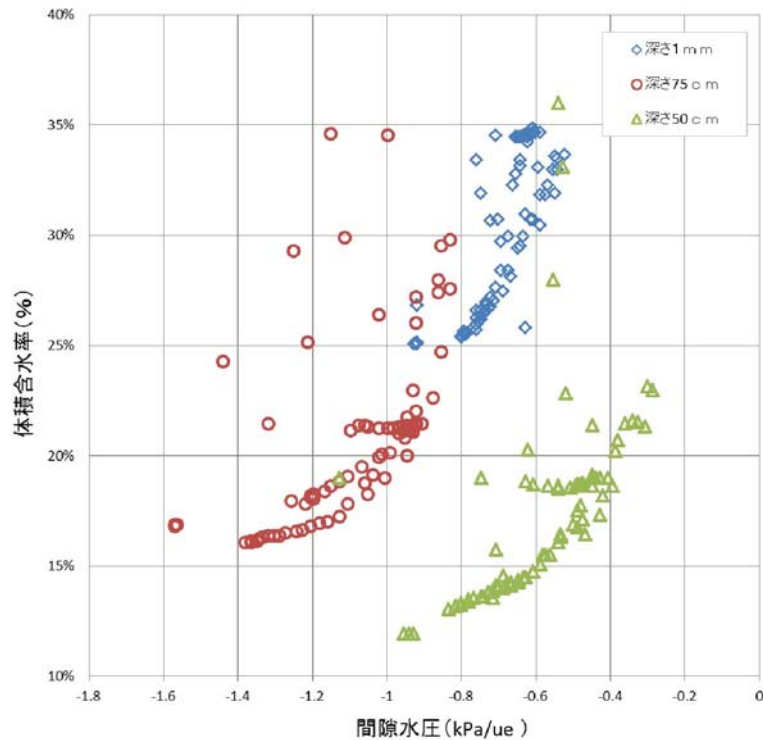


図 4 - 2 1 間隙水圧と体積含水率の関係

4 . 2 . 4 まとめ

中国・都江堰市の地すべり斜面を利用した延べ2日間にわたる人工降雨実験の結果を以下にまとめる。

第1日目累積509mm、第2日目649mm、2日間累積1158mmの人工降雨を降らせ、斜面末端部を掘削した結果、地盤の応力低下により斜面末端部から上方に崩壊が進み、順次、傾斜変位を小型孔内傾斜計と斜面崩壊検知センサーで観測できた。

小型孔内傾斜計は、斜面下方に設置したK50の上方のユニットが下方のユニットより大きく変位し、斜面表層部から崩壊する様子を観察した。斜面上方に設置したK150は上下ユニットともほぼ同じ値で傾斜し深さ1mまで一様なせん断が進んだと解釈できた。

斜面崩壊検知センサーについては、T50-1が2日目降雨開始直後から微小な傾斜を検知し、T50-2がややそれより遅れて変位を検知し、その後5~6時間かけて変位速度が上昇して斜面崩壊に至った。傾斜角変位速度は滑落崖が近づくにつれて増大し、概ね0.1deg/hを超えると斜面が危険な状態であると推定された。小型孔内傾斜計と斜面崩壊検知センサーの傾斜量を地表面変位に換算し、伸縮計の変位と比較したところ、ほぼ1:1の対応を示した。これは崩壊するまでには至らなかった斜面崩壊検知センサーT200と伸縮計E200でも同様であった。

傾斜データは、土砂掘削による振動や降雨時の雨滴による振動もしくは電波障害などのノイズが重なりノイズ対策が必要であることがわかった。

全体的に、人工降雨による崩壊を斜面崩壊検知センサー、および、小型孔内傾斜計が、それぞれ面的、深度的に捉えられることを確認し、実測データのノイズに対して対策が必要であることがわかった。

4.3 中国・都江堰市における地すべりへの適用

4.3.1 現地および設置の状況

今回開発した小型孔内傾斜計の試作機を、平成 22 (2010) 年 10 月～11 月にかけて、図 4 - 2 2 に示す中国四川省都江堰市の塔子坪地区の地すべり斜面に設置し観測を試みた。図 4 - 2 3 に地すべり斜面の断面図を示す。この斜面は、平成 20 (2008) 年に四川省で発生した汶川地震で崩壊した後、大雨が降るたびに少しずつ変位するようになった。表層は深さ 30m 程度まで風化した安山岩で、傾斜が約 30 度、斜面の高さが約 250m である。図 4 - 2 2 にあるように、斜面の下には集落が広がっており、災害の危険を抱えているため、継続的な監視が求められていた。⁹²⁾



図 4 - 2 2 四川省都江堰市塔子坪の地すべり斜面

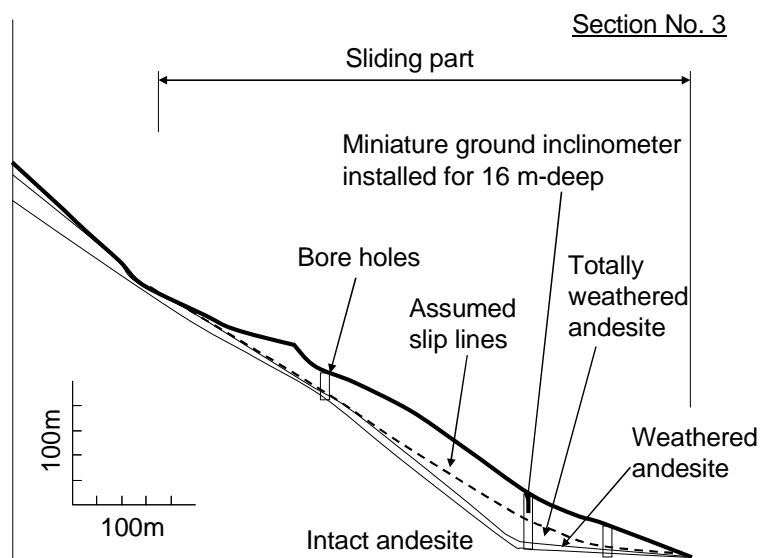


図 4 - 2 3 塔子坪地区地すべりサイト断面図 (Sections No. 3)

現地管理者が地盤調査を行ったボーリング孔跡を利用して、小型孔内傾斜計を（地面に打ち込むのではなく）この孔の中に挿入して埋め戻すことにした。そのため、通常の打ち込む方法では3～5m程度の深さにはしか設置できないのに対して、この現場ではボーリング孔の空洞部分の深さ12m（ロッド1m×12段）まで設置することができた。各ロッドの接続は、写真4-4のように、試作品ではステンレス製のため曲がりにくかった点を改善し、高圧ホースの短片を用いて、地盤の変位に追従してこの部分が折れ曲がるようにした。12段分のロッドの重量は30kgを超えるが、高圧ホースの引張強度は、この荷重を十分支えられる。設置後、ボーリング孔とロッドの間の隙間を砂で埋めて、地盤の変位がロッドに伝わる状態にした。



（a）接続部



（b）設置状況

写真4-4 ロッド同士の接続

各センサーユニットをつなぐケーブルは、写真4-5のように、設置作業時に現地で順次接続し、防水テープで密封した。これらの一連の作業で、12段の小型孔内傾斜計を設置するのに、1時間半程度かかった。1段当たりの設置時間に直すと7.5分であった。それ以外に準備作業、撤去作業などの時間が1～2時間程度かかった。今後、接続部などを専用部品に置き換えることができればさらに設置時間を短縮化することは可能とみられる。防水については写真4-3-2にあるステンレス管に開けた丸孔から前もってシリコーンを管内に充填し、一定時間放置することでシリコーンがセンサー全体を保護するようにして防水した。最後に写真4-6に示すような無線機能を備えた子機ユニットを杭に取り付けて設置を完了した。



写真4 - 5 センサーユニットのケーブルの接続



写真4 - 6 小型孔内傾斜計の設置状況

4 . 3 . 2 試験結果

計測は、30 分に 1 回の頻度で行った。表 4 - 2 は、各センサーユニットの地磁気センサーで計測した方位角である。ここで、センサーユニットの番号は、上位のロッド（長さ 1 m）から順に No. 1 ~ No. 12 となっている。この方位角を元に、傾斜計の X、Y 方向の傾斜角データを補正し、斜面方向の傾斜角を求めると、図 4 - 2 4 のようになる。データには 1 日周期の変動や、不規則なノイズが含まれている。

1 日周期の変動は Unit 6（深度 5 ~ 6 m）では最大 0.45 ~ 0.6 度程度となり、不規則なノイズの大きさは、傾斜角の分解能（0.005 度程度）の 2 ~ 3 倍になった。ただし、ノイズに関わらず傾斜の全体的傾向を追うことはできるレベルでありセンサーの性能は十分引き出せていると考え、それに基づいて結果の整理を行った。通常、地中温度は表層でない限り、気温の日変化の影響を受けないと考えられるため、日変動のノイズについては、地表面からロッドを伝わって熱的な影響があったものと考えられる。不規則なノイズについては、ロッド内温度の日変動による影響を含んで、結露などの影響が考えられる。

また、12 段あるユニットのうち、1、2、3、8、10 段目は、正常なデータがとれなかった。これ

は、機器の防水の問題と思われる。防水については、ロッド開口部（写真４－３－２参照）からシリコーンを注入して、シリコーンによってMEMS傾斜検知部を包み込むことで防水しようとしたが、シリコーン自体の防水性が十分でなかったことが考えられる。このように、いくつかの課題があるが、長期的な傾斜変位のトレンドは読み取ることができた。

傾斜角について、最下位のユニットNo.12（深さ12m）を基準として順次積分することで、地盤内の斜面方向の水平変位を、日数の経過とともに表示すると、図４－２５のようになる。正常なデータをとれなかったユニットは、傾斜角を0としたので、変位を過小評価している可能性があるが、計測開始から25日で8mm程度の変位が観測された。

表４－２ 各センサーユニットの方位角

Unit	1	2	3	4	5	6
Angle	133	121	123	303	324	324
Unit	7	8	9	10	11	12
Angle	325	347	346	341	345	352

（北から反時計回りの角度）（単位：度）

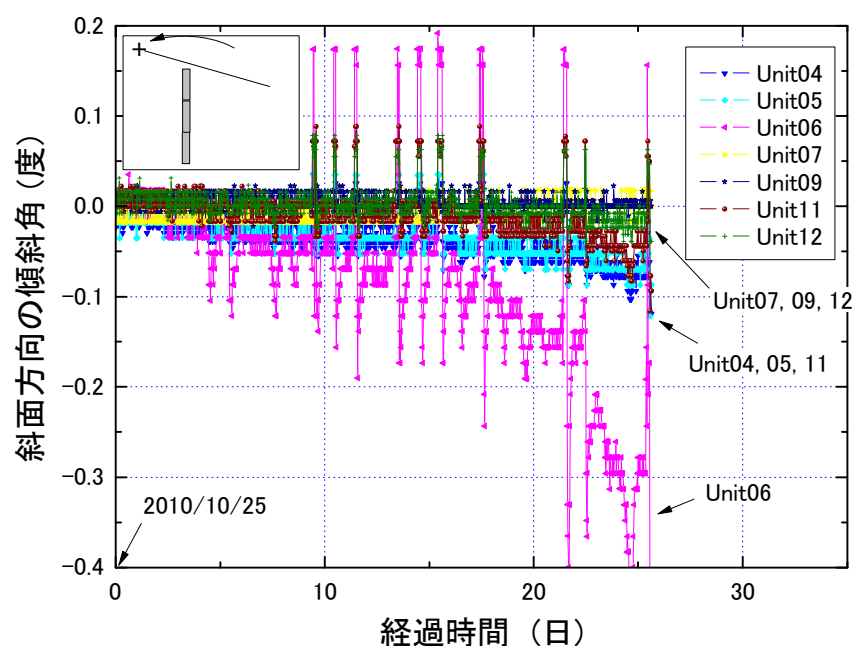


図４－２４ 斜面方向の傾斜角

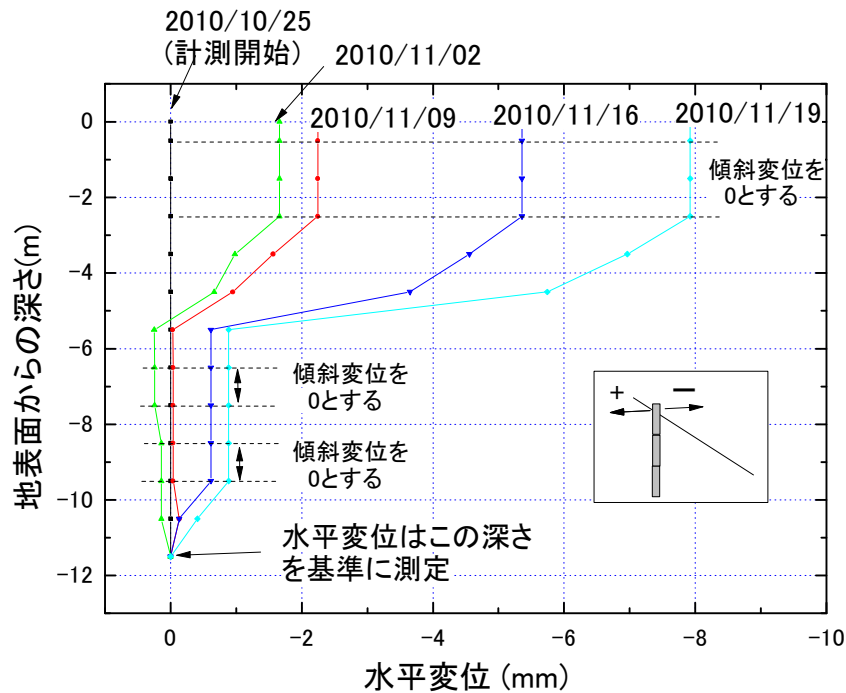


図 4 - 2 5 斜面方向の地盤内水平変位

4 . 3 . 3 まとめ

今回開発した小型孔内傾斜計は、簡易動的コーン貫入試験と同じ要領で打ち込むだけで迅速に設置でき（1ユニット当たり設置に7.5分）、地中深くにおける地盤の挙動を監視し、異常を検出できることを確認した。

最初の試作品ではユニット連結部がステンレスだったのを、曲がりやすいように高圧ホースを用いて改良した結果、地すべり斜面内部の長期的な変動の傾向を観測できた。ただし、正常に動作しないユニットもあり、防水などの耐久性、傾斜角データの日変動などのノイズに課題が見つかった。

今回、深度のわかっている既設ボーリング孔を用いて設置し手順を確立した。すべり面の深さなどがわからない状態で設置する場合など、連続的に設置する状況を想定し現場で簡単に継ぎ足しできるユニットの開発も課題であることがわかった。

4.4 中国・三峡ダム湛水区域における地すべりへの適用

4.4.1 概要

中国・重慶市万州地区における三峡ダム湛水試験に伴うダム湖岸地域の地すべり現象を定量的に捉え、早期予報に利用することを目的として、日中共同研究（2年間）が実施されており、その中で斜面動態観測を行った。本研究では、これまで開発してきたMEMS技術を活用して土壌水分と傾斜角を簡便かつ低コストで測定し、省電力かつリアルタイムで監視できるシステム^{8,4)}を現地で適用できるように改良し、計測センサーを貯水池湛水斜面に設置し、平成20（2008）年10月から2年間以上の長期モニタリングの実証実験を行った。

改良した監視システムは、中国国内での無線通信を可能にし、GPRS-SMS方式により中国科学院・成都山地災害及環境研究所内に設置した中央ホストサーバーへの自動転送機能を組込んだ。試作システムを海外でも利用可能で普及できる監視システムに発展させるため実地試験^{9,3)}を行った。

4.4.2 地すべりの状況と観測システムの構成

1) 地すべりの状況

三峡ダムは平成21（2009）年に最終の湛水が行われ、湛水によりダム湖水位はそれまでの145mから正常水位175mまで30mほど水位が増加する計画となっていた。

重慶直轄市万州区の三峡ダム湖岸に位置する晒网坝（Sai Wan Ba、図4-26）地すべりは、三峡ダム建設に伴ってすでに大きく変状した地すべりであり、現地住民もすでに全て他の地域に移転が完了している状況にあり、中国で長期監視研究区域に指定されている地域である。ここを実験サイトとして選定し、ダム湛水や降雨による地すべりへの影響を把握するため、斜面崩壊検知センサーを設置した。移転した住民の協力を得て空き家を利用して観測機材を設置した。

晒网坝地すべり長期監視研究区域は、図4-27に示すように、長江に向かって古代地すべり（Old landslide）、新地すべり（New Landslide）、新生地すべり（Recent Landslide）の大きく3つに区分されている。地すべり体の規模は表4-3に示す通りである。また、地すべり地の地質断面図を図4-28に示す。

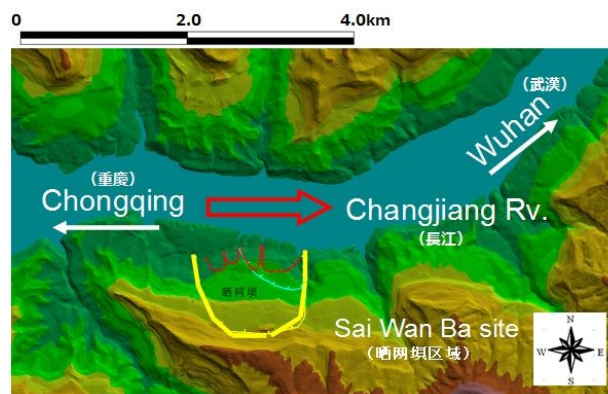


図4-26 晒网坝地すべり研究区域

2) 斜面崩壊検知センサーの設置位置

晒网坝地すべり長期監視研究区域の新生地すべりブロックは図4 - 27に示すように3つ確認されており、古代地すべりよりも平均勾配が大きく、平成20(2008)年夏の降雨時にも地すべり現象が発生した。地すべりの規模を表4 - 3に示す。図4 - 28の断面図にみられるように、地域全体は受け盤の様相を呈している。ダム湖の湛水により湖水面以下の有効応力が低下したことが崩壊の一因とみられるが、それについては本研究範囲に含まれていない。

現地にはすでに多くの観測機器が設置されており、それらとの関係を考慮して、新地すべり(New Landslide)と新生地すべり(Recent Landslide)を対象に、斜面崩壊検知センサー3個(Sensor unit 1~3)を各斜面に設置した。設置位置を図4 - 27~図4 - 29に付記した。

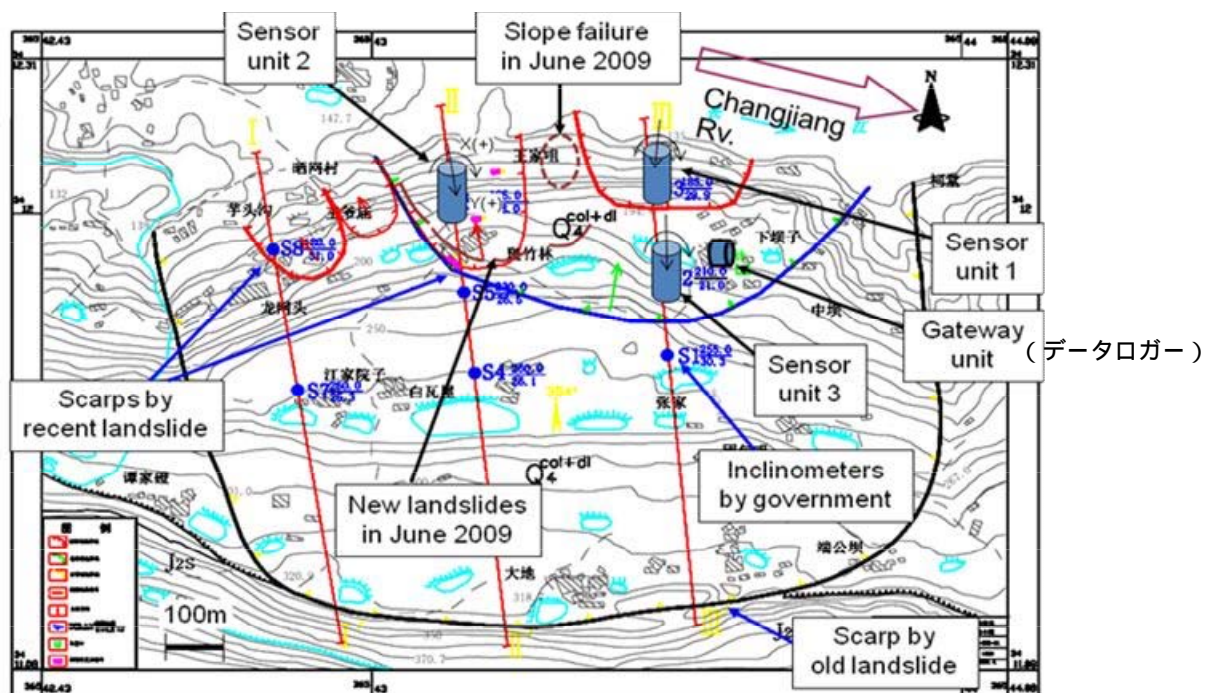


図4 - 27 地すべり監視センサーの設置位置⁹⁴⁾

表4 - 3 研究区域地すべり体の規模

地すべり 方向	地すべり体 前面標高	地すべり体 後方標高	地すべり体 長さ	地すべり 体幅	傾斜角度	地すべり体 の平均厚さ
354°	130m	325m	350m	600m	5° ~ 15°	15m

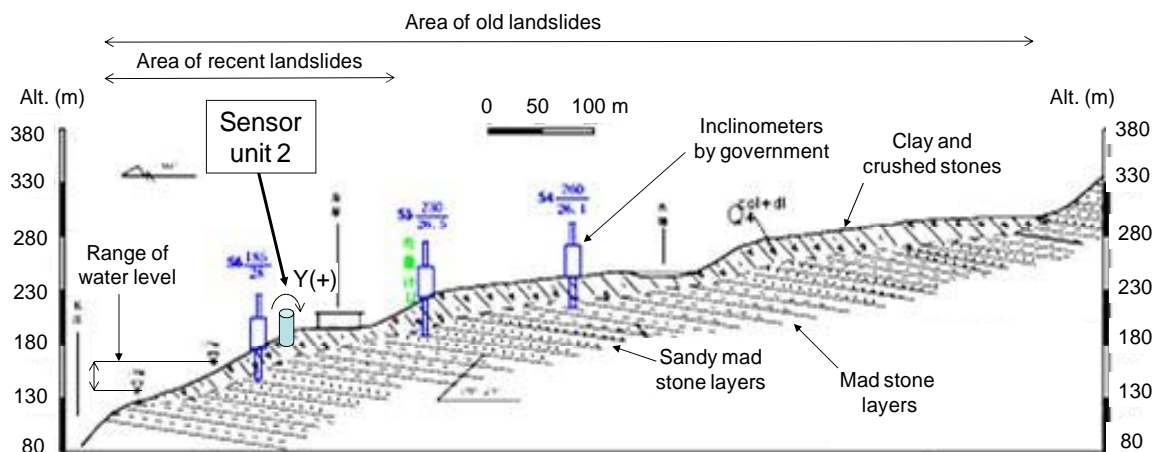


図 4 - 2 8 地すべり地域の地質断面図

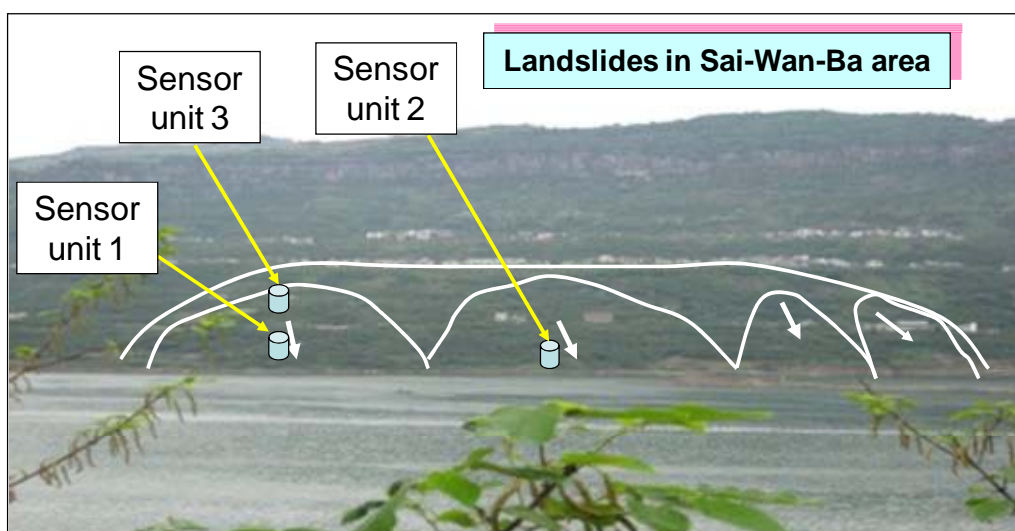


図 4 - 2 9 地すべり全景と監視センサーの設置位置

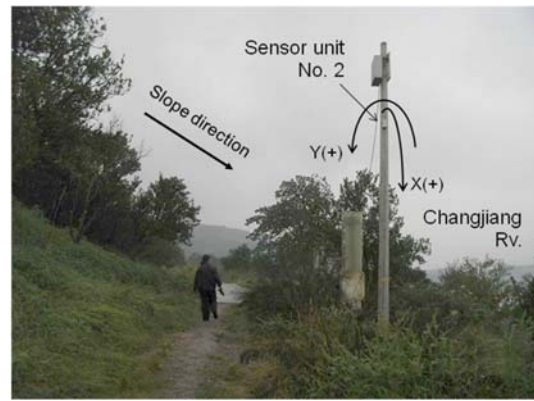
3) 観測システムの構成

オレンセラ¹¹⁾の研究結果によると、表層破壊の直前には、法先から斜面の変動と飽和度の上昇が始まり、飽和度が 80% ~ 90% に達した時に崩壊が始まることを報告している。そこで本研究では、地盤の変状を電氣的に簡便に調べるため、斜面崩壊検知センサーで地表面傾斜角を計測し、現地土壌水分については体積含水率を計測し、無線ネットワークを構築してモニタリングした。

図 4 - 3 0 (a) にあるように、斜面崩壊検知センサーから発信された計測データは、地すべり研究エリア内は日本国内と同じ特定小電力無線 (429.250 ~ 429.7375MHz) で 600m に離れた農家 (空き家) の屋上に設置したデータロガー (親機、基地局) に送信される。その農家が最近まで使用されており電力が確保できた。そこで SD カードにデータ蓄積しバックアップするとともに、中国移动通信社の G P R S - S M S サービスを通じて、管理サーバに転送する仕組みにした。なお、サンプリング時間は、3 計測地点とともに 10 分間隔に設定した。センサーユニット (子機) は盗難などの懸念から手の届かない使われていない電柱の高所 (同図 (b)) に据え付けた⁹⁵⁾。



(a) データロガーユニット (親機)



(b) センサーユニット (子機)

図 4 - 3 0 設置の状況

4 . 4 . 3 地すべり崩壊時におけるモニタリング結果

現地モニタリングは平成 20 (2008) 年 10 月から 2 年間以上実施した。平成 21 (2009) 年 6 月降雨時に計測点 2 の周囲で地すべり崩壊現象が発生し、その時の計測値を捉えることができた。ユニット 2 で計測された傾斜角と経過時間の関係を図 4 - 3 1 に、土の体積含水率・降雨量と経過時間の関係を図 4 - 3 2 に示す。ここで X 軸傾斜角 (度) は地すべり斜面直交、Y 軸傾斜角 (度) は斜面方向の値である。

5 月 13 日から 5 月 16 日頃までの降雨で体積含水率が上昇し、斜面方向の Y 軸傾斜角は $4.5^{\circ} \sim 4.9^{\circ}$ 程度で推移した。その後、5 月 23 日～28 日に降雨があり、その後、傾斜角変位速度がおおよそ $0.01^{\circ} / \text{hour}$ で 5.0 から 6.3 度程度まで漸増した。さらに、6 月 7 日～8 日の連続降雨により斜面方向傾斜角は、傾斜角変位速度 $0.12^{\circ} / \text{hour}$ で 6.3 度から 9.0 度程度まで一気に増大し、その後も漸増した。事後の現地調査により、6 月 7 日～8 日の連続降雨時に、観測地点近傍の多くの箇所では地すべり崩壊が発生したことを確認した。特にユニット 2 の上方地点で顕著な地すべり崩壊が発生し、写真 4 - 7 に示すように、崩壊土塊の移動距離は約 10m に達した。

傾斜角変位速度 0.12deg/h で傾斜が急増した時点 (6 月 7 日) で崩壊が始まったとすると、その直接的誘因は 6 月 7 日からの降雨と考えられる。崩壊 6 日前の 6 月 1 日に傾斜変位速度に微小な変化点があり傾斜速度が加速した原因としては、5 月 23～28 日の断続的降雨により体積含水率が 5 月 23 日以前の値に戻っていないことから、累積雨量による影響が一因と考えられる。なお、ダム湖湛水の影響については諸事情により割愛した。

連続降雨により 6 月 7 日の朝 4 時から傾斜角度が増え始め、同日 12 時に崩壊を開始するまでの時間は 8 時間となっている。この時間は、崩壊の前兆現象から崩壊に至る時間だと解釈できる⁹⁴⁾。実際の地すべり土塊の挙動を考慮し、モニタリングにより得られた降雨と体積含水率 (土壌水分) との関係から、傾斜変位速度が徐々に増大する変状は地すべり崩壊が発生する前兆現象を捉えることができる。これは、4 - 2 - 3 章 5) で述べたように、傾斜角速度変位が $0.1^{\circ} / \text{hour}$ を超えると、斜面が極めて危険な状態にあると判断してよいだろう。一方で、単に傾斜変位速度の変化だけでなく、その現場の降雨量や現地の体積含水率の変化を合わせて判断する必要がある。

本研究に用いた監視システムでモニタリングすることにより、地すべり崩壊予知や防災対策に今後活用できる可能性があることを確認した。

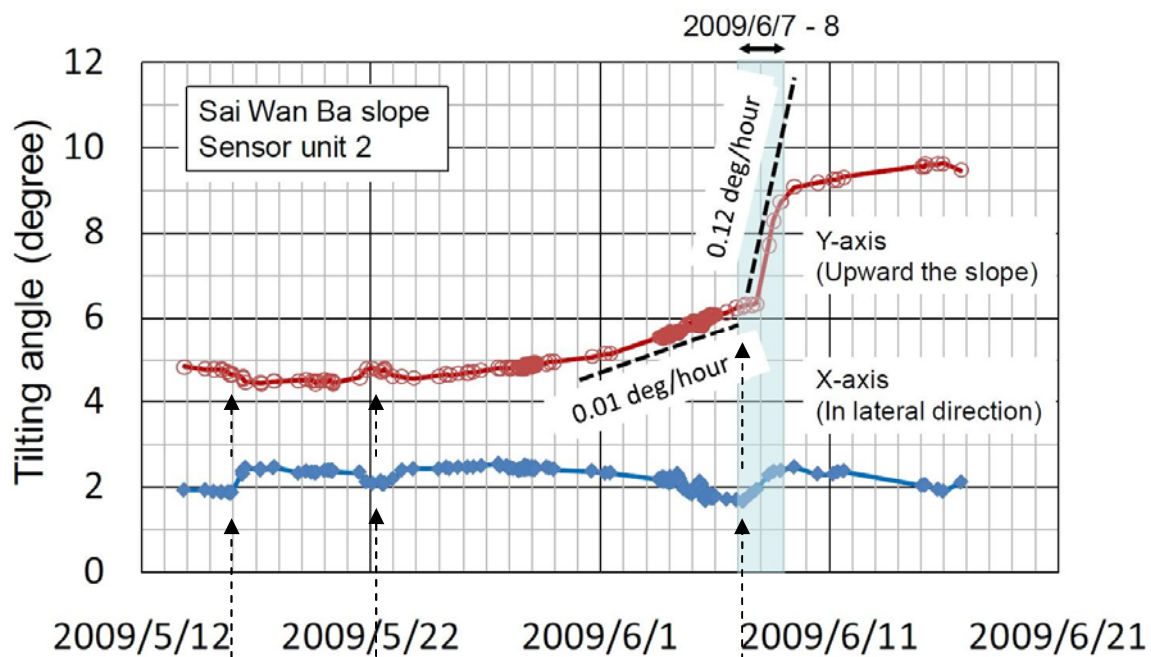


図 4 - 3 1 地すべり体の傾斜角度変化と経過時間の関係⁹⁰⁾

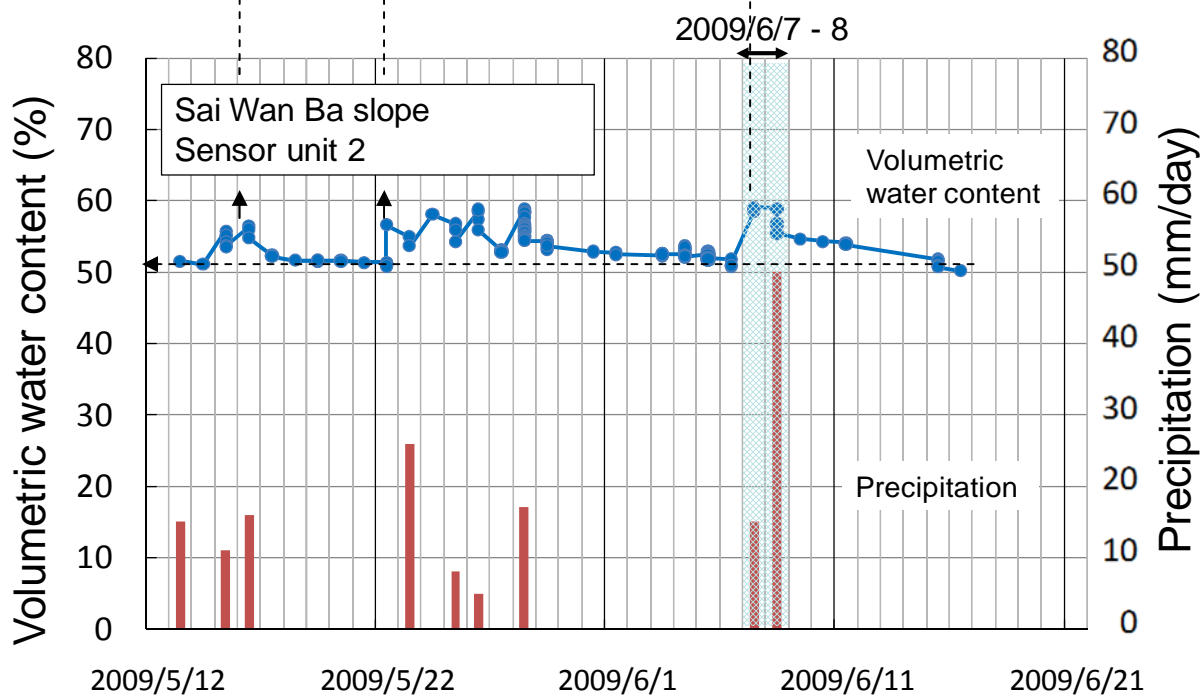


図 4 - 3 2 降雨量・地すべり体の体積含水率と経過時間の関係⁹⁰⁾



写真 4 - 7 計測点 2 の上方地点における地すべりの状況
(平成 21 (2009) 年 6 月 7 日の新たな土塊移動)

4 . 4 . 4 まとめ

中国三峡ダムの既往地すべり斜面に斜面崩壊検知センサーを設置し長期観測した結果、降雨およびそれに伴う体積含水率増加に応じて、傾斜変位速度が漸次増大し、 0.1deg/h を超えて近傍に崩壊が発生したことを確認した。また、大規模な地すべり地においても斜面崩壊検知センサーが平行移動することなく崩壊に直結する微小な傾斜変位を観測できることを確認した。

子機と親機間の通信は現場エリア内であるため、日本国内同様の特定省電力無線を用い、親機と四川省成都にある研究所間は中国・移動体通信網を経由した。中国当局である研究機関と現地が 500 km 離れた遠隔地であったが、問題なく動作することを確認した。

海外では盗難、当該国の電波法、電力事情など、国内とは状況が大きく異なる場合があり、海外で使用する場合にはそれらに対応していく必要がある。

4.5 国道脇の斜面崩壊における二次災害防止への適用

4.5.1 斜面崩壊現場と斜面崩壊検知センサー設置の状況

平成 21 (2009) 年 7 月末の集中豪雨時に、福岡県冷水峠の国道 200 号脇の斜面が崩壊して全面通行止めとなった。8 月～9 月中旬まで応急復旧工事（頭部排土工＋仮設防護柵工）が行われ、それ以降、片側通行で本復旧工事（法面工＋法枠工＋アンカー工）が実施された。これらの全工事期間にわたり、3 箇所の斜面崩壊検知センサーユニットを設置し、斜面動態を監視し、復旧工事および交通の安全を確保した。

図 4 - 3 3 に示す崩壊斜面は崩壊直後のものであり、復旧作業にあたって片側開通に必要な安全率 1.05 を確保するように斜面が段切りされた。小段の上に斜面崩壊センサーを 3 台設置した。センサーの設置位置を図 4 - 3 4 に示す。

図 4 - 3 5 に現地の模式図、図 4 - 3 6 に地質断面図を示す。地質は写真 4 - 8 に示すように強風化花崗岩（白亜紀朝倉花崗閃緑岩、20m 以上の深層風化、 $N < 5$ ）であり、 N 値 5 以下の層が 20m 以上ある厚いマサ土層を形成している。

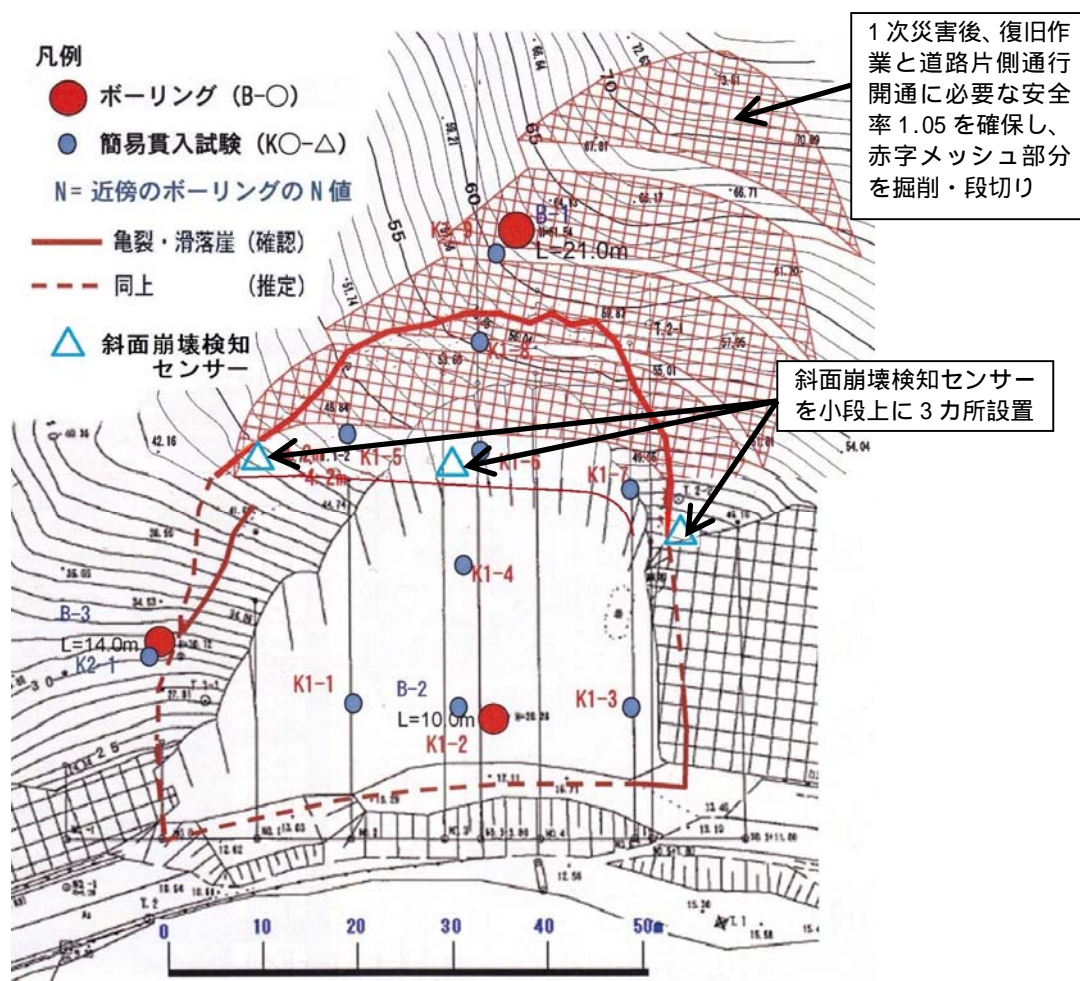


図 4 - 3 3 一次災害直後の地形、復旧作業・調査などの状況



図 4 - 3 4 斜面崩壊検知センサー設置場所（2次崩壊箇所）の状況

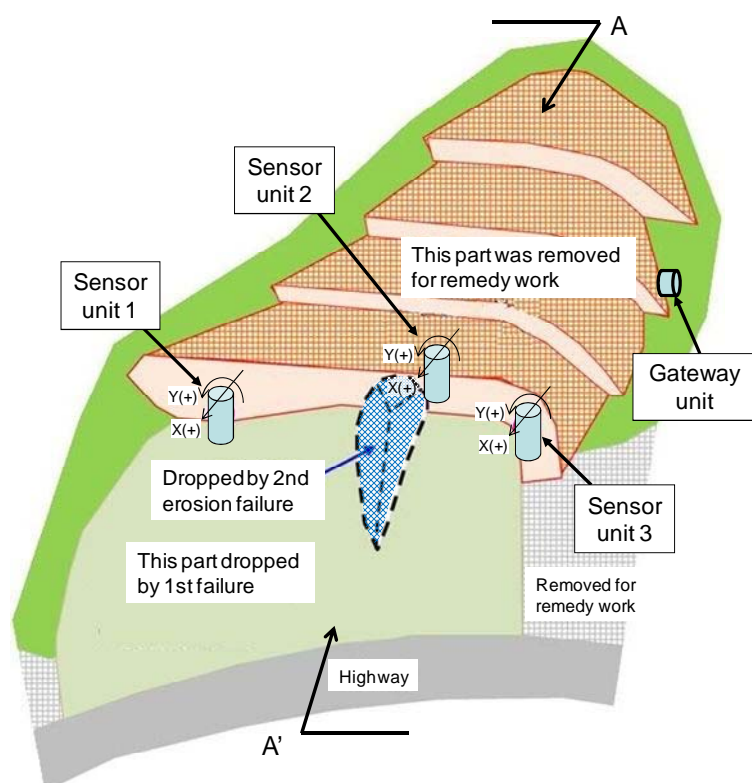


図 4 - 3 5 福岡冷水峠の道路法面の1次・2次崩壊の模式図

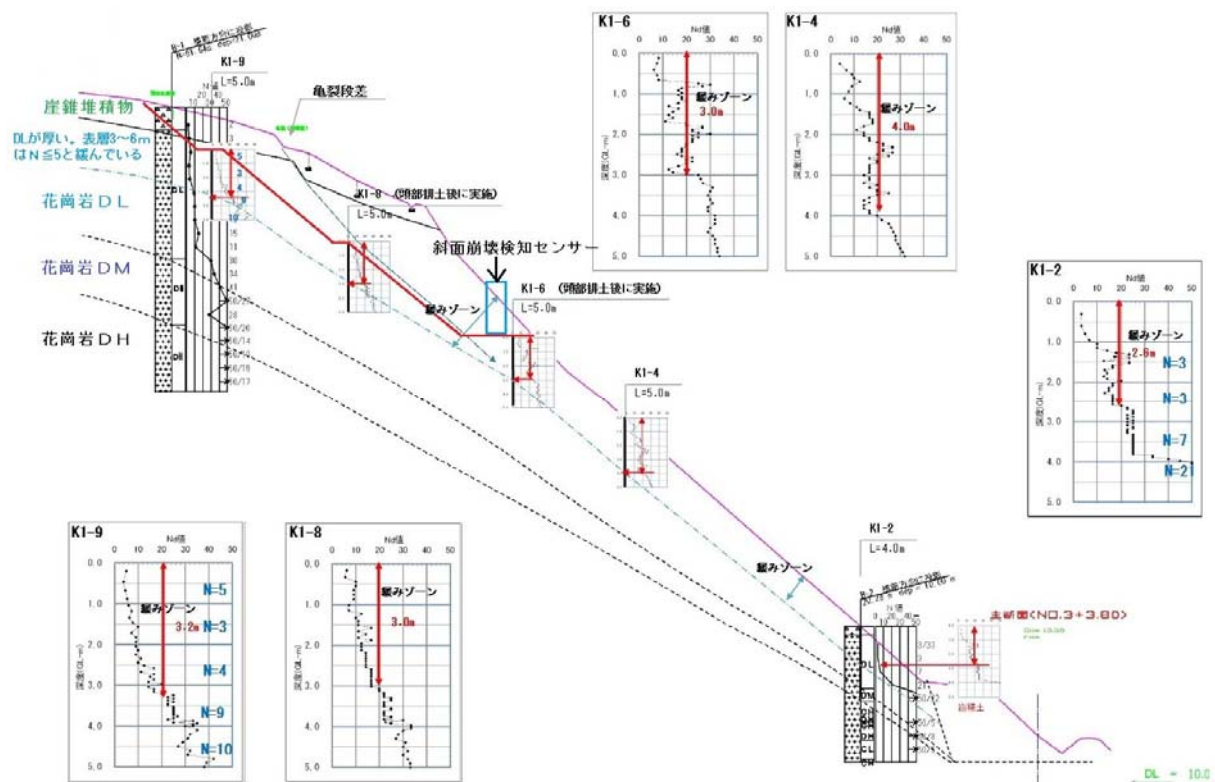
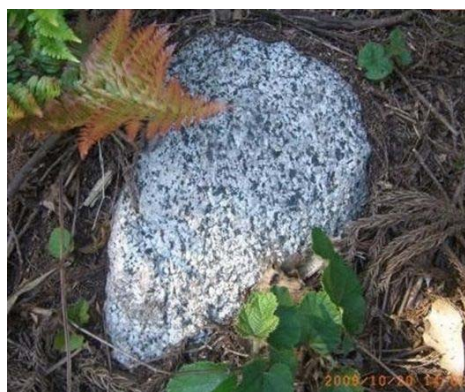


図 4 - 3 6 崩壊箇所の地質断面図



風化した花崗岩で、地質学的には閃緑岩に近い成分である。
まさ土層は厚く $N < 5$ の層が 20m 以上ある。

写真 4 - 8 崩壊箇所の地質状況

4.5.2 観測結果

観測期間中の10月上旬に日雨量103mmの豪雨により2次災害（浸食崩壊）が発生した。当時は1次災害の本復旧工事の準備段階であり、頭部排土工法面には表面浸食防止を目的にシートを被覆していたが、下部のアンカー計画斜面はシート被覆が未着手だった。このため、法面、および、その周辺斜面に降った雨水が、法面の形状やシートの縫れ等を原因として、センサーを設置していた法面中央部に集中し、アンカー計画斜面上部の小段を浸食していき、センサーが倒壊したものである。工事期間中も道路片側通行を円滑安全に行う必要があり、道路管理者がガードマンを現地に配置してあった。センサーの傾斜検知情報に基づいてガードマンが目視確認し、通行止めの措置がとられた。図4-37に9月半ばから約1ヶ月の各計器の動きを示す。

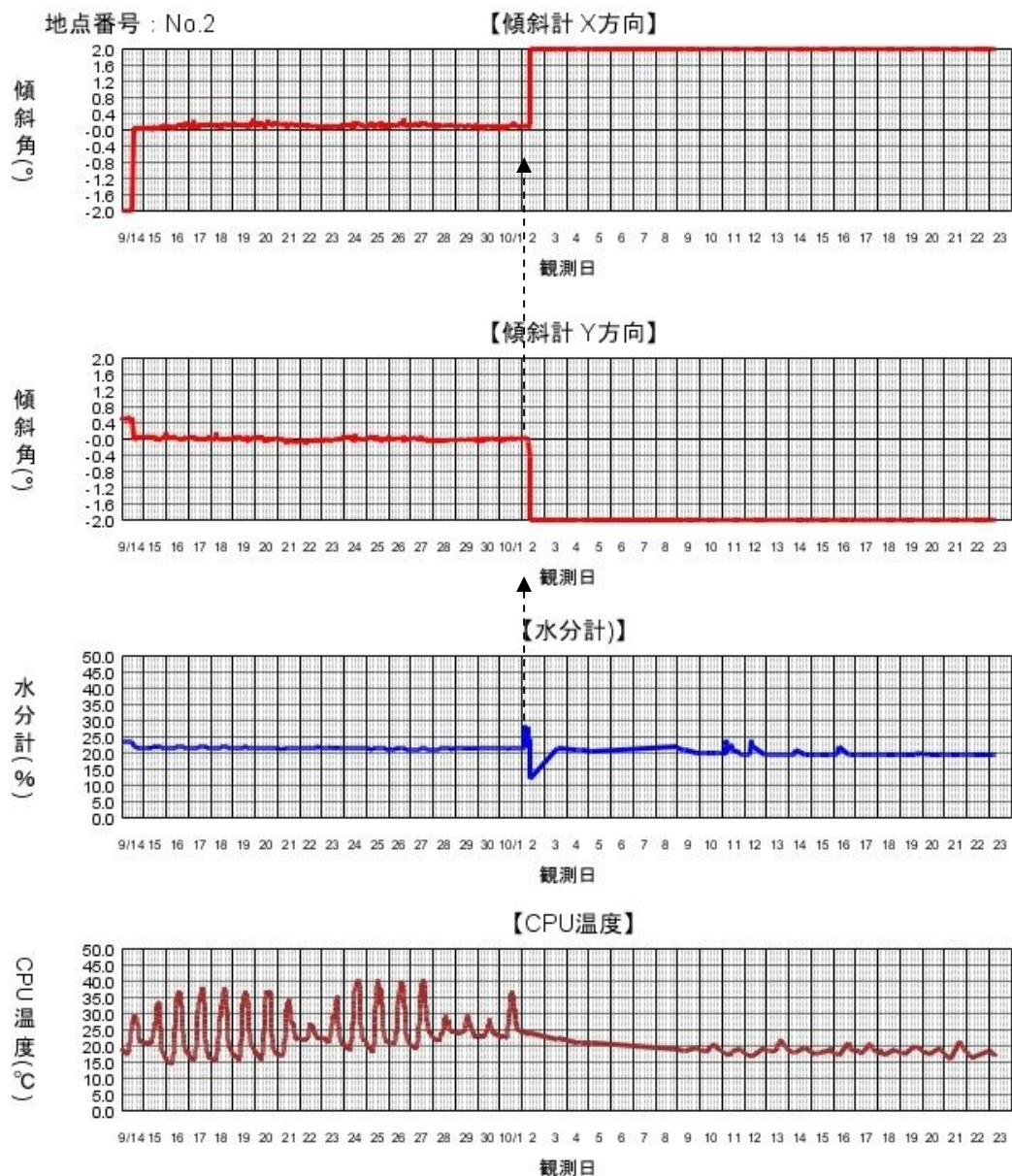


図4-37 斜面崩壊センサーの異常情報

10月2日の浸食崩壊において斜面崩壊検知センサーには図4-38に示す計測データが得られた。斜面直交方向への転倒が確認されているので、浸食崩壊はセンサーの横脇から始まり、センサーは横倒しの状態で転倒したと考えられる。センサーの転倒確認時刻は、7:58であった。6:38~58から斜面直交方向の傾斜が7:48まで $-0.16^{\circ}/\text{hour}$ で増加し、その後一気に転倒した。ガードマンの報告では、浸食崩壊を確認したのは8:00頃であり、7~8時までの約1時間の動きは崩壊前の前兆現象と見てとれる。このように、多くの斜面崩壊は突然生じるのではなく、その前に少しずつ斜面の変位が観測される。その後、浸食された土砂は斜面を流動して仮設防護柵の背面に堆積し、矢板の隙間から溢れて道路に流出した。6:58以前は 0.05 度以内のノイズを生じているが、これは気象条件などによる電圧変動⁹⁶⁾と思われる。以上の観測から、概ね $0.1^{\circ}/\text{hour}$ を超える傾斜角速度変化が観測される場合は危険な兆候といえるだろう。

また、崩壊斜面を部分毎に分けて監視することが可能⁹⁷⁾であり、土壌水分量だけでなく個別斜面の地下水の状況⁹⁸⁾や、さらに観測機器にWebカメラなどを加えるなどによって、傾斜計の動き方などの斜面の状態と実映像などを組み合わせて、崩壊の予兆およびその状況をリアルタイムに遠隔地にて把握することが可能と考えられる。

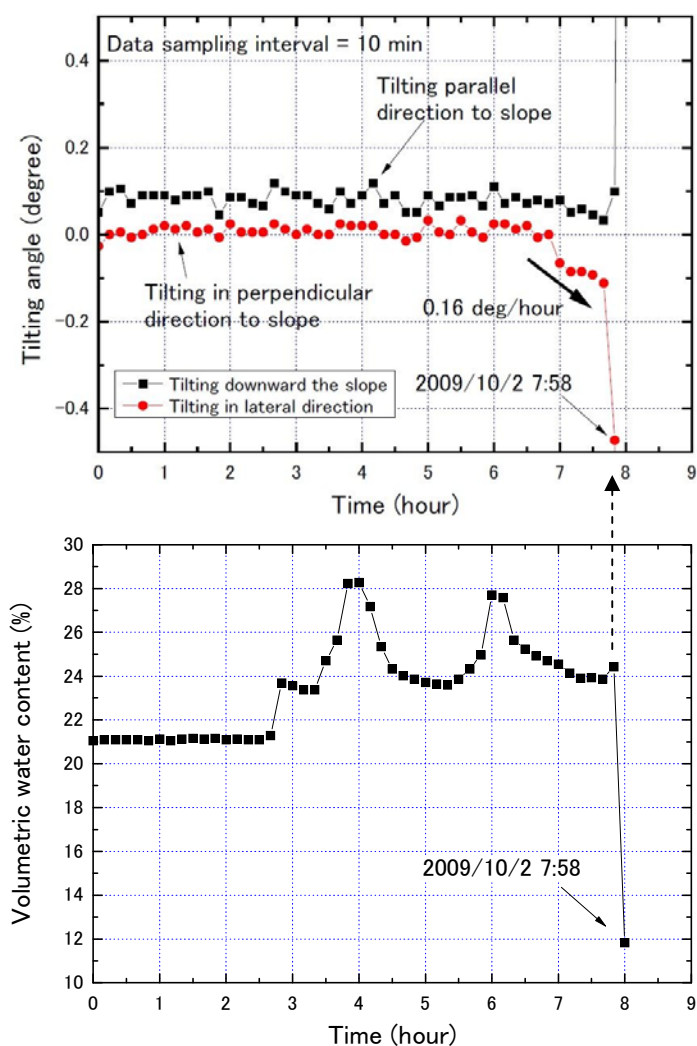


図4-38 道路法面の2次災害時の斜面崩壊検知センサーの計測データ⁹⁰⁾

4 . 5 . 3 まとめ

実際の斜面災害現場において 2 次災害防止のために斜面崩壊検知センサーを設置し観測した。

降雨により遮水シートの間隙から雨水が集中し斜面が浸食され、斜面崩壊検知センサーが倒壊の約 1 時間前から異常を検知した結果、ガードマンによる現場確認の上で通行止め措置がとられた。降雨の状況によってはさらに大きな災害に発展した懸念ある中で、その予兆をとらえることもでき、危険を未然防止できる可能性があることを確認できた。

斜面崩壊検知センサーの斜面方向 (X 軸)、水平方向 (Y 軸)、および、体積含水率は問題なく計測・無線通信され、リアルタイムで遠隔地の状況を把握することができた。

4.6 国道脇の斜面崩壊における二次災害防止への適用

4.6.1 現地の状況

1) 崩壊斜面の状況

平成 23 (2011) 年 7 月の連続降雨により、福岡県田川郡添田町内の国道 500 号脇の斜面が崩壊した。崩壊の様子を図 4 - 6 - 1 に示す。崩壊範囲は、延長が約 45m、高さが約 29m であった。崩壊箇所は、両側を沢で挟まれた尾根部に位置し、当該地域には中生代後期白亜紀の花崗岩類が分布している。地盤調査により、花崗岩の風化が深部まで進行していたことが判明し、崩壊斜面の上部には、幾つかの開口亀裂や滑落崖に相当する段差が認められた。

当該国道は地域の重要な生活道路であり、斜面崩壊以降の仮設防護柵および押さえ盛土による復旧工事の間における二次災害防止を目的として、伸縮計、孔内傾斜計、雨量計、監視用 Web カメラ、および、斜面崩壊検知センサーを設置して、遠隔地からリアルタイム自動監視を行った。

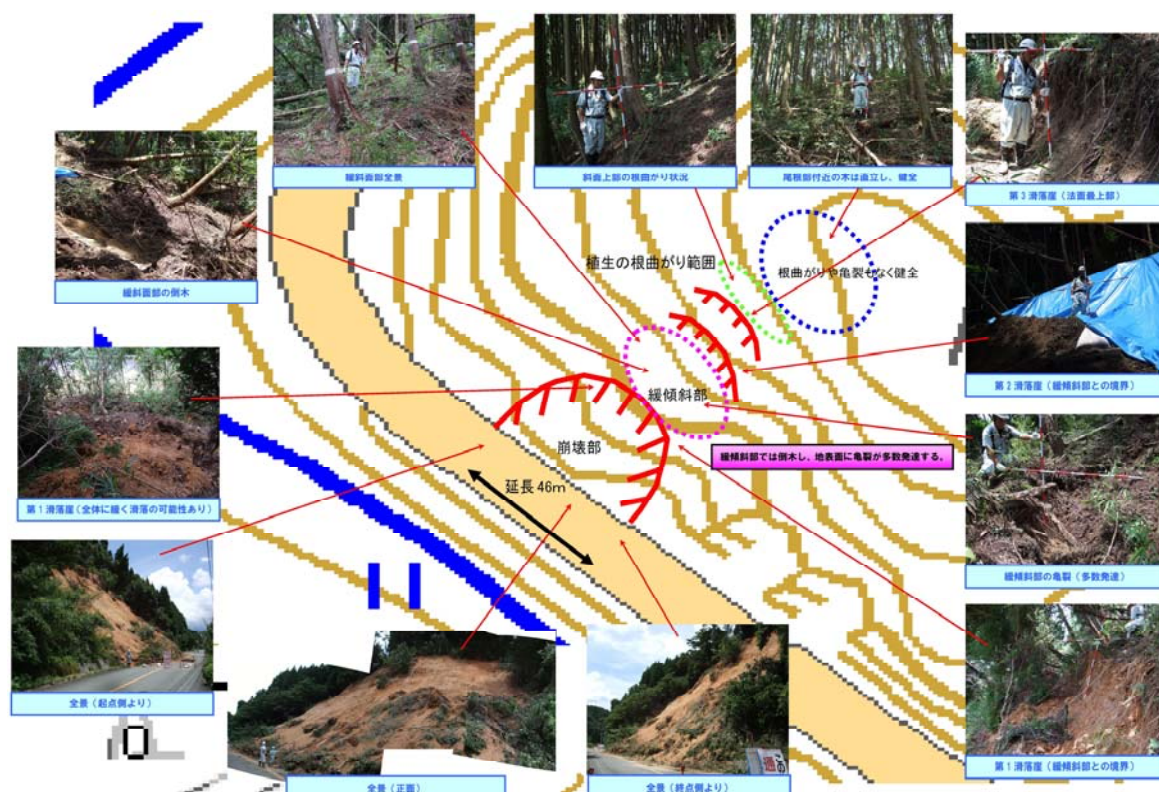


図 4 - 3 9 発災直後の見取り図および地表踏査結果

2) 被災時の降雨状況

図 4 - 4 0、図 4 - 4 1 に示すように、平成 23 (2011) 年 5 月 10 日からの累積降水量が崩壊する前日 (7 月 6 日) 時点では約 1,250mm に達していた。5 月 10 日に 142.5mm の日降水量を確認し、それ

以降は断続的ではあるが、加速度的に降水量は増加した。しかし、被災日（平成 23 年 7 月 7 日）の日降水量については 20mm であり、必ずしも多い状況にはなかったが、斜面崩壊した。

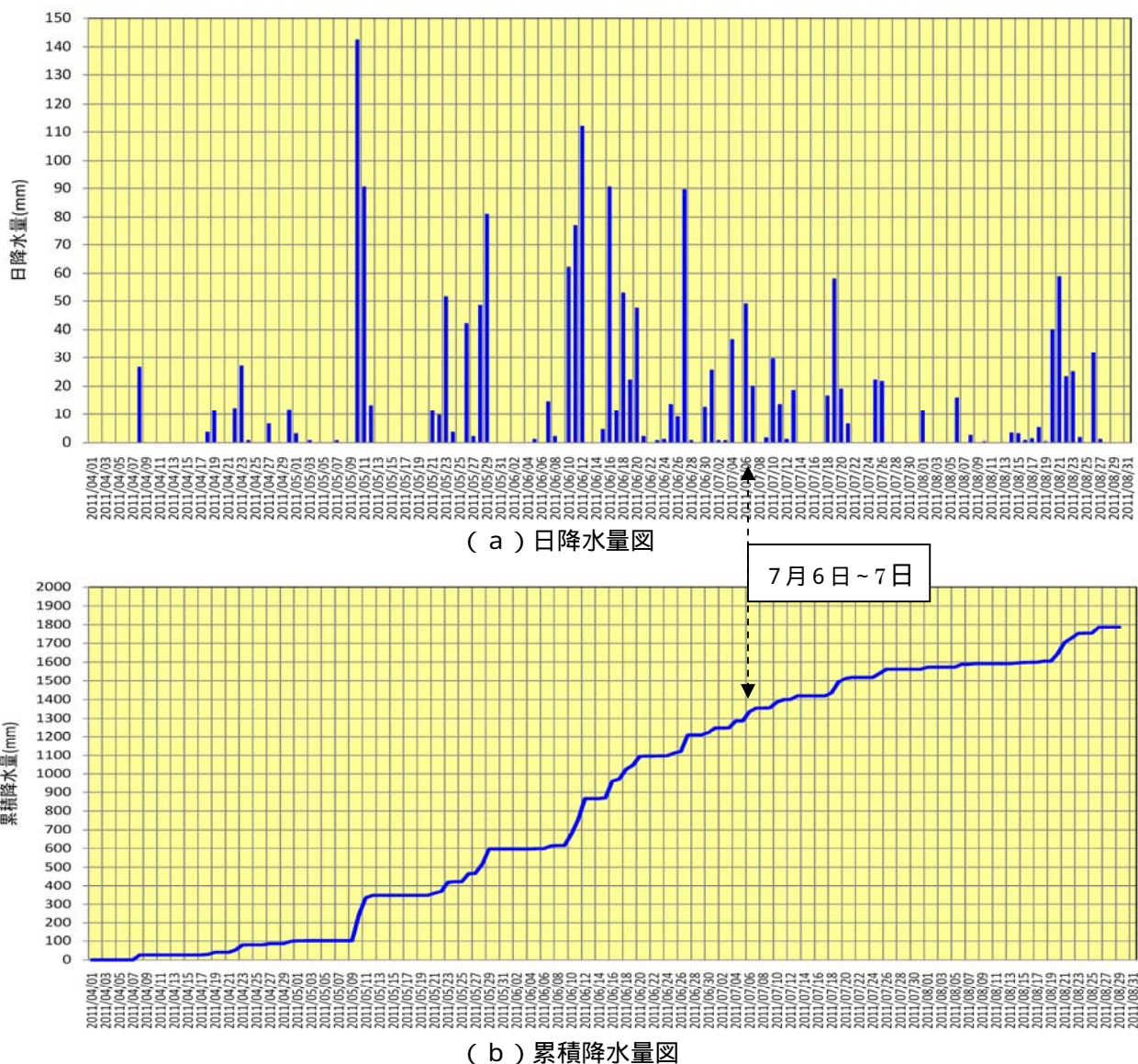


図 4 - 4 0 平成 23 年 4 月 1 日から 8 月 31 日の降水量

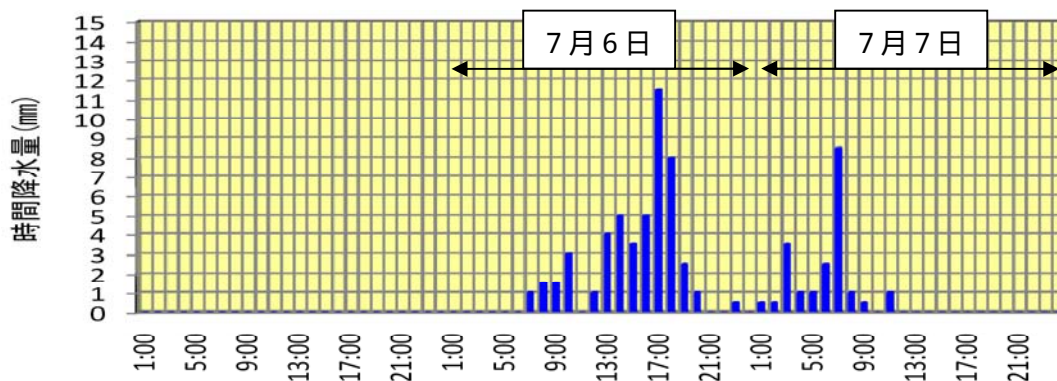


図 4 - 4 1 7 月 6 日から 7 月 7 日の時間降水量

バッテリーはソーラーパネルで充電するので、商用電源のない箇所でも運用が可能であり、ネットワークカメラは8時間の充電で2時間の閲覧が可能となっている⁹⁹⁾。

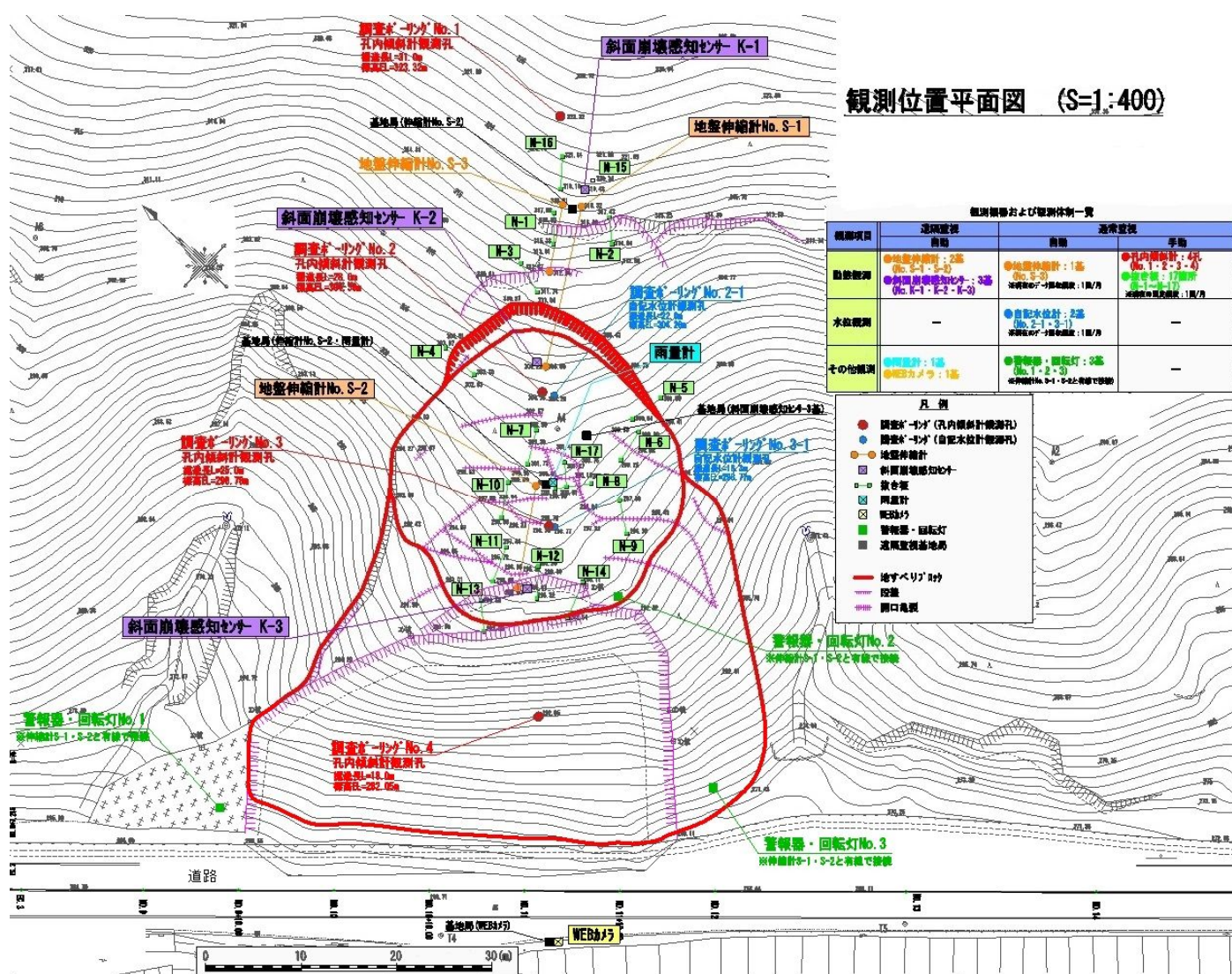


図 4 - 4 2 現場平面図および計測機器類の配置図

4.6.3 観測結果

1) 各観測機器の経時変化

次頁に示す図4-43に、各観測計器のモニタリングから得られた測定値の経時変化を対比できるように示した。ここで、斜面崩壊検知センサーのX軸は斜面下部方向に向かって正である。

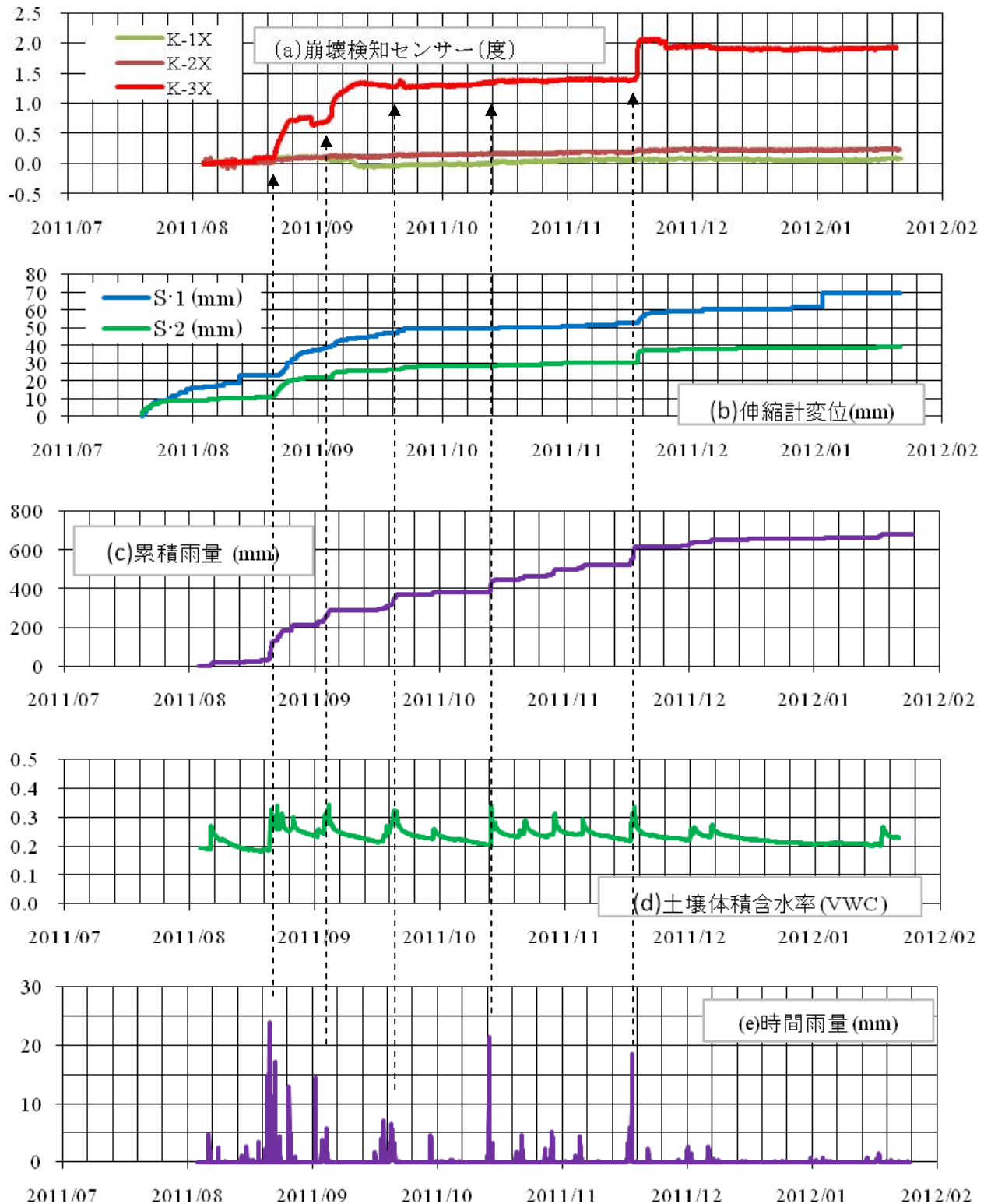


図4-43 斜面崩壊検知センサー・伸縮計・累積雨量・土壌体積含水率、時間雨量の経時変化

降雨がある都度、土中の体積含水率が増加し、降雨が止むとそれが減衰し、体積含水率は概ね 18% ~ 34% 程度の間を上下していることがわかる。8 月 ~ 12 月までの累積雨量は約 600mm であった。こうした降雨イベントに応じて伸縮計 S-1、S-2、斜面崩壊検知センサー K-1、K-2、K-3 が変位を観測した。観測機間中、伸縮計は S-1、S-2 それぞれ 70mm、40mm 変位し、一方、傾斜角では K-1 と K-2 はほとんど動かず、斜面中央部に位置する K-3 が 2 度程度動いた。

2) 斜面崩壊検知センサーの観測結果

図 4 - 4 4 は K - 1 の X 軸、Y 軸の傾斜角の動きである。X 軸は斜面下方向に向かって正、Y 軸は斜面上からみて左方向に向かって正になる。降雨イベントに応じて X 軸、Y 軸方向の 2 次元で動いている。崩壊は基本的に斜面下方向である X 軸正方向の漸増あるいは急増となっているが、ところどころ負の方向へ向っている箇所があり、特異的なノイズか、地盤の動きかどうかは X 軸だけでなく Y 軸方向の動きと合わせてとらえてみるのが考えられる。傾斜角は大きく変位した後にしばらく安定状態が続き、再び降雨などによって急変位する。K - 3 の場合、急変位したところから次に急変位する直前までを一つのグループとすると 3 つの部分 (同図 A、B、C) に分かれ、変位は階段状に進んでいる。

X 軸・Y 軸の傾斜角をプロットしたものを図 4 - 4 5 に示す。プロットの密度の少ないところが大きく変位した部分であり、図 4 - 4 4 に対応する 3 つの領域に分けられる。大変位するときは - 30 度方向に動き、その 180 度反対方向にリバウンド的にグループ毎に 1 回変位があり、大変位と大変位との間は + 15 度方向へ少しずつ変位が進んでいる。斜面傾斜方向の変位を最も注意しなければならないが、X 軸変位が止まったからといっても Y 軸方向の変位にも留意する必要がある。

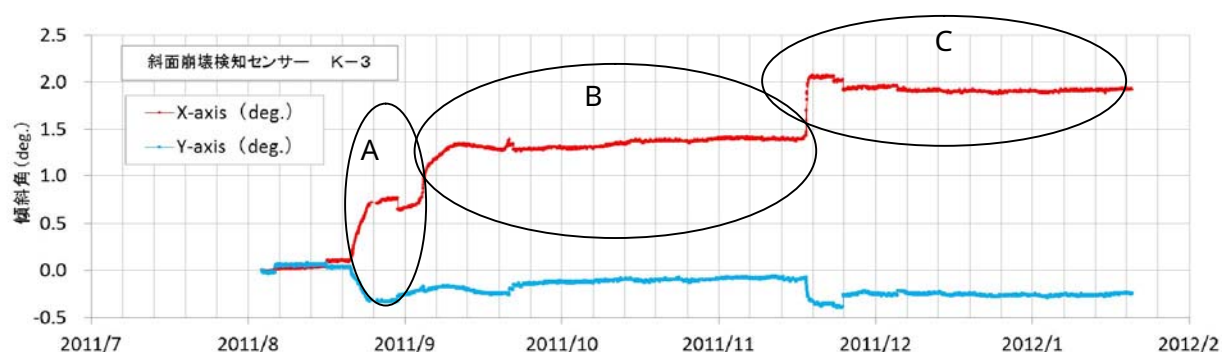


図 4 - 4 4 X 軸と Y 軸の傾斜変位 (センサー K - 3)

斜面の上から見て左下方向が正

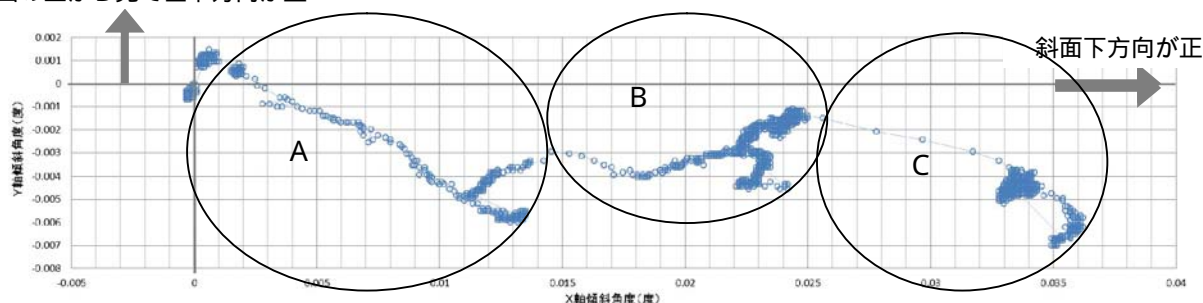


図 4 - 4 5 水平座標および傾斜角による 2 次元の動き (K - 3)

図4-46に斜面崩壊検知センサーの傾斜角変位の速度変化を示す。傾斜角は、図4-43でわかるように時間雨量15mm程度の降雨、あるいは、体積含水率35%程度になると動き始め、そのときの傾斜角変位速度は $0.006 \sim 0.079^{\circ}/\text{hour}$ 、継続時間で半日～3日間ほどの変動が観測され、それぞれ変動後は安定状態に移行した。

斜面上部に設置した伸縮計(S-1)と、末端部の斜面崩壊検知センサー(K-3)および伸縮計(S-2)との動きを比べると、下図に示すように8月21～25日頃、9月4～5日、11月19日の3回滑動した中で末端部の方が上部に設置したものより、それぞれ27時間、13時間、10時間早く変位を観測した。理由としては、K-3を設置した場所は移動土塊の凸部に位置しており、変位を検知しやすい場所であることと、傾斜計(No.3、図4-48(c)参照)でみられるように、すべり線が深部と浅部に2つあり浅部のすべりの末端部に位置して変形を受けやすい位置であったことが考えられる。今回、深部のすべりの末端部には設置していないが、孔内傾斜計(No.4、図4-48(d)参照)の動きをみると、地表面に近いところは斜面傾斜とは逆方向に傾いており、斜面末端部への設置事例を増やし崩壊メカニズムとの関係を調べていく必要がある。

崩壊斜面の亀裂をはさんで上側に設置した斜面崩壊検知センサー(K-1)、および、亀裂の下側に設置した同センサー(K-2)には観測機間中ほとんど動きが見られなかった。K-2に関しては、すべり面に沿って平行移動したため変位を検知できなかった可能性が考えられる。

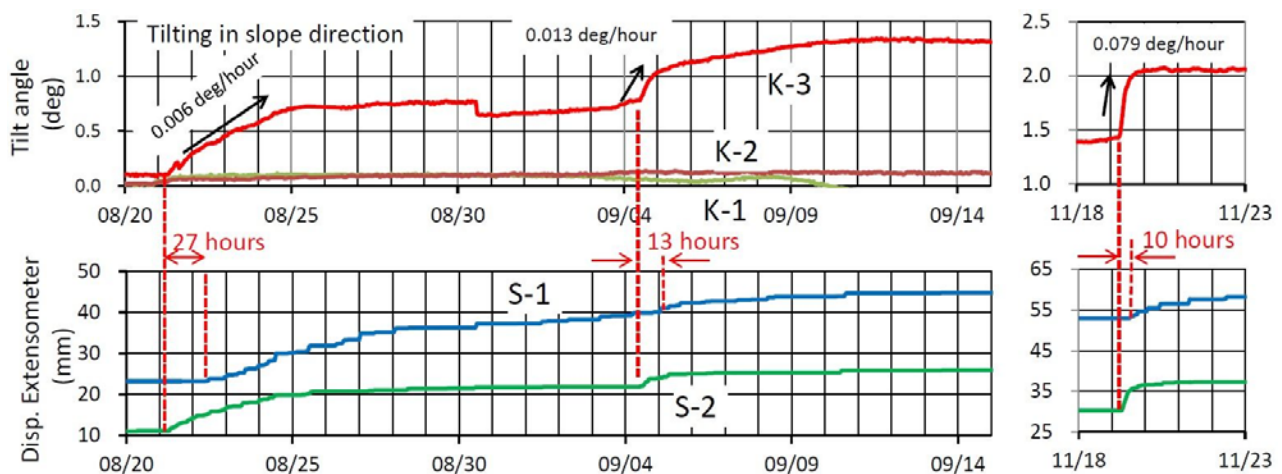


図4-46 斜面崩壊検知センサーの傾斜角変化⁹⁰⁾

3) 伸縮計の観測結果

図4-47に平成23(2011)年7月17日～8月31日までの伸縮計の観測結果を示す。まとまった降雨後に変位が発生する傾向がうかがえる。No. S-2の滑動開始の約28時間後にNo. S-1が滑動開始した。No. S-3の変位量は、No. S-1よりも小さい。変位は断続的であり、No. S-1ではまとまった降雨の約10日後まで、No. S-2では約5日後まで継続した。

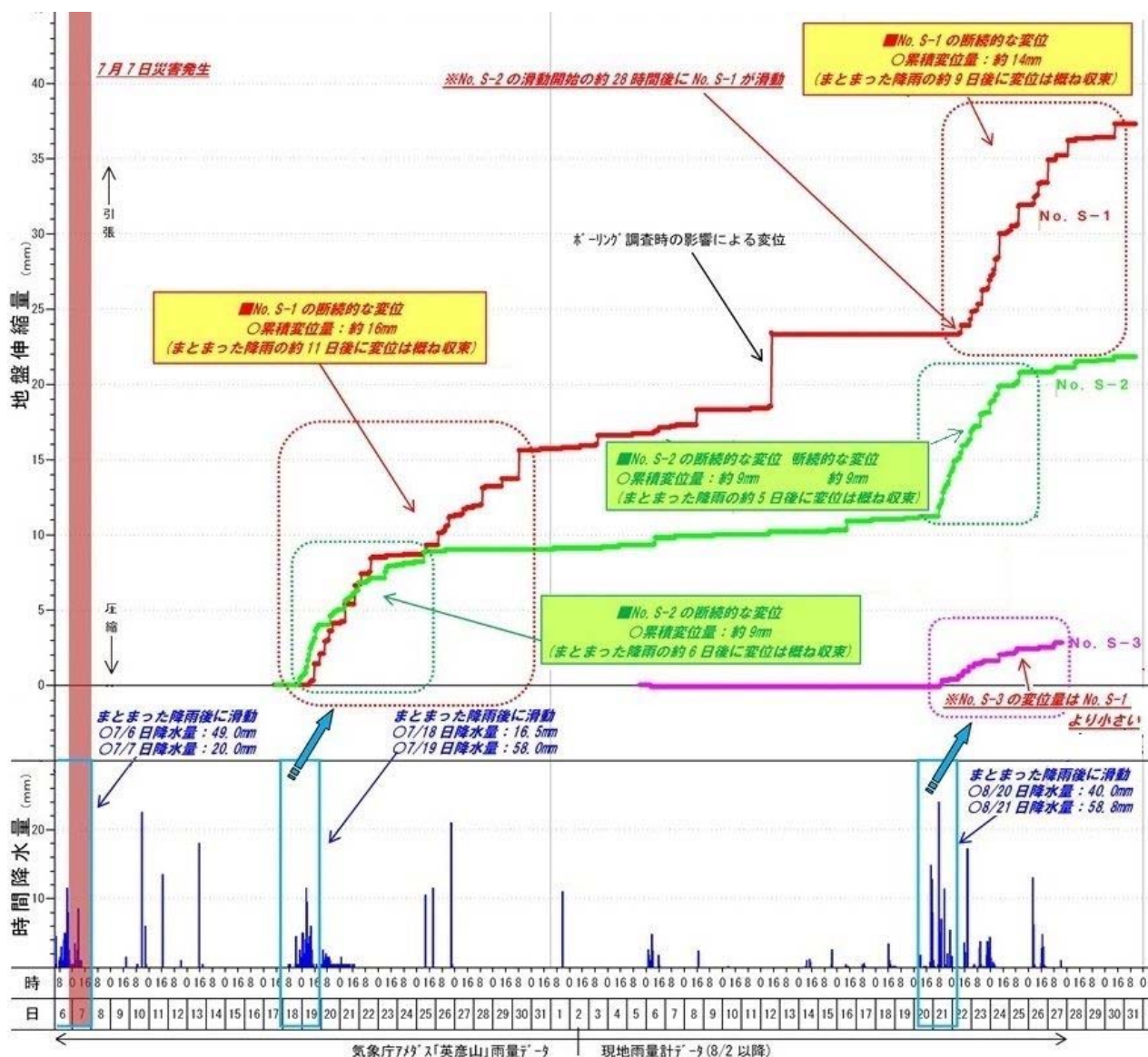


図4-46 伸縮計観測結果の概略

4) 孔内傾斜計の観測結果

孔内傾斜計の観測結果を図4-48に示す。

変位形態は、地すべり変位特有の「せん断変位」ではなく、浅部ほど変位量大きい「弓型変位(クリープ変位)」を示した。

変位量は地すべり土塊の冠頭部(No. 2)では大きく、末端部(No. 4)に行くにつれ小さくなる。

No. 2、No. 3のX方向とY方向の変位から、浅い部分と深い部分にそれぞれ2箇所ずつのすべり面が認められる。

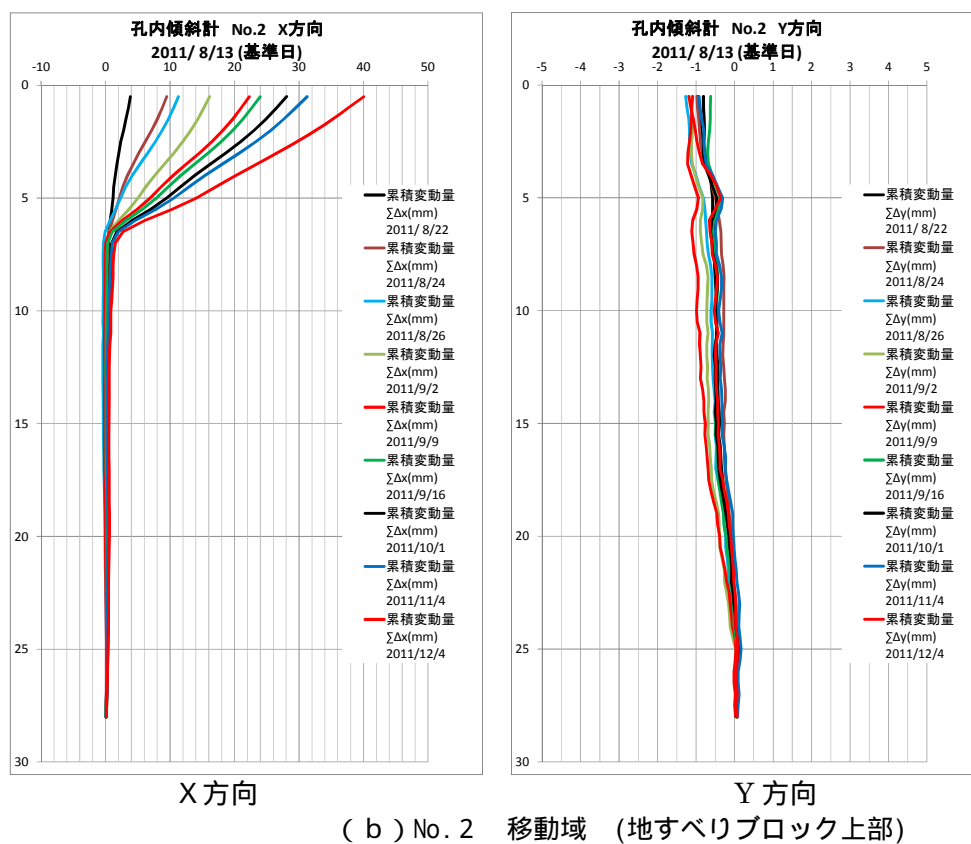
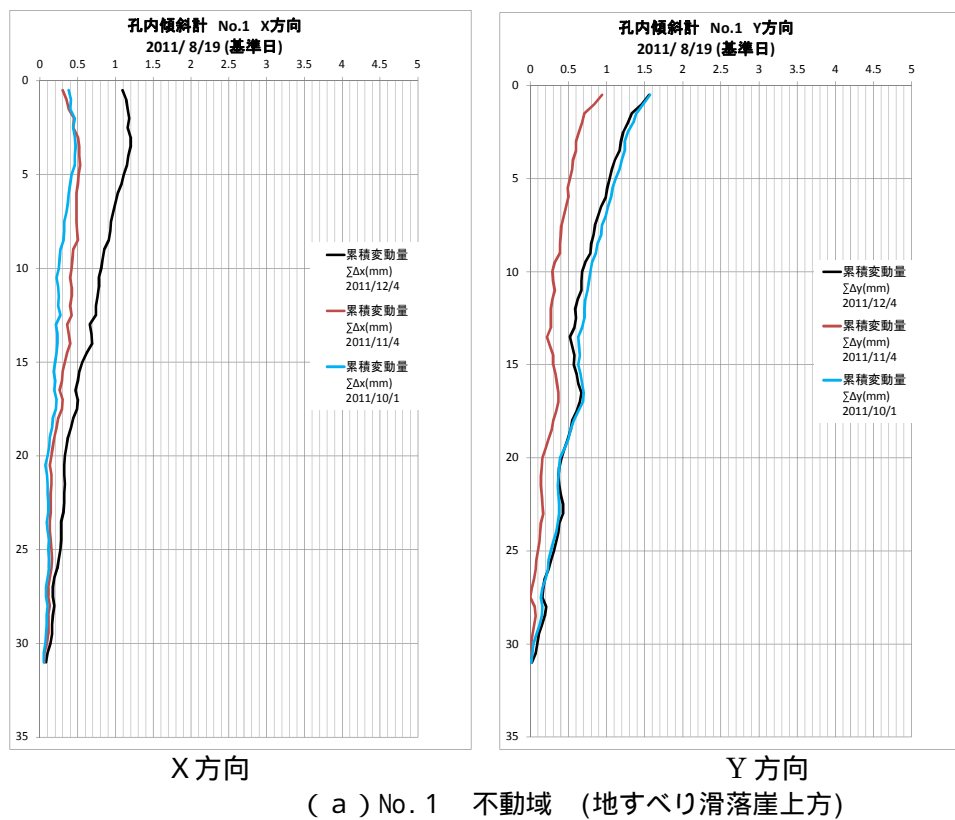


図 4 - 4 8 孔内傾斜計観測結果図 (累積変動図)
(次頁につづく)

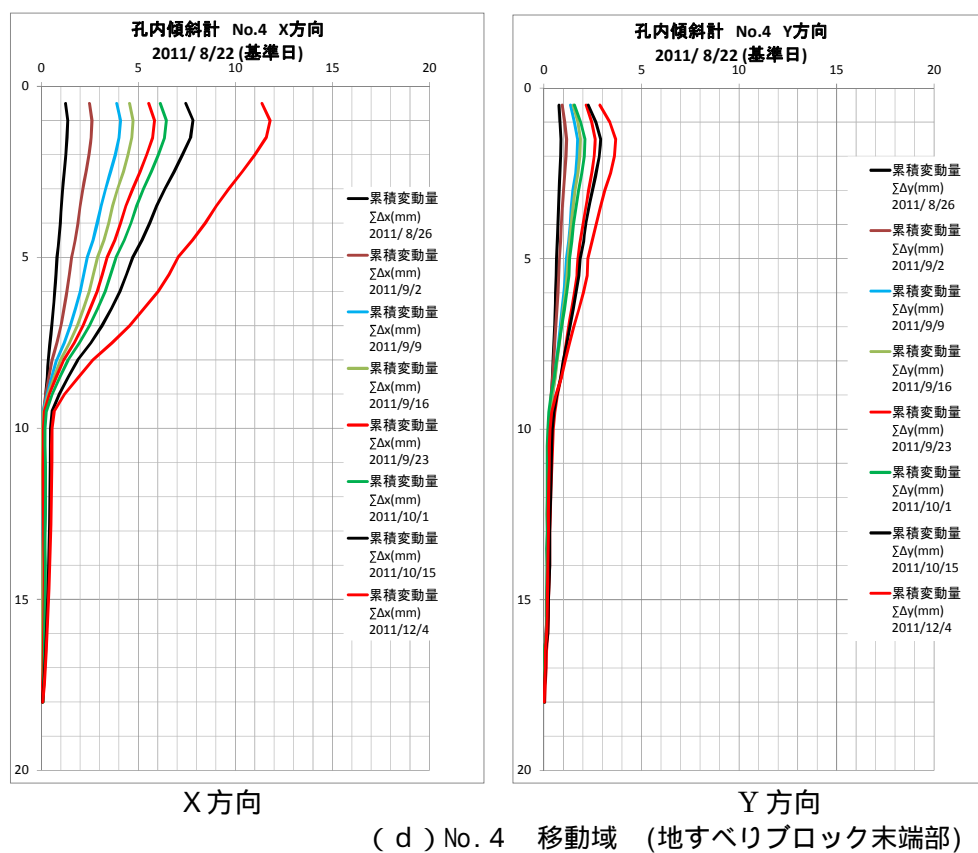
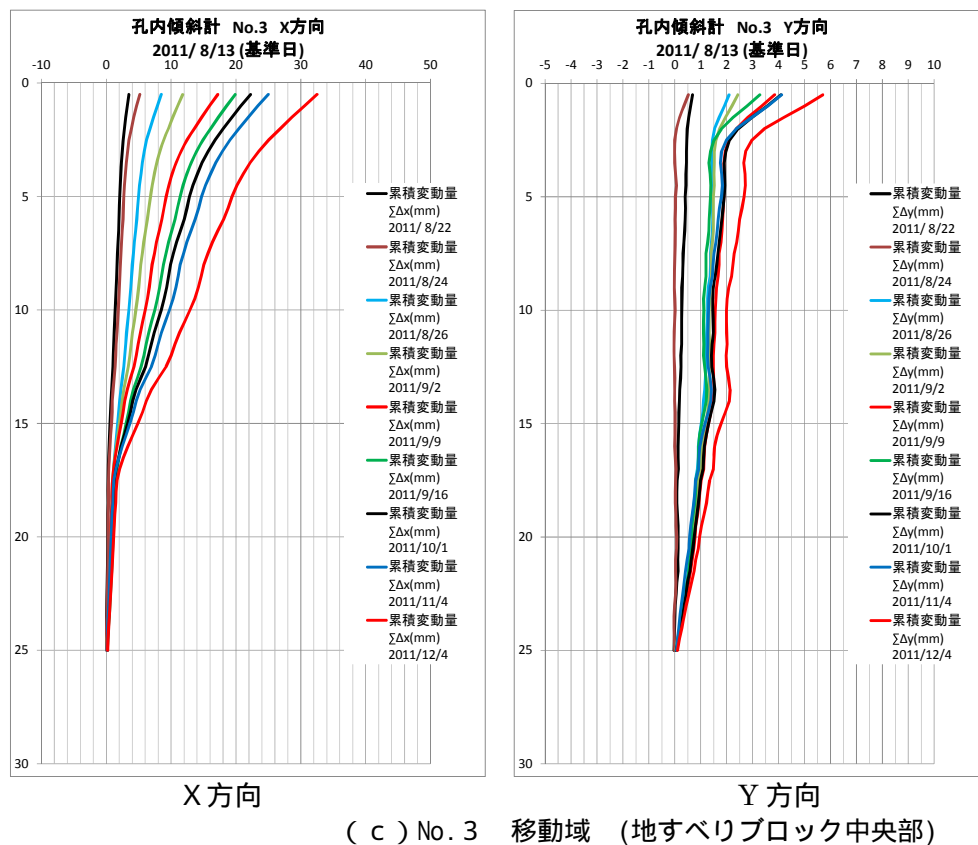


図 4 - 4 8 孔内傾斜計観測結果図 (累積変動図)

4.6.4 地すべりの滑動メカニズム

被災斜面には、上部段差に断層破碎帯が通過すると想定され、その想定断層破碎帯に沿って3箇所の湧水も観察された。現在滑動中の地すべりは、孔内傾斜計の観測結果（図4-48）から深層すべりと浅層すべりの2ブロックがあると考えられる。図4-49に孔内傾斜計変位に基づく地すべり滑動メカニズム想定断面図を示す。

地すべり滑動メカニズム想定断面図（S=1:400）

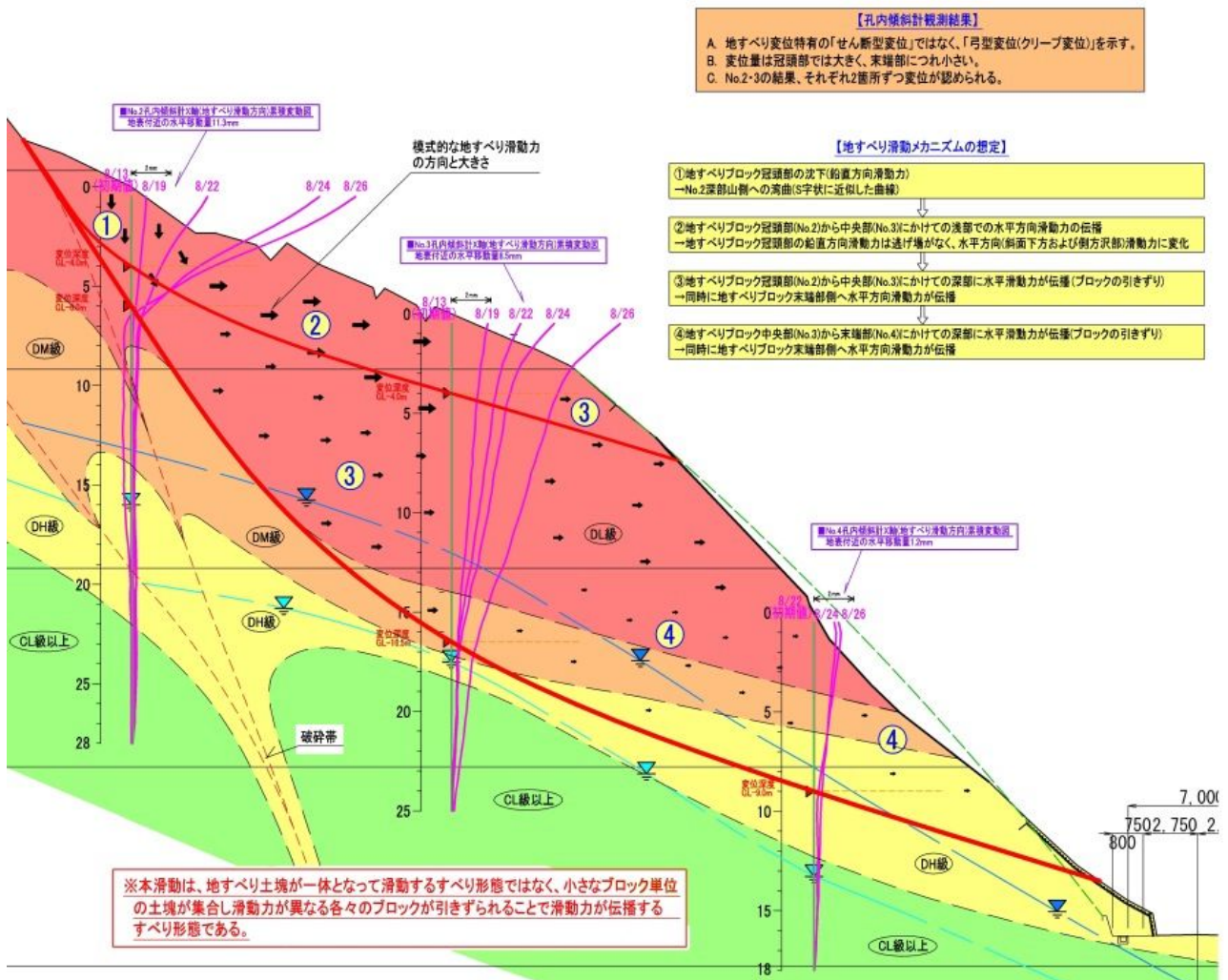


図4-49 地質断面図（縮尺：任意）

4.6.5 斜面崩壊検知センサーと他の観測機器との比較

1) 斜面崩壊検知センサーと伸縮計との比較

図4-50に斜面崩壊検知センサーと伸縮計の位置と地質横断面を示す。図4-43(a)斜面崩壊検知センサー、および、(b)伸縮計の観測データから、崩壊箇所の下端部に設置した斜面崩壊検知センサーK-3と、崩壊箇所上端部の滑落崖を挟んで設置した伸縮計S-1の挙動が顕著であり、雨量に敏感に反応する結果が得られた。また、両者は非常に類似した変形挙動を示すこともわかった。

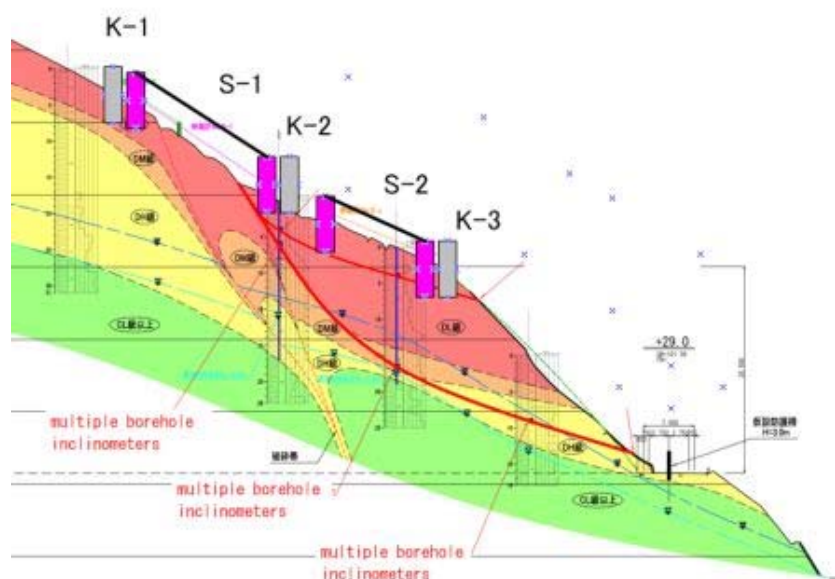


図4-50 伸縮計、傾斜計センサーの設置位置

図4-51は、斜面崩壊検知センサーK-3から得られた傾斜角を縦軸に、伸縮計S-1から得られた変位量(伸び量)を横軸にとり、同じ時刻における両者の関係をプロットしたものである。同図に示すように、伸縮計の値の動きが安定した時刻には、傾斜角と伸縮計の変位量は線形関係にあることが認められる。しかし、同図において、11月18日の雨の降り始めから16時間(連続降雨量が98mm)の間に、K-3から得られた傾斜角は急激に増加するのに対して、伸縮計の変位増加はほとんど認められず、傾斜角変位が落ち着いた後に伸縮計が伸びる様子がみられる。伸縮計の変位量は傾斜角の増加が安定した16時間後から漸次増加し始め、伸縮計の変形挙動に明瞭な時間遅延が認められた。

当該斜面の斜面崩壊に伴う変形挙動は、先ず末端部より変形が始まり、頭部へひずみが進むようなメカニズムになっていると推定され、斜面崩壊検知センサーK-3と伸縮計S-2の関係をまとめた図4-51からも同様の動きを読み取れる¹⁰⁰⁾。すなわち、斜面の変形が末端部より順次上部へ伝達されるような崩壊メカニズムの場合、斜面崩壊検知センサーを崩壊部の末端に設置することにより、上端部(亀裂部)にある伸縮計よりも早く崩壊の予兆を察知でき有効であると考えられる⁹⁶⁾。本サイトのよう厚い風化土層があり退行的な崩壊の場合では、斜面中央部や凸部、末端部への設置によってより早期に変状を把握できるものと思われる。

図4-52に、ほぼ同位置に設置した斜面崩壊検知センサーK-3と伸縮計S-2の比較を示す。こ

こでも傾斜計の方が伸縮計よりも早く変位する傾向がみられる。ここで、傾斜角については、斜面崩壊検知センサーを設置した地点直下の傾斜変化を直接読み取っているが、伸縮計の場合はインバー線を引っ張った2点間の相対的変位を読み取っている。このため、伸縮計の測定値の方が、傾斜変位よりも鈍く反応する可能性があり、それが時間的な遅れになって現れている可能性がある。

一方、凹部について、今回の斜面のように最初に崩壊後に若干の凹部がみられ、そこでの孔内傾斜計 No.4 (図4 - 48 (d)) の動きからは一概に地表面付近の傾斜変位がどのようにとらえられるか明確ではない。今後、設置事例を増やして検討して行く必要があるだろうが、崩壊が並進的な動きであっても崩壊土塊が全体的に滑動する場合、滑落崖付近の頭部に比べて末端部に圧縮域が発生し傾斜変位をとらえる可能性は高いと考えられる。伸縮計では亀裂などのあきらかな変状が設置に必要であり、斜面崩壊検知センサーの設置は凸部、中央部ほか危険性のある箇所に簡便に設置できる点で、どこがずべるかわからないような斜面でも有効に計測できると考えられる。

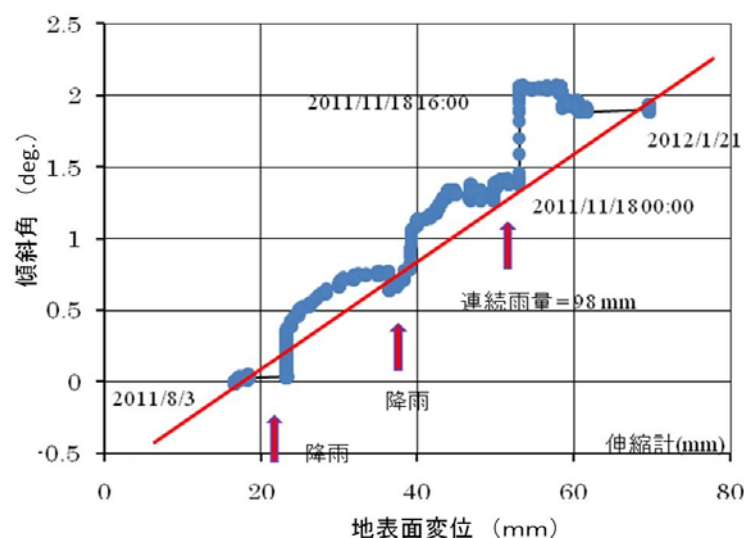


図4 - 51 斜面崩壊検知センサー (K-3) の傾斜角と伸縮計 (S-1) の地表面変位の関係

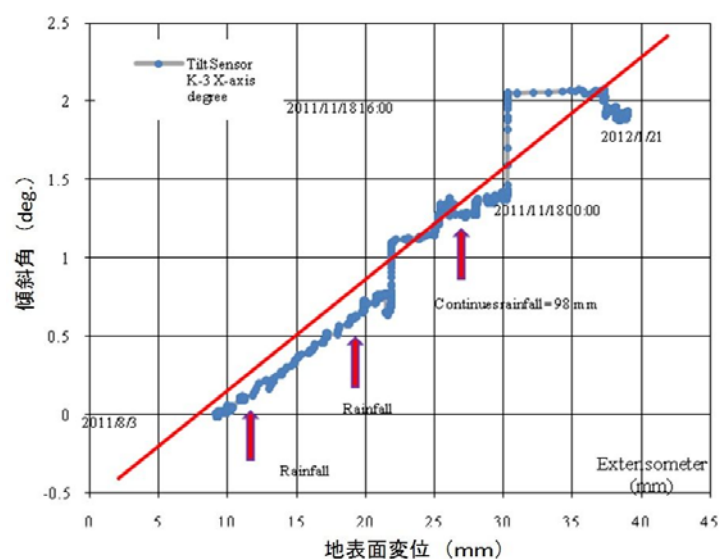
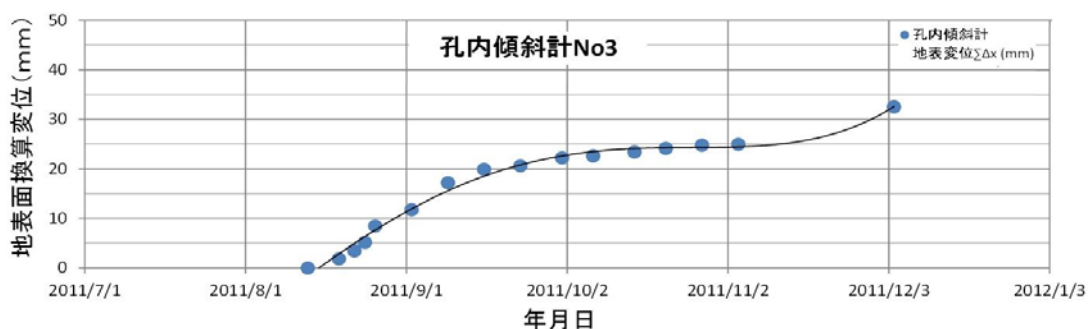


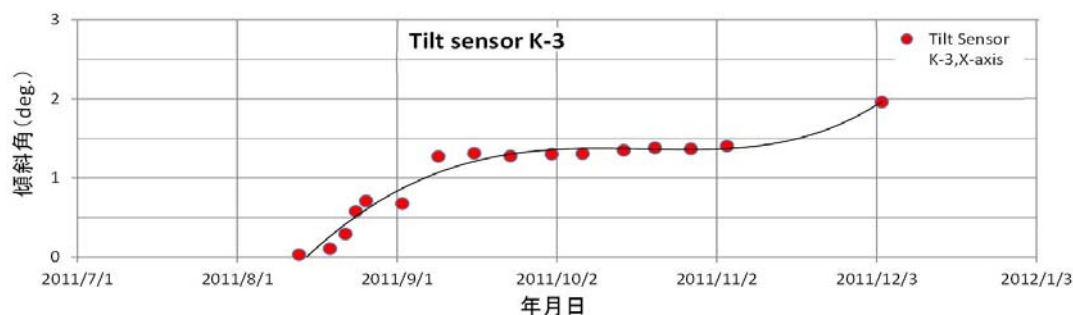
図4 - 52 斜面崩壊検知センサー (K-3) 傾斜角と伸縮計 (S-2) 地表面変位の関係

2) 斜面崩壊検知センサーと孔内傾斜計との比較

図4-53に示すように、孔内傾斜計の地表面換算変位（mm）と斜面崩壊検知センサー（傾斜計）の変位（度）は概ね同様の動きを示した。両者の変位は図4-54にみられるように、ほぼ直線関係（勾配 = 0.0601）になり、斜面崩壊検知センサーの変位計測に基づいて警戒警報を発信するシステムが有効であると認められる。



(a) 孔内傾斜計 (No.3)



(b) 斜面崩壊検知センサー (K-3)

図4-53 斜面崩壊検知センサーと孔内傾斜計の推移

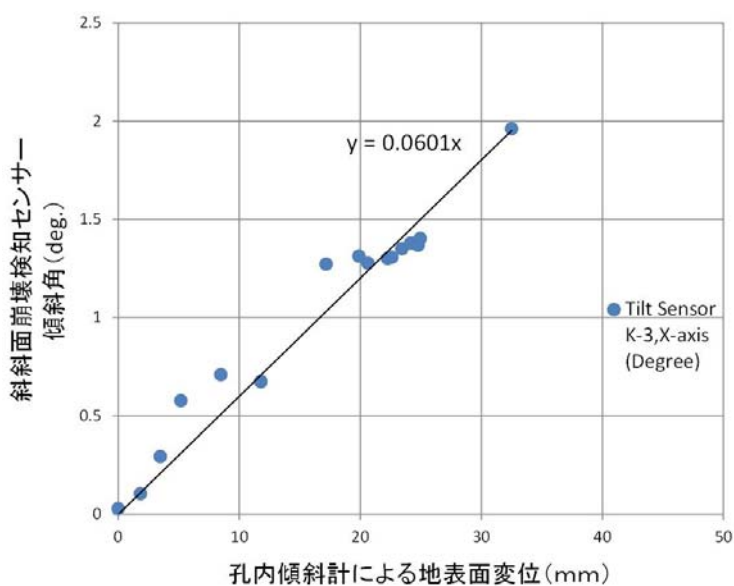


図4-54 斜面崩壊検知センサーの傾斜角と孔内傾斜計の地表面変位との比較

4.6.6 まとめ

被災した国道脇の斜面崩壊の復旧現場において試験を行った結果、観測期間中の主に降雨によって反応した斜面崩壊検知センサー（傾斜角変位）、および、土壌水分計（体積含水率）の情報を無線通信を介してリアルタイムに遠隔地に伝送することにより、斜面動態を遠隔で検知し、それに基づいて安全な通行確保と復旧工事に寄与することができることを確認した。

斜面崩壊検知センサーの傾斜角と孔内傾斜計の地表面変位との間には相関性が認められた。また、崩壊メカニズムがわかっている状態では斜面崩壊検知センサーを斜面凸部やすべり面末端部へ設置することにより、伸縮計よりも 10～20 時間余り早く変位を検知することを確認した。

本サイトの傾斜角変位速度は最大でも 0.079deg/h であった。これは崩壊の危険性の目安となる 0.1deg/h 以下であり、最終的に斜面は安定する方向に向かった。

4.7 切土工事における安全確保への適用

4.7.1 現地状況

平成22(2010)年8月から行われた山形県酒田市内の高規格道路建設に伴う高さ約20mの切土掘削工事において、法面の安全を監視した。図4-55の法面平面図の中で、斜面崩壊検知センサーは法面最頂部に3個(K-1～K-3)設置した。地質は、新第三紀の砂岩層で、斜面に斜交する流れ盤であった。写真4-9に機器設置前の現地写真を示す。

斜面崩壊検知センサーK-1を設置した斜面において、図4-56に示すように、標準勾配で掘削開始後2ヶ月で計画高まで掘削完了した頃から検知センサーの傾斜角度が徐々に増加した。これにシステム監視者が気づき、現場サイドにて緊急点検を行った結果、法肩にわずかであるがクラックを発見し、同図にあるように押え盛土を施工した。

クラック発見から施工が開始するまでの間に、現場のクラックの開口と小段の凹凸が進行し、それに伴って傾斜角も増加したが、施工が進むにつれて変状は停止し、崩壊には至らなかった。その後、ボーリング調査ですべり面等の断面形状を確認し、最終的な対策工としてはアンカー付き法枠工の逆巻き施工を行い、安全に工事を終了できた。

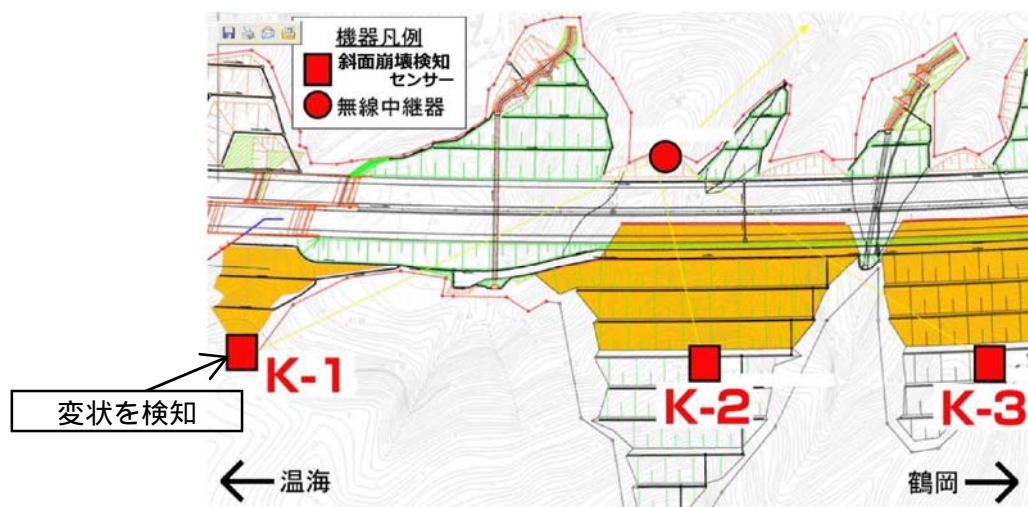


図4-55 設置位置



写真4-9 機器設置前の現地写真

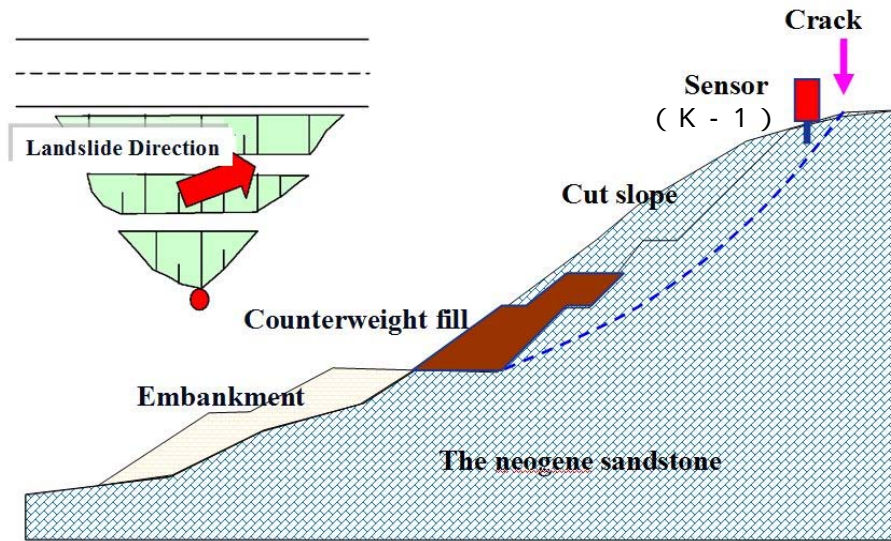


図4 - 5 6 切土工事の断面図および平面図（K - 1 地点）

4 . 7 . 2 傾斜角変位の異常と対策

図4 - 5 7 に示す時系列グラフでは斜面直交方向への傾斜増加が確認できるが、当該地の地質は層理面が斜面に70～80°で斜交する流れ盤構造（法面の最大傾斜方向における層理面のみかけの傾斜が10°程度の流れ盤）となっており岩盤すべりと見られた。掘削開始後、10月10日には0.1°程度まで傾斜の累積が進行したが、これは掘削に伴う地山の緩みを捉えたと判断していた。しかし、10月17日に計画断面まで切土掘削完了後も斜面直交方向の傾斜変位は停止せず、10月18日には傾斜速度が0.0014deg/hへ増加し、緊急点検を行った結果、法肩に変状（クラック）を発見した。10月18日～19日にかけて傾斜角変位速度が、0.0014deg/h、さらに0.006deg/hへと加速・進行していく中で、押え盛土を施工、10月20日に施工終了し変状の進行がストップした。その後、恒久対策としてアンカー付法枠工を施工した。

このように傾斜変位が、大凡の目安として、0.01°/day（0.00042deg/h）を超えると点検が必要と考えられ、0.1deg/hに近づくといつ崩壊してもおかしくはない危険な状態と考えられる。今回、法面変状の予兆を発見し緊急対策を講じたため、工事の安全が確保され、全体工事費の増加や工程遅延を最小限に済ませることができたものと考えられる。

図4 - 5 8 に8月1日～10月20日までの気象庁の山形県酒田の降雨記録を付ける。9月11日～23日にかけて累積307.5mmの降雨があり、10月4日から10月17日にかけて断続的に累積133.5mmの降雨があった。降雨期以外に工事が行われていたとすれば、降雨による表層地盤のゆるみと工事掘削による末端部での応力解放の両方の要因が重なって地盤内のひずみが増大したものと考えられる。

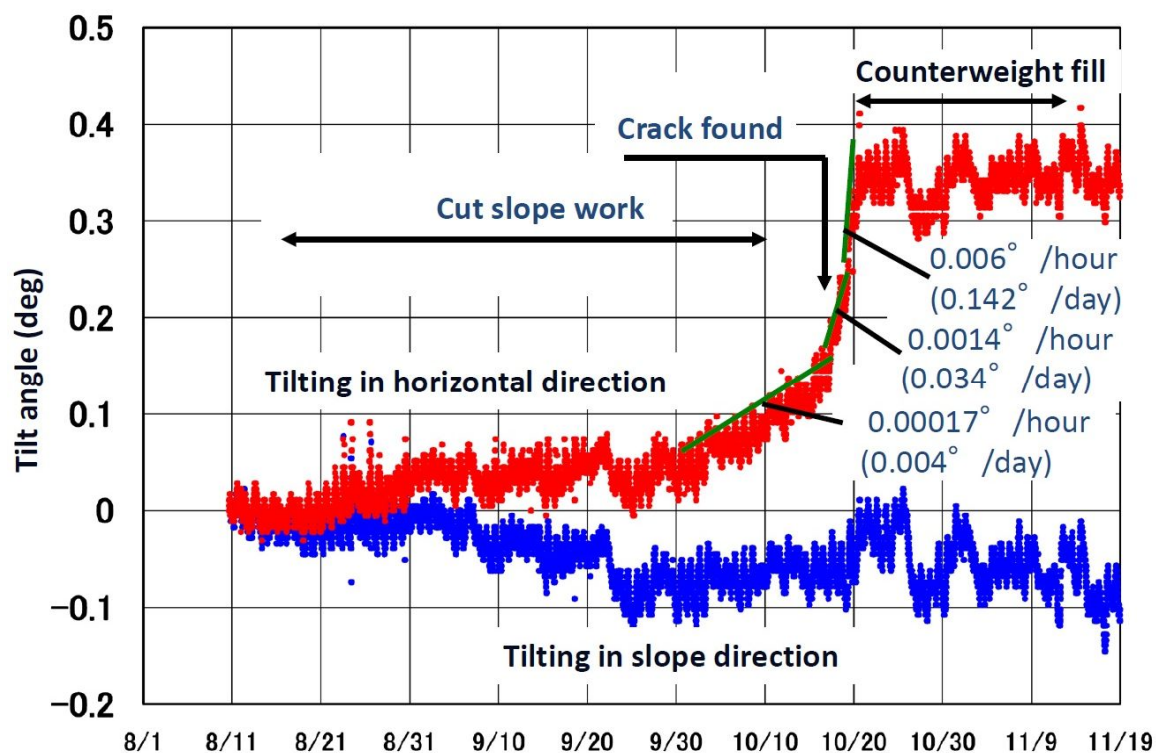


図4 - 5 7 施工期間中の傾斜角度変動^{9 0)}

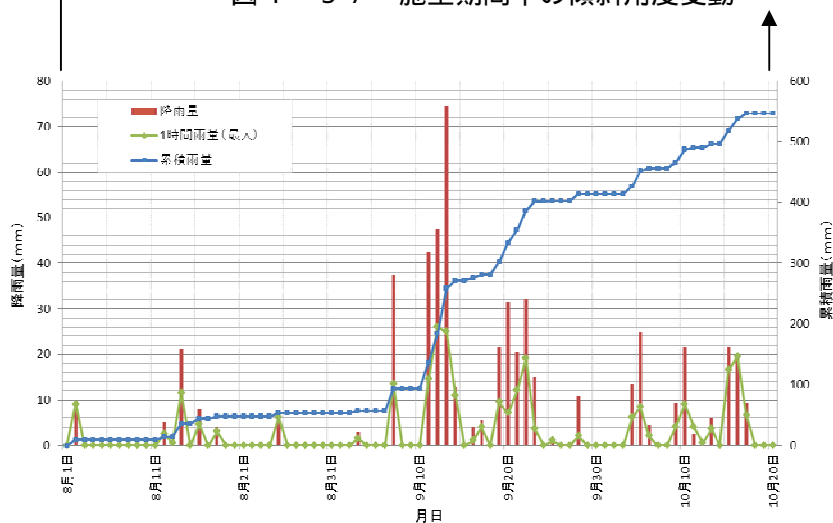


図4 - 5 8 平成22年10月の山形県酒田の降雨（気象庁データ）

4 . 7 . 3 施工中の斜面監視の有用性

この切土工事の監視事例において、斜面崩壊検知センサーと観測システムの設置位置により崩壊斜面を部分毎に監視することが可能であり、復旧工事や法面の掘削工事などにおいて、一次および二次災害防止のための工事での施工管理と安全確保、スムーズな復旧の支援に有効^{9 6)}であることがわかった。

また、種々の地質に応じた工事事例の整理や、崩壊の予兆となり得る傾斜角変位についてのデータ蓄積が進めば、地山の地盤状況が不明確な場合や、地盤が不良な場合における二次災害防止や工事の安全確保において十分適用性が認められる^{9 5)}ものと考えられる。

図4 - 5 9 は、元データから1時間移動平均、および、24時間移動平均をとりスムージングを行った

ものである。実際の施工管理や安全管理では、移動平均などにより自動的なノイズ処理を行い、傾斜計の変位を読み取りやすくする必要がある。

本サイトでは法面下部から計画面まで切土工事を行っていくため、最初から最上部法肩にセンサーを設置した。切土など掘削法面の監視では、工事の進捗に応じて、観測機器を適切な位置に頻繁に付け替える必要が生じるだろう。安価で簡便に設置できるという特長とともに、インターネットを介するだけでなく、現場作業員へ直接動態や変状を通知し、警報を鳴らすような仕組みも必要と考えられる。工事現場では計器のメンテナンスをしやすいので、より短いサンプリングタイムで工事期間中だけ監視する仕組みや、夜間でも小さな崩壊を検知できるように法尻側に設置するような計器も考えられる。現時点で現場での機器設置やシステム管理をある程度熟練した技術者が行っているが、土壤水分計をはずすなど機能を単純化するとともに、異常発生時の対応マニュアルを整理し、まったくの初心者でも扱えるようにすることも考える必要があるかもしれない。

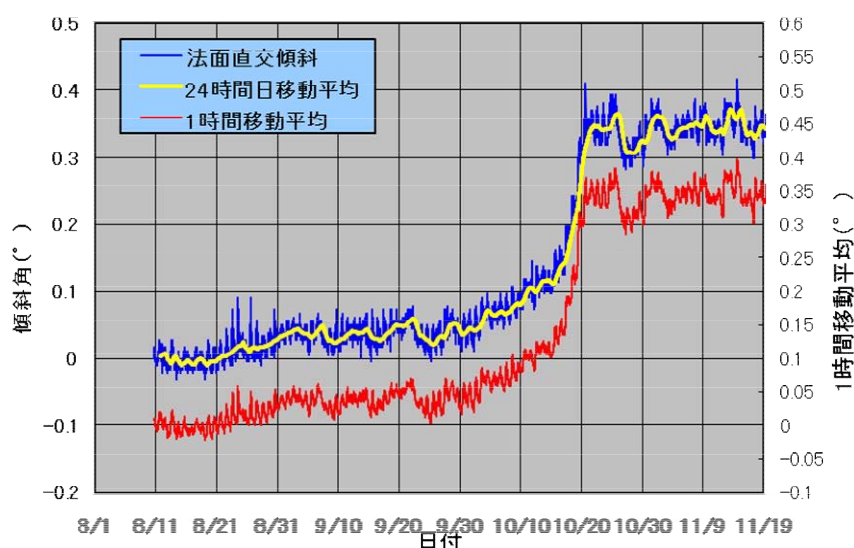


図 4 - 5 9 傾斜角変位の移動平均による整理

4 . 7 . 4 まとめ

高規格道路の切土工事斜面の傾斜変位を監視し、工事が計画断面まで掘削完了後に傾斜変位の異常を検知した。現場へ連絡し、抑え盛土工を行った結果、変状を止めることができ工事の安全を確保したことを確認した。

切土掘削の進行とともに傾斜角変位速度が徐々に増大していき、 0.0014deg/h を超えて法肩にクラックを発見し、その後も速度が加速し、 0.006deg/h まで増加したが、抑え盛り土の施工で変状を止めることができた。傾斜変位速度の目安として 0.01deg/d を超えるとクラックの危険があり、 0.1deg/h を超えると崩壊の危険があると類推される。

斜面崩壊検知センサーは、ある程度長期に設置し監視することを想定しているが、施工期間中の安全管理に用いるためには、安価・設置の容易さ・リアルタイム・遠隔監視などのほかにさらに現場で使い勝手がよくなるような改善を行っていく必要があるとみられる。

4.8 設置実績

日本における斜面崩壊検知センサーの設置場所を図4-60に図示する。また、日本および中国における設置場所、監視対象、設置数などのリストを表4-4に示す。平成27年1月現在までに本論文に掲載した場所を含めて、64ヶ所（国内61ヶ所、中国2ヶ所、台湾1ヶ所）にデータロガー72機、斜面崩壊検知センサー696機、小型孔内傾斜2機、センサーノード4機を設置し観測を行った。

寒冷地としては、札幌市（最低気温-7 程度）、および、釧路市（同-10 程度）にて冬期期間に動作試験を行い、適応性を確認した。また、山形県小国村では積雪2mの中で観測を行ったほか、宮城県荒砥沢ダムサイトでは冬期を含め長期観測を行った。

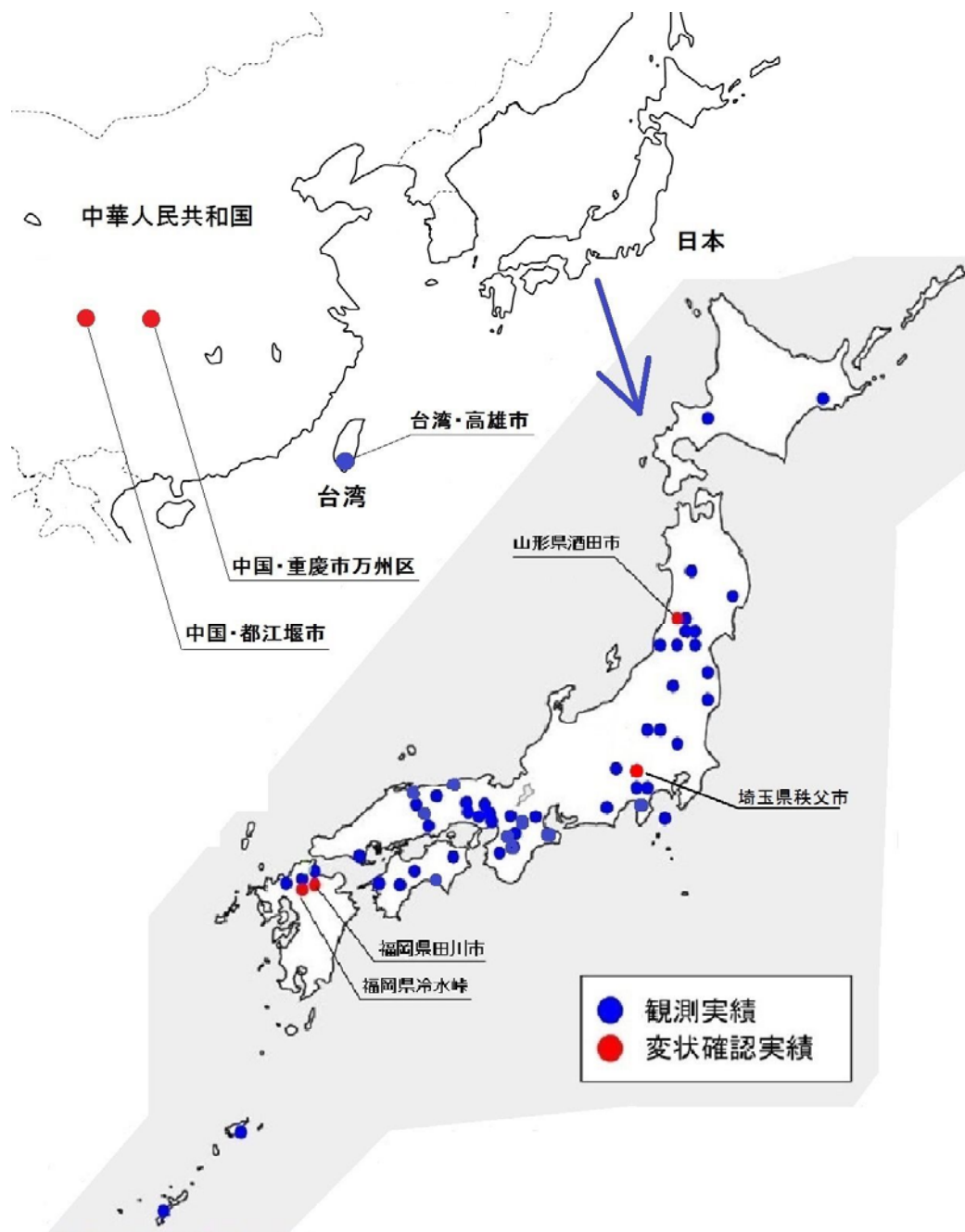


図4-60 斜面崩壊検知センサーの設置実績（国内および海外）

表4 - 4 早期警報システムの設置場所など（国内および海外）

	設置年度	設置場所		監視対象	目的構造物など	早期警報システム				備考、その他の設置機器
						デフォーカス観測システム	傾斜センサー	小型孔内傾斜計	センサーノード	
1	H20	京都府	福知山市	道路脇河道斜面監視	道路（国道）	1	2	0	0	伸縮計1、カメラ1、雨量計1、孔内傾斜計、温度計
2	H20	宮城県	栗原市	深層崩壊斜面監視	荒砥沢ダム貯水池	1	10	0	0	
3	H20-H22	中国	重慶市万州区	地すべり監視	地すべり対策	1	4	0	0	
4	H20～現在	兵庫県	神戸市六甲山	斜面監視	砂防対策	1	122	0	0	
5	H21	福岡県	福岡市	地すべり監視	下水処理場	1	3	0	0	
6	H21-H22	福岡県	飯塚市（冷水峠）	切土法面監視	道路（国道）	2	8	0	0	
7	H21-H25	兵庫県	神戸市六甲山	表層崩壊監視	砂防対策	2	122	0	0	水位計1、流量計1
8	H22	栃木県	日光市	貯水池斜面監視	ダム	1	2	0	0	水位計1
9	H22	高知県	土佐郡大川村	斜面監視（表層崩壊）	砂防対策	1	21	0	0	
10	H22-H23	兵庫県	神戸市六甲山	斜面監視	砂防施設	0	0	1	0	傾斜センサーを介し中継
11	H22-H23	鳥取県	日南町	斜面転石監視	鉄道	2	10	0	0	
12	H22-H23	静岡県	小山町	掘削斜面監視	ダム堤体	2	11	0	0	
13	H22-H23	山形県	酒田市	切土法面監視	道路	2	6	0	0	
14	H22-H25	中国	成都市都江堰市	地すべり監視（研究を含む）	地すべり対策	1	40	1	0	
15	H23	兵庫県	朝来市	道路脇斜面監視	道路	1	9	0	0	伸縮計2
16	H23	福島県	いわき市	盛土法面監視	発電所	1	6	0	0	
17	H23	福岡県	京都郡みやこ町	切土法面監視	ダム取付道路	1	3	0	0	雨量計1
18	H23	山梨県	富士川斜面	斜面崩壊監視	砂防斜面	0	38	0	0	
19	H23	山形県	小国村	地すべり監視	地すべり対策	1	5	0	0	積雪2m、伸縮計1
20	H23	群馬県	利根川（砂防）	斜面監視	砂防対策	1	3	0	0	
21	H23	沖縄県	沖縄市	斜面監視	道路（国道）	1	5	0	0	
22	H23	岡山県	倉敷市	根切掘削監視	架道橋	1	11	0	0	
23	H23	埼玉県	熊谷市	堤防掘削監視	河川堤防	0	4	0	0	
24	H23	福島県	いわき市	小学校校庭被災法面監視	自然斜面	1	5	0	0	
25	H23	北海道	釧路市	寒冷地での適用試験	-	1	1	0	0	冬期（最低気温-10 程度）
26	H23	北海道	札幌市	寒冷地での適用試験	-	1	1	0	0	冬期（最低気温-7 程度）
27	H23	鹿児島県	奄美市	自然斜面	集落、道路	3	9	0	0	
28	H23	宮城県	仙台市	切土法面	住宅	1	3	0	0	
29	H23-H24	山口県	岩国市	斜面監視	家屋	1	3	0	0	カメラ
30	H23-H24	兵庫県	三木市	造成地切土斜面監視	最終処分場	3	9	0	0	
31	H23-H24	福岡県	田川郡添田町	道路脇法面（二次災害）	道路（国道）	5	12	0	0	本研究／伸縮計12、カメラ4、雨量計5
32	H23-H24	山形県	月山	集水井工事監視	地すべり対策	3	11	0	0	伸縮計1、雨量計3、温度湿度計1
33	H23-H25	静岡県	富士宮市	導水路脇斜面監視	発電所導水路	1	38	0	0	沈下計7
34	H24	兵庫県	神戸市	近接共同溝への影響監視	大学病院	1	8	0	0	振動計1
35	H24	福島県	喜多方市	貯水池斜面監視	発電用ダム	1	11	0	0	水位計1
36	H24	奈良県	吉野郡川上村	斜面監視	農地	-	2	0	0	回転灯、スピーカ
37	H24	奈良県	金峯山寺	石垣監視	寺（世界遺産）	1	5	0	0	
38	H24	山形県	月山	斜面監視	道路	1	4	0	0	雨量計1
39	H24	三重県	伊賀市	-	-	-	3	0	0	
40	H24-H25	奈良県	北葛城郡河合町	鉄道脇法面監視	鉄道（私鉄）	2	8	0	0	
41	H24-H25	鳥取県	日野郡日南町	鉄道脇斜面監視	鉄道	0	10	0	0	
42	H25	鳥取県	米子市	橋脚河川水位監視	鉄道橋	1	2	0	0	
43	H25	鳥取県	鳥取市	近接施工監視	専門学校	0	2	0	0	
44	H25	大阪府	高槻市	鉄道橋梁工事に伴う変位監視	鉄道（東海道線）	1	4	0	0	
45	H25	静岡県	御殿場市	切土掘削斜面監視	ダム	1	3	0	0	
46	H25	新潟県	村上市	掘削斜面監視	河川	1	2	0	0	
47	H25	秋田県	仙北市	法面監視	発電所	1	3	0	0	
48	H25	山形県	西川町	集水井工事監視	地すべり対策	1	2	0	0	雨量計1、土流センサー1、酸素濃度計1
49	H25	岩手県	住田町	掘削斜面監視	砂防対策	1	2	0	0	
50	H25	岡山県	高梁市	道路災害箇所監視	道路（県道）	1	2	0	0	伸縮計3
51	H25	高知県	安芸市黒島谷川	砂防ダム工事斜面	砂防工事の安全	1	4	0	4	うち傾斜センサーとセンサーノードの兼用器1
52	H25-H26	兵庫県	朝来市	ダム湛水に伴う地すべり監視	ダム貯水池	1	8	0	0	伸縮計4、歪計2、カメラ1、雨量計1、水位計3、埋設型傾斜計
53	H25-H26	東京都	大島町	土石流発生斜面監視	被災斜面	1	20	0	0	伸縮計1、カメラ1、雨量計1
55	H26	岡山県	高梁市	地すべり監視	地すべり斜面	1	2	0	0	伸縮計4
56	H26	静岡県	三島市	導水路脇斜面監視	導水路	1	3	0	0	沈下計1
57	H26	三重県	鳥羽市答志島	斜面掘削監視	-	1	3	0	0	
58	H26	山形県	西村山郡西川町	斜面監視	-	1	1	0	0	雨量計1、ガス検知機1
59	H26	京都府	福知山市大江町	道路脇法面監視	道路（国道）	1	5	0	0	
60	H26	兵庫県	丹波市市島町	転石監視	転石	1	2	0	0	伸縮計1、雨量計1、カメラ1
61	H26	和歌山県	海南市日方	斜面監視（二次災害防止）	崩壊斜面	1	6	0	0	雨量計1
62	H26	鳥取県	日野郡日野町	近接施工管理	鉄道	0	1	0	0	
63	H26	台湾	高雄市	法面監視	産業廃棄物処分場	1	5	0	0	
54	H26-27	埼玉県	秩父市	掘削斜面の監視	道路	1	7	0	0	雨量計1
64	H26-27	徳島県	板野郡板野町	掘削斜面監視	道路（高速道路）	1	19	0	0	
合計						72	696	2	4	

本研究で記載

5．斜面災害リスクのリアルタイム評価手法の検討

5．1 概要

斜面災害検知センサーを崩壊の危険性のある斜面に設置し、早期警戒警報に活用していくためには、センサーが適切に動作するだけでなく、斜面が有する自然条件、得られたデータの処理方法、計測されたデータをどういう基準に基づいて危険性を判断するかなどを明らかにする必要がある。斜面の変状をリアルタイムで収集し、評価し、警報を発するためには、わかりやすい管理基準が必要である。傾斜計の管理基準について、5．2で述べる。

本研究では土中水分の飽和度に代わる計測値として体積含水率を計測し、降雨量との対応を調べた。一方、土砂災害警戒情報では5 kmメッシュの既知降雨量と予測値を土壌雨量指数に換算して警報を発信している。このため、土砂災害警戒情報との整合性について、5．3で検討する。

実証実験を通して、斜面の微小な変状を捉えるためにはどこに設置するかが重要であることがわかった。傾斜変位を起こす場所は崩壊メカニズムとも関係しており、崩壊メカニズムは素因である地形・地質によるものである。このため、斜面変位の異常値を検出するには、適切な設置位置に適切な手法で斜面崩壊検知センサーを設置することが前提となる。この点について5．4で整理する。

的確、かつ、精度良く異常値検出を行うためには、計測値の分解能を向上することが前提である。MEMS素子自身の分解能(0.0025deg)へできる限り近づけられるとよい。ノイズの原因には種々考えられるが、特に大きな要因となっていたMEMS素子の温度特性によるノイズ低減について、および、それ以外のノイズ低減について、5．5で記す。

5．6では、リアルタイムでの評価について、加速度を用いた評価という観点、および、現状は10分間隔に固定されているサンプリング間隔について考察する。5．7では、これまで種々の自然斜面・法面・構造物に設置した実績に基づいて「異常値検出」に係わる留意点を整理する。そして、今後、総合的な災害リスクマネジメントに向けて本研究を活用していくための方策を考察するとともに、世界的に災害が増加していることから、海外の現場における適用性について、5．8で考察する。

5．2 傾斜角変位速度による異常値検出

5．2．1 傾斜角変位速度と崩壊（安定）までの残余時間

斎藤ら⁵⁾⁶⁾⁷⁾を参考に、ひずみ速度とクリープ崩壊時間（崩壊までの残余時間）との関係を整理した。ひずみ速度に相当する変位量としては傾斜角変位速度を用いる。クリープ崩壊時間（残余時間）は図5 - 1に示すようにある傾斜角変位速度（接線）が示す時刻から崩壊あるいは安定（それまで急激だった変位が小さくなる状態）までの時間⁹⁾⁰⁾とする。

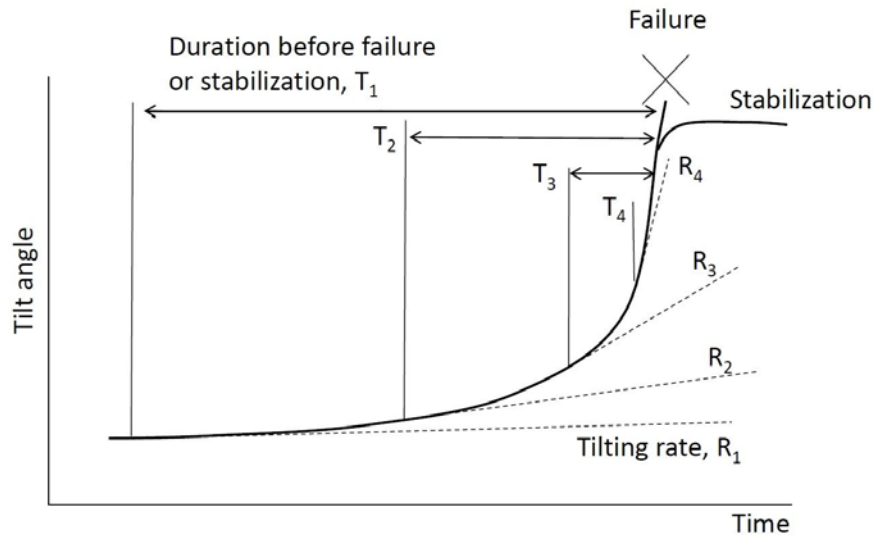


図 5 - 1 傾斜角変位速度と残余時間の定義⁹⁰⁾

中国都江堰市の降雨実験、三峡ダム晒网坝地すべり、福岡県冷水峠、田川郡添田町、山形県酒田市の各試験について、崩壊あるいは安定に至るまでの傾斜角変位速度と残余時間を読み取った結果を表 5 - 1 に整理し、図 5 - 2 に図示する⁹⁰⁾。

図 5 - 2 から、傾斜角変位が安定せずに変位速度が 0.01deg/h を超えるケースでは、0.1deg/h に満たないものを除くと、全てのケースで崩壊あるいは崩壊に近い大変形をすることがわかった。中国三峡ダム・晒网坝地すべりサイトでは 0.1deg/h を超えて安定したが、隣接する場所では大きな崩壊が発生した。こうしたことから、傾斜角変位速度が 0.01deg/h のオーダーに近づいたときには崩壊に対する注意を喚起する必要が生じ、さらに 0.1deg/h を超える場合には崩壊の可能性が極めて大きくなるものと考えられる。崩壊した 3 つ事例におけるセンサー（K-50、K150、T50-1、T50-2、冷水峠 unit2、晒网坝 unit2）が傾斜角変位速度 0.1deg/h を超えてから、崩壊するまでの時間はそれぞれ約 7h、3h、4h、2h、1h、12h であった。図 5 - 2 に従えば、0.1deg/h 以上の傾斜角変位速度を観測した場合には、崩壊までの残余時間は概ね 10 数時間以内、早ければ 1 時間程度と推測される。

斜面崩壊検知センサーは 10 分毎に傾斜量の観測を行い、1 時間で 6 点の観測データを得ることができる。よって、傾斜角変位速度は、ノイズの影響などにもよるが、最短で 10 分間の計測により算出可能である。1 時間以内での崩壊予兆をとらえるためには、より短い間隔で計測できるようにすることも改良の一つの方向となる。現段階では、斜面に明らかな変状（例えば亀裂など）を確認してからではなく、危険性のある斜面について平時から前もって観測していくことで、計測データから斜面変状の傾向を把握し、崩壊に結びつく斜面変状の予兆をより早く検知して、傾斜角変位速度に管理値を設け、的確に警報を発することが可能とみられる。

より早い時間に個別の斜面の崩壊危険性について正確な情報を提供できれば、深夜や集中豪雨の中で避難を余儀なくされることはなく、時間的に余裕がある中で判断でき、適切な避難行動に移れるものと思われる。

表 5 - 1 斜面表面における傾斜角変位速度と崩壊（安定）までの残余時間の関係⁹⁰⁾

サイト (参考図番)	センサー 番号	傾斜角変位速度 (deg./h)	崩壊 / 安定 までの残余 時間 (h)	変位後の状態(崩壊 / 安定)
中国・都江堰降雨実験 (図 4 - 1 8)	K50	0.15	6.75	崩壊
		3.81	1.75	
		0.096	1.5	
		45	0.5	
	T50-1	0.02	6.66	崩壊
		0.4	2.66	
		195	0.16	
	T50-2	2.32	0.31	崩壊
		0.11	1.26	
		0.02	5.3	
	K150	0.016	7.177	ほとんど崩壊
		0.094	3.177	
		0.46	1.847	
		0.79	0.68	
		21	0.28	
	T200	0.016	8 以上	崩壊せず試験終了
	T300	0	-	変化なし
福岡県冷水峠 (図 4 - 3 8)	Unit2	0.16	1	浸食崩壊
中国三峡ダム・晒网坝 (図 4 - 3 1)	Unit2	0.01	372	近傍で土砂移動あり
		0.12	12	
福岡県田川郡添田町 (図 4 - 4 6)	K-3	0.006	95	安定
		0.013	130	
		0.079	6	
山形県酒田市 (図 4 - 5 7)	K-1	0.00017	456	安定 (抑え盛土施工)
		0.0014	96	
		0.006	24	

表 5 - 1、図 5 - 2 のデータには、都江堰市降雨実験で崩壊した地点と崩壊しなかった地点、冷水峠の浸食による倒壊、三峡ダム晒网坝での近傍で大規模な土砂移動があった例、田川郡添田町斜面で一旦変位して安定した例、酒田市斜面で変位して抑え盛土で止めた例など、多種の例が含まれている。それにも関わらず全体としては両対数グラフの一定の幅の中で傾斜角変位速度と残余時間が動いていることがわかる。

都江堰市・降雨実験で崩壊した箇所にあったセンサーのほとんどが 0.01deg/h よりも大きな変位速度で、残余時間 10 時間以内から変位し始め、0.1deg/h を超過した後に崩壊に至った。0.1deg/h を超えた時点では残余時間は 1～4 時間程度であった。降雨実験で倒壊せず変位速度を観測できた T200 については残余時間は 8 時間以上とみられる。冷水峠の例では最初から 0.1deg/h を超える変位速度を観測してわずか 1 時間で倒壊した。また、近傍で土塊移動を観測した三峡ダムサイトでは 0.01deg/h から 0.1deg/h のラインを横切って急激に変状した。最終的に安定した田川郡添田町の例では 0.01deg/h を超えたものの 0.1deg/h を超えるまでには増加しなかった。クラックが発生し対策工により変状が止まった酒田市の例では 0.01deg/h の線を越えるまでに至らなかった。

以上の例で数は限られるものの、降雨状況や地形・地質の状況、実験斜面・自然斜面・切土斜面を含み、崩壊の仕方も退行性から浸食崩壊まであり、センサー設置位置も一様でない条件の中で、傾斜変位（全周を 360deg とした相対的ひずみに相当）についても既往文献（斎藤ら^{5) 6) 7)}）の崩壊予測方法の

整理に準じた手法で説明できることが示されたことは重要と考えられる。ここで、斜面変状を監視する場合の管理値として、傾斜角変位速度に着目する場合、 1deg/h 程度になると崩壊危険性が喫緊の状態にあり、逆に 0.01deg/h 程度ではまだ安定している状態にあるため、中間の 0.1deg/h 程度を監視のための実績に基づいた目安値ととらえるべきと考える。

都江堰市における降雨実験では、斜面下方に設置したセンサー T50-1、T50-2、K50、K150 がそれぞれ傾斜角変位速度を検知して異なる経路で倒壊、もしくは、倒壊寸前に至った。このことは、設置した地点の地盤の変状を表しているものと考えられる。このため斜面に均等に数多く設置することができれば、斜面のどの部分の変状が大きいかわかる手がかりになる可能性があると思われる。

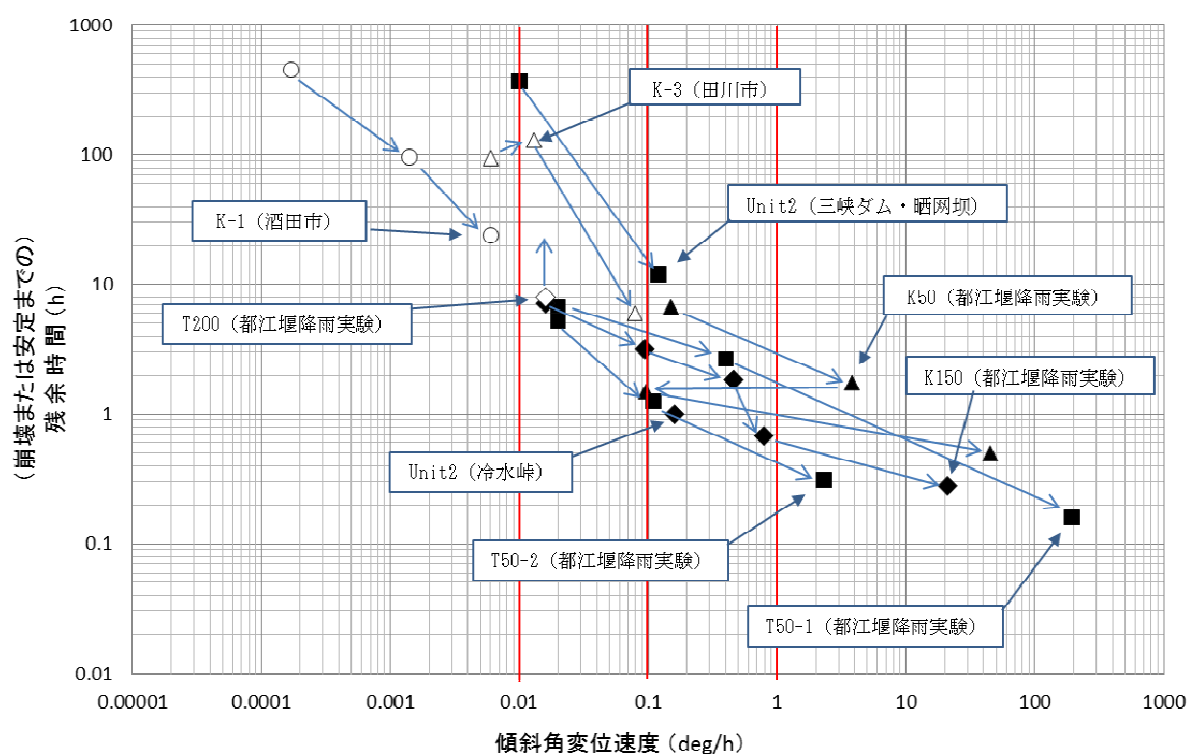


図5 - 2 傾斜角変位速度と崩壊（安定）までの残余時間との関係⁹⁰⁾

5.2.2 傾斜計の監視基準（案）の設定

内村ら¹¹⁰⁾は斜面崩壊事例研究から、

数日～数10日にわたって起こる地すべりの変動について、 $0.01 \sim 0.1\text{deg/day}$ の継続的な傾斜速度が観測されれば何らかの変状が疑われる、

$0.1 \sim 1\text{deg/day}$ では応急対応が求められる危険性がある、

少なくとも 0.1deg/h 以上の傾斜変位が観測される場合は、嚴重な監視が必要であると報告した。

これに基づいて、傾斜角変位の管理基準案を表5 - 2にまとめる。警戒レベルを設け、図5 - 2に重ね合わせた領域で図5 - 3に示す。

M E M S 傾斜計チップ自体の精度（2軸）は $\pm 0.0025\text{deg}$ であるが、センサーユニットにしての分解

能はノイズの調査結果（表5 - 9 参照）に示すように、生データ（3 ）で $\pm 0.023\text{deg}$ 、1 時間移動平均データ（3 ）で $\pm 0.0048\text{deg}$ であった。全センサーユニットで温度キャリブレーションを行えば気温による変動分を取り除けるものとみられる。レベル3 の管理基準である 0.1deg/h に対して、生データ、1 時間移動平均データを用いた場合で、それぞれ基準値に対する分解能は、23%、4.8%である。

管理基準は傾斜量の絶対値をとらえるものではなく、データの時間的な差分により相対的変位をみるため、データが常に分解能以内に入っていれば全体的な傾向をとらえることが可能である。データ数点を平均化することによってランダムノイズを取り除き、より確実に変位をとらえることができる。現在、MEMS 素子内で2 秒毎の3 点の測定データを平均化（図5 - 1 4 参照）して生データとしている。このプログラミング変更によりMEMS 素子内処理で1 時間移動平均（素子内3 点×ロガー内6 点＝18 点のデータの平均）に相当する平均化処理をできれば、生データの段階でランダムノイズを大幅に取り除くことができるものと思われる。

表5 - 2 斜面崩壊検知センサーの管理基準案¹⁰⁸⁾

警戒レベル	警戒の内容	管理基準案	斜面の状況
1	点検・要注意、観測強化	数日間 $0.01 \sim 0.1\text{deg/day}$ (0.00042deg/h) (0.0042deg/h)	変状の疑いがある
2	対策検討、警戒・応急対策・通行止の検討	$0.1\text{deg/day} \sim 0.1\text{deg/h}$ (0.0042deg/h)	応急対応が必要
3	嚴重警戒・通行止	0.1deg/h 以上	嚴重的監視が必要

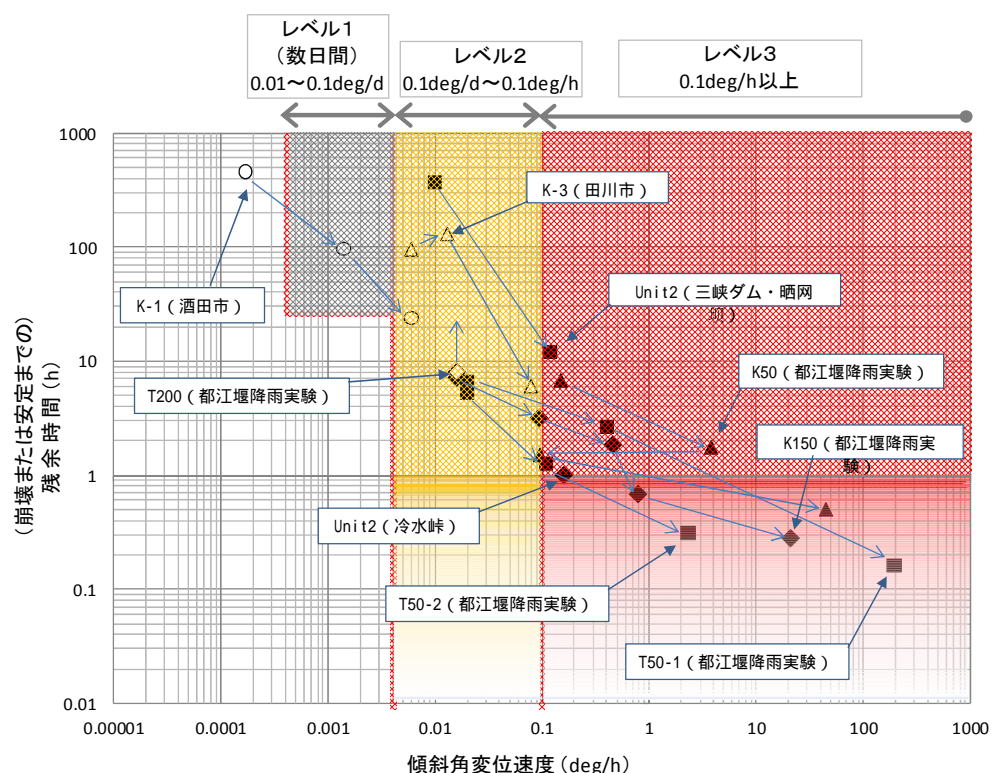


図5 - 3 傾斜計管理基準案と傾斜角変位置量実測値を合わせた図

5.2.3 伸縮計の監視基準との比較

1) 斜面崩壊検知センサーと伸縮計との比較

斜面崩壊検知センサーと伸縮計の比較結果について再整理する。中国・都江堰市での人工降雨試験、田川郡添田町の実証実験により表5-3に示すような事項がわかり、斜面崩壊検知センサーの地表面換算変位と伸縮計の変位はよい対応を示した。

表5-3 斜面崩壊検知センサーと伸縮計との比較

	斜面崩壊検知センサーと伸縮計との比較結果	備考
1	滑落面を挟む / 挟まないに係わらず、伸縮計の地表面変位と斜面崩壊検知センサーの地表面換算変位はほぼ1対1で推移する。	図4-16、図4-51、図4-52
2	末端部に斜面崩壊検知センサー、頂頭部に伸縮計を設置すると、末端部の斜面崩壊検知センサーでは10時間程度早く動き、伸縮計が追従する。	図4-46
3	頂頭部では、斜面崩壊検知センサーが動かず、伸縮計が動く場合があり、斜面崩壊検知センサーが平行移動した可能性がある。	図4-43

伸縮計と斜面崩壊検知センサーの表面換算変位はほぼ1対1で変化し、末端部に斜面崩壊検知センサーを設置した場合に伸縮計よりも先に動いた。斜面の変状が斜面末端部から上へ向かって伝搬する場合、上部の滑落崖に設置する伸縮計よりも、末端部に設置した斜面崩壊検知センサーの方が早く検知するためとみられる。よって、斜面変状のメカニズムが明らかでない場合でも末端部から上部にかけて複数個設置すれば崩壊の予兆をより早く検知することができるものと考えられる。

伸縮計は開口亀裂を挟んで設置する必要があるため、開口亀裂が見つからない斜面において変状を観測するには斜面崩壊検知センサーを設置する方が斜面状況に応じて設置位置の選択の自由度が高いと考えられる。伸縮計が1地点を不動点と想定した2地点の相対的な変位を観測するのに対して、斜面崩壊検知センサーは設置した位置直下の地盤性状に応じた傾斜量を直接検知¹⁰¹⁾¹⁰²⁾するものである。このため、湧水やはらみなどの前兆現象と関係する斜面末端部の初期的な微小変位を予兆として検知できるもの⁸⁵⁾⁹⁶⁾¹⁰³⁾と考えられる。

一方、滑落崖近くに斜面崩壊検知センサーを設置する場合、傾斜せずに平行移動すると傾斜量変位はゼロになる。滑落崖付近の変状は伸縮計による方がこれまでの実績も多く確実と考えられる。

2) 伸縮計の監視基準との比較

伸縮計の管理基準は、(公財)高速道路調査会¹⁰⁷⁾から現地計測に基づいて表5-9のような数値が提示されている。斜面崩壊発生を予測するために行われた田村らの研究¹⁰⁸⁾によれば、崩壊土層の厚さの分布は浅層崩壊の場合、0.8m~2.2m程度とされ、平成25年度台風第26号による伊豆大島の表層崩壊の場合は概ね1~2m¹⁰⁹⁾とされている。また、表1-2(小山内ら²⁶⁾)において、昭和47年~平成19年の降雨による崩壊の平均値として、崩壊深さ1.1m(標準偏差1.49m)とされている。

都江堰市での実験の小型孔内傾斜計(図4-25)、田川郡添田町の事例の孔内傾斜計(図4-48)

に示されるように、変状初期に基盤を不動点としてすべり面深さを半径とするように傾斜が発生する。よって、センサーユニットの杭をある程度深く打ち込むことによって、すべり面深さを半径とした地表面変位に換算することが可能と考えられる。

ここで、浅層崩壊の崩壊土層深さ = 1m の場合、伸縮計の基準値を傾斜角変位に換算すると、表 5 - 4 のようになる。斜面崩壊検知センサーの基準値をレベル 3 で 0.1deg/h としており、この数字から逆算される崩壊土層深さは 2.2m 程度となり前述の文献値で示された崩壊土層深さの範囲内に含まれることがわかる。崩壊土層深さ 2.2m の場合を斜面崩壊検知センサーの基準値案（表 5 - 2）と比べると、警戒のレベルおよび数値において、ほぼ同程度の状況とオーダーで示される。よって、斜面崩壊検知センサーの基準数字は表層崩壊の場合、伸縮計と同等レベルであると考えられる。

表 5 - 4 伸縮計基準値の傾斜角変位へ換算

対応	伸縮計の管理基準 (高速道路調査会)	傾斜角変位への換算値		斜面崩壊検知センサーの基準値案
		崩壊土層深さ 1m	同左 2.2m	
点検・要注意 または観測強化	10 日で 5mm 以上	240 時間の平均で 0.0012deg/h 以上	同左 0.00054deg/h 以上	数日間 0.01 ~ 0.1deg/day (0.00042 ~ 0.0042deg/h)
対策の検討	5 日で 5 ~ 50mm 以上	60 時間の平均で 0.0024 ~ 0.024deg/h	同左 0.0011 ~ 0.011deg/h	0.1deg/d から ~ 0.1deg/h (0.0042 ~ 0.1deg/h)
警戒・応急対策・ 通行止検討	1 日で 10 ~ 100mm 以上	24 時間の平均で 0.024 ~ 0.24deg/h	同左 0.011 ~ 0.11deg/h	
嚴重警戒・通行止	1 日で 100mm 以上	24 時間の平均で 0.24deg/h 以上	同左 0.11deg/h 以上	0.1deg/h 以上

5.2.4 まとめ

傾斜角変位速度と崩壊（安定）までの残余時間との関係から斜面崩壊検知センサーにおける管理基準値を設定した。管理基準は 3 段階に分け、警戒レベル 3 は傾斜角変位速度が 0.1deg/h 以上に増大する場合で、嚴重警戒・通行止の処置をとるものとした。

管理基準は、降雨の状況（都江堰市人工降雨実験では 1 時間雨量 240mm）、地形・地質の状況（三峡ダムサイトの地すべり、田川郡添田町の急傾斜地崩壊、酒田市の切土斜面）、崩壊の状況（冷水峠の浸食崩壊）などの種々の状況を踏まえたものである。このため、レベル 1・レベル 2、および、特にレベル 3 の 0.1deg/h というしきい値の設定は、限られた事例の数であるものの相応の蓋然性も有すると考える。

伸縮計の地表面変位が斜面崩壊検知センサーの地表面換算変位と 1 : 1 に対応することから、伸縮計の既往の管理基準値と比較したところ、崩壊土層深さ 2m の表層崩壊と同等の数字となり、傾斜角変位速度 0.1deg/h を超えれば嚴重警戒とすることで問題ないことを確認した。降雨については、それぞれの実証実験において、降雨量や体積含水率を計測し、降雨により傾斜変位が増加することを確認した。降雨を誘因とする斜面変状に対する基準案として問題ないとする。

管理基準値と崩壊メカニズムとの関係については、都江堰市における人工降雨実験や地質調査を行った田川郡添田町の例を除き、必ずしも明確とはいえない。今後、実際の現場での適用例を増やし、浅層崩壊について検証を行うとともに、浅層崩壊以外の崩壊メカニズムに関しても適応性を検討する必要がある。

ある。

なお、管理基準は段階的に厳しくする警戒レベルを設定しており、種々の現場に適応しても実務上で問題ないものと判断される。

5.3 体積含水率（降雨量）による異常値検出

5.3.1 体積含水率と傾斜角変位との対応

降雨による斜面の飽和度と崩壊との関係が Orense ら¹¹⁾により報告され、飽和度 90%程度になると、せん断ひずみが急増し崩壊に至る。本研究では、飽和度に代わり体積含水率を計測し、降雨と斜面傾斜変位との関係を追っている。

表 5 - 5 に各実験サイトにおける降雨と傾斜変位との関係を整理した。無降雨時に斜面崩壊検知センサーの傾斜数字が変化する場合、センサー自体の何らかの不具合の影響、あるいは、小動物や枝などがセンサーに接触したための誤作動などが考えられる。体積含水率を計測することにより、降雨以外の異常値を除外することができる。雨天時には、体積含水率が上昇すれば実際に現地で降雨があったことを確認できるし、体積含水率の増減により降雨が続いているのか止んだのか、ある程度の判断が遠隔地において可能となる。それらにより、観測システムとして安定した作動状態を確認できると考えられる。

表 5 - 5 降雨量と体積含水比の関係

	サイト	体積含水率		体積含水率と傾斜変位との対応	参照図
		無降雨時	降雨時		
1	都江堰 人工降雨実験	最小約 25% (深さ 1m)	最大約 37% (同左)	概ね対応	図 4-20 図 4-18
2	三峡ダム 晒网坝地すべり	最小約 51%	最大約 59%	概ね対応。	図 4-31 図 4-32
3	福岡県 冷水峠	最小約 21%	最大約 28%	対応 (浸食崩壊により傾斜急増)	図 4-38
4	福岡県 田川郡添田町	最小約 19%	最大約 35%	概ね対応	図 4-43

図 5 - 4 に、都江堰市・人工降雨実験の深さ 50cm の小型孔内傾斜計（K50）の傾斜変位と、同じ位置の体積含水比の推移を示す。体積含水率が増加すると傾斜変位が増大⁹⁾⁹⁾していくことがわかる。

降雨により体積含水率が過去の履歴最大値を超えたときに、せん断ひずみが再度進行すると考えられる。一方、後発の降雨が小規模で、過去最大の体積含水率を超えない場合にはひずみは進行しない。この結果、図 5 - 4 のように包絡線の形で、体積含水率 - ひずみ曲線が描かれる。伸縮計や傾斜計の変位量だけでも斜面変状や崩壊を推測することができるが、より確実な判断を行うためには、変位量だけではなく、降雨に追従する体積含水率をとともに観測していくことが必要と考えられる。

斜面災害警戒情報では、地域毎に降雨量（既往および予測）のみから、その地域の災害リスクを予測しており、そのため、斜面毎のリスクを予測するものではないという注書きを入れている。斜面毎のリスクを検討する上で、降雨量と変位の両者を観測することが重要であり、その上で斜面災害警戒情報などの活用が必要と考える。

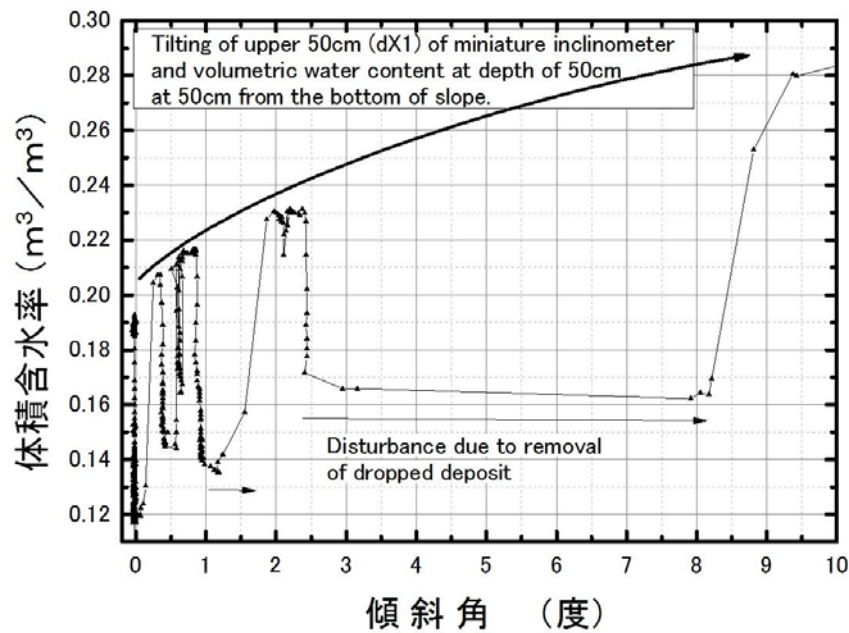


図5 - 4 センサー (K-50) の傾斜変位と体積含水比の推移^{104) 105)}

5.3.2 土壌雨量指数との関係

自治体が避難勧告を発令したり、住民が自主避難する上で、気象庁や都道府県が発信する土砂災害警戒情報が大きな判断材料となっている。土砂災害警戒情報は5kmメッシュの降雨量の実測値、および、予測値から求められる土壌雨量指数（長期降雨指標）と60分間積算雨量（短期降雨指標）によって作図される。土砂災害警戒情報では、降雨量によって描かれるスネークラインが、長期・短期雨量指数の過去最大履歴の包絡線（CL）を超えると、土砂災害の危険性が極めて高くなる。斜面毎に考えると、前節に示されたように、体積含水率が履歴最大値を超えるような降雨があると、せん断ひずみが再度進行し、斜面が変状し崩壊に至ると考えることができる。

図5-5に、都江堰市の人工降雨実験における土壌雨量指数の推移を示した。土壌雨量指数は、3段のタンクモデルにより計算され、個々のタンクが浸透・流出・貯留を伴い、ある半減期に基づいて貯留高が増減し、その合計値により与えられる。図5-6(a)に人工降雨実験の土壌雨量指数と60分間累積雨量によるスネークラインを示した。スネークラインにより、累積降雨量の増加に応じて徐々に右方へシフトしながら、末端部から斜面崩壊が進み、K50、T50-2、T50-1、K150の順番にセンサーが崩落していく様子がわかる。土壌雨量指数の累積的な増加に加えて、60分間積算雨量が最大となったときに崩壊が進んでいく様子がわかる。土砂災害警戒情報では、土壌雨量指数と60分間積算雨量が警戒基準（CL）を超過すると予測されるとき警戒や避難勧告が発せられる。

人工降雨実験では、崩壊しやすいように斜面末端部を掘削除去したため、引張応力の働く領域が後退しながら崩壊が進行したと考えられる。地盤内の応力ひずみ状態が刻々と変わり、斜面崩壊検知センサーや小型孔内傾斜計の計測値に現れており、個々の斜面について、CLは降雨量の量的な幅を持った危険ゾーンとして表される。すなわち、個々の斜面を対象とする場合は、その斜面に降った雨量に基いて、傾斜変位、体積含水率、度重量指数などの降雨指標のデータを蓄積し、降雨に対する崩壊リスクを推定

できる可能性がある。長期雨量指数については、現地に設置した雨量計から算出する場合と、周辺の雨量情報を利用する場合が考えられる。

体積含水率は、降雨開始後に上昇して降雨終了後にゆるやかに減少し（図4 - 20）、土壌雨量指数のタンクモデルの上位タンク（図5 - 5、S1タンク）に近いプロファイルを呈する。よって、短期雨量指標の代わりに体積含水率を用いスネークラインを描くと、図5 - 6（b）のようになる。体積含水率は比較的变化のはっきりしていた深さ75cmの計測値を用いた。

降雨後の体積含水率が充分戻らない状態で、再び降雨があると累積的に体積含水率が増加し、傾斜角変位が増大する。ひずみ量（傾斜角変位）が徐々に小さくなくても斜面が安定化しているとは限らないので⁹⁹⁾¹⁰⁴⁾、傾斜角変位と体積含水率の両方を計測すること⁹⁷⁾が重要である。土砂災害警戒情報ではメッシュ状にCL値などが公表されている。それらも参考に、斜面毎の傾斜変位と体積含水率を継続的に計測することができれば、斜面崩壊に至らない状態でも、降雨量と体積含水率の変化による地盤内傾斜変位の状況を抑え、より大きな変位に備えることが可能と考えられる。

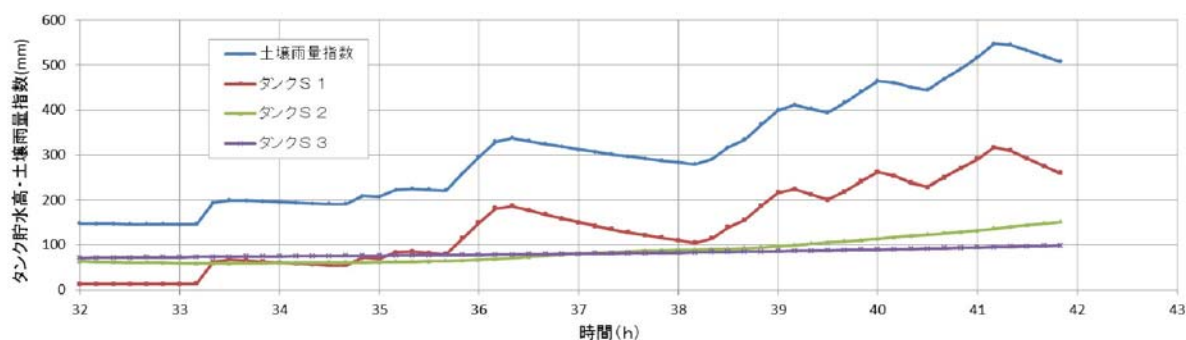
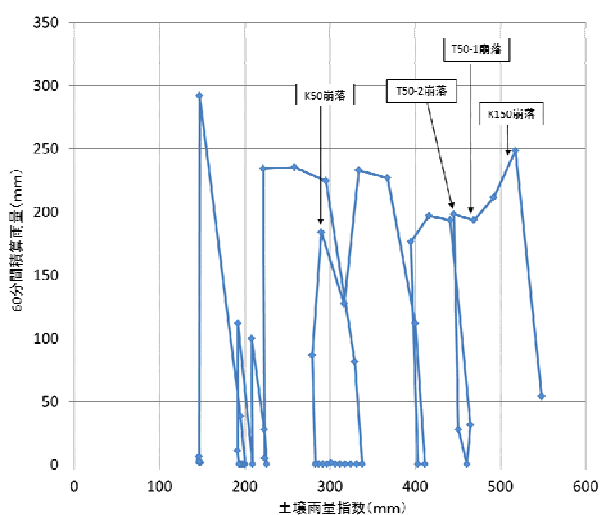
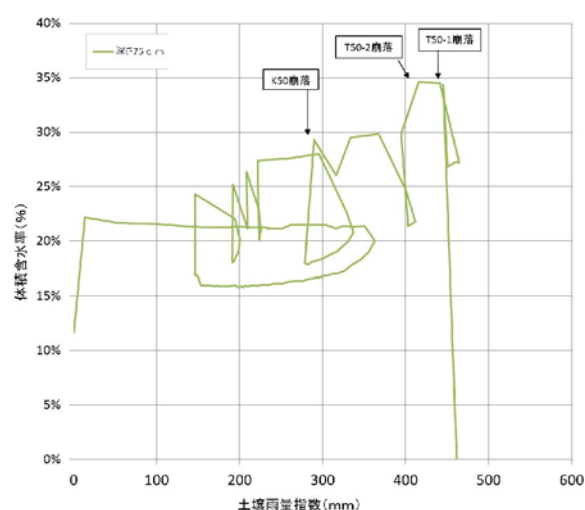


図5 - 5 土壌雨量指数の推移



(a) 土壌雨量指数と60分間累積雨量



(b) 土壌雨量指数と体積含水率

図5 - 6 人工降雨実験（都江堰市）におけるスネークライン

5.3.3 降雨関連データによる異常値検出

図5-7に土壌雨量指数と傾斜角の変化との対応を示す。土壌雨量指数の増加に伴い斜面崩壊検知センサーと小型孔内傾斜計の傾斜角が増大していく様子がわかる。斜面崩壊検知センサー・小型孔内傾斜計によって斜面変状に係わる異常値を検出する場合、以下の点が必要となる。

- ・対象斜面における降雨について雨量計や体積含水率計で計測する。
- ・体積含水率と傾斜角の履歴を記録する。（体積含水率の増加は傾斜角変位よりも遅れて現れる）
- ・土砂災害警戒情報の雨量（土壌雨量指数）予測を参考にする。
- ・降雨量・体積含水率、および、土壌雨量指数との関係で対象斜面の傾斜角変位を整理する。

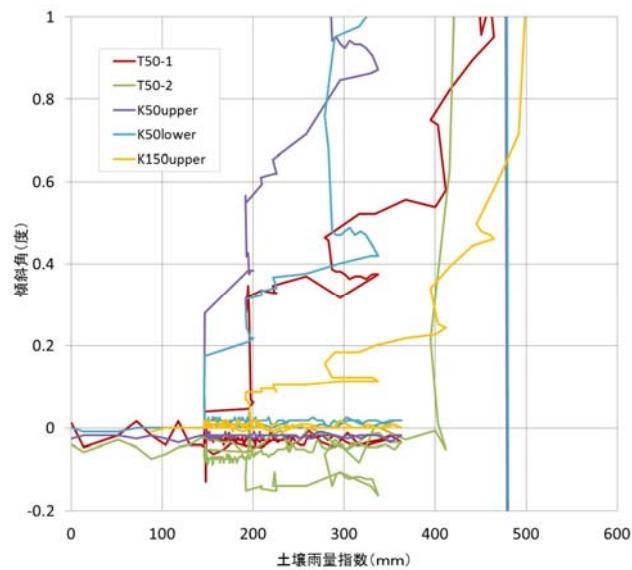


図5-7 土壌雨量指数に対する傾斜角の変化

5.3.4 まとめ

斜面崩壊検知センサーに外付けされる体積含水率計により、降雨に伴う斜面の体積含水率変化を計測することで、傾斜変位が降雨起因によるものかどうかかわかり、斜面崩壊検知センサーの管理基準を適切に運用することができる。降雨により体積含水率が上昇して、傾斜変位を起こした場合、管理基準値に基づいて斜面の状態をレベル判定することが可能である。一方、体積含水率に変化のない傾斜変位や地震など明らかに起因がわかる場合以外は、センサーの誤作動などが考えられ、計測データから除外できる可能性がある。

降雨によって体積含水率が過去履歴の最大値を超えると、斜面内部のひずみが進行し傾斜角変位が増大する。このため、傾斜角変位と体積含水率の関係から斜面の変状が進行性のものかどうかかわかる可能性がある。また、体積含水率を実効雨量の短期降雨指標に代替して、土壌雨量指数との関係でスネークラインを描くことにより、土砂災害警戒情報の予測雨量から、個々の斜面における危険性推定を推定することも可能とみられる。

5.4 設置位置および手法による異常値検出

5.4.1 実証実験における設置手法

1) 実証実験に基づく設置位置

設置位置を選定するにあたり、対象地の地形地質に関する基本的な情報を把握して、崩壊のメカニズムをできる範囲内で推定しておくことが重要である。地表踏査（図4-39参照）を行うことはもちろんであるが、可能なら物理探査やボーリング調査を行うことを念頭におく必要がある。なお、地形地質に関する情報とは、亀裂やゆるみの程度、地形の凹部・凸部のような不安定な地形、流れ盤か受け盤か、すべり地形か集水地形か、風化層が厚いか、崩積土層か、等々の斜面の安定に関するものである。また、工事現場の場合は、法面勾配、小段の位置や施工ステップに留意して、設置する場所とその工程を考慮する必要がある。

表5-6に実証実験を通した斜面崩壊検知センサーの設置位置についてまとめた。田川郡添田町での斜面観測結果（図4-46）に示したように、斜面頂頭部にある亀裂や滑落崖を挟んで設置した伸縮計（S-1）に比べて、斜面末端部に設置した斜面崩壊検知センサー（K-3）、および、伸縮計（S-2）では、斜面変状を10時間以上早く検知することができた。よって、斜面末端部へセンサーを設置することが変状をより早く検知する上で効果的である。伸縮計を設置する場合、亀裂や滑落崖など目視できるような明らかな斜面変状を前提としており、斜面崩壊検知センサーの特長として亀裂の有無に関係なく、斜面を平面的、および、（小型孔内傾斜計により）深度方向に、均等に配置して計測できる点があげられる。

表5-6 斜面崩壊検知センサー設置位置

計器	設置位置	設置の目的・趣旨	実証実験
斜面崩壊検知センサー	斜面中央部	斜面において代表性のある地点として。	田川郡添田町 晒网坝
	斜面末端部	斜面変状をより早く検知する。 人家などへの被害防止。	田川郡添田町
	斜面凸部	比較的変状しやすい箇所である。	田川郡添田町
	斜面中央の両端部	両サイドでゆるみ域が拡大しないか確認する。	冷水峠 酒田市
	斜面頂頭部 （滑落崖の下）	伸縮計との比較。	田川郡添田町
	斜面頂頭部 （滑落崖の上）	不動性を確認する。	田川郡添田町
	小段の上 （工事の場合）	小段の安定性の確認。 工事進捗に応じて移動できる。	冷水峠 酒田市
小型孔内傾斜計	斜面中央部	すべり面より上の深度毎の変位情報を得る。	都江堰市

斜面全体的な変状を知るため、また、より早い時間で変状を把握するため、斜面中央部と斜面末端部への設置が必要である。斜面中央部では、小型孔内傾斜計を併用し、深さ方向の変位を観測できるとなるとよい。それ以外に、対象地の地形・地質に関する情報（例えば、流れ盤か受け盤か、地すべり地形・集水地形か、風化土層かなど）や崩壊メカニズム、地質調査結果（例えば、ボーリング情報や探査結果など）や踏査結果（例えば、亀裂やゆるみ域の有無、地形の凸部や凹部の有無など）、工事現場なら小段などに留意し、設置する必要がある。

亀裂などがない場合や過去に滑動履歴がない場合、可能であれば地質調査を行って、滑動メカニズムを想定し設置位置を決めることが望ましい。

2) グリッド状の配置

崩壊メカニズムや崩壊（地すべり）ブロックなどが明確でない場合など、斜面崩壊検知センサーの設置間隔をどのようにするかは崩壊の予兆を検知する上で重要なポイントとなる。通常、現地周辺にある斜面崩壊跡地などの崩壊規模を参考に設置間隔を決める。ある程度、グリッド状に配置することにより、変位検知の見逃しを少なくし、滑動領域の絞り込みを容易にすることができる。

周辺の平均的な崩壊規模が20mであれば、それ以下（例えば15m）の間隔でグリッド状に配置すれば変位を検知できる可能性が高まる。昭和47年～平成19年までの降雨による崩壊の平均的な崩壊幅（小山内ら²⁶⁾、表1-2参照）は、14.7m、高さ12.7mである。周辺に手がかりがない場合は参考にできる。これまでの設置実績から、崩壊ブロック内に3～4台、ブロック外に2～3台程度設置すれば、不動土塊との差異から崩壊範囲をある程度推定でき、対象斜面の危険エリア内だけでなくその外側にも設置することが必要となる。

通常、斜面の最大傾斜方向をX軸、それと直交方向をY軸として設置する。グリッド形状に配置する場合、グリッドの方向に合わせてX軸・Y軸を設定することも可能と考えられる。

3) 設置における留意点

実際には、様々の理由（予算的制約、緊急対応、施工上の支障、通信状況、地形や植生など）によって設置台数や配置などが影響を受け、一律に決められない場合が多い。現地の状況や種々の制約条件に応じて、設置する必要が生じる。

酒田市の例では、最初から最後まで頂頭部の小段に設置したが、現時点で再考すると、施工の進捗に従い斜面崩壊検知センサーを法肩から小段へ下ろしていく方法がより確実に変位を補足できると考えられる。冷水峠の例は、設置した位置が偶発的に浸食されたものであり、遠隔地において状況判断するためには、崩壊ブロックに複数台設置することが重要と考えられる。田川郡添田町の例では、設置台数が限定されたため、滑動ブロック中央部（凸部）に設置することとなった。このように崩壊ブロックが予め判明している場合、頂頭部へ設置するよりも末端部へ設置する方がより早く変位を捉えられる。頂頭部に設置して土塊が平行移動すると検知できないため、亀裂がある場合の頂頭部では伸縮計を用いることが必須である。

データロガーは、予想される崩壊ブロックの範囲外に設置しなければならない。また、監視対象斜面と同一斜面に設置すると、植生が繁茂したり斜面の凹凸によっては電波障害が発生し無線が届かなくなる場合がある。斜面崩壊検知センサーとの間はできるだけ見通しよく距離が短い方が望ましい。対面する斜面に設置するのが理想的である。しかし、実際にはそのような設置条件にならないケースが多く、

同一斜面で無線テストを行い設置場所を決める場合が多くなるのが実情である。

設置にあたり、無線モジュールと外付けの斜面崩壊検知センサーや体積含水率計とをつなぐコードは、P F 管（蛇腹管）で保護して獣害防止することが不可避事項である。

5 . 4 . 2 工事法面における設置位置

埼玉県秩父市の道路法面掘削工事¹⁰⁶⁾の例を写真5 - 1、図5 - 8に示す。暫定法面形成のための粗掘削が行われ、平成26年2月4日に1段目小段上に斜面崩壊検知センサーK - 1、K - 2が設置され、2段目小段まで掘削が進んだ5月14日にK - 3、K - 4が設置された。その後、K - 3下部法面を掘削したところ、同月20日に幅30m程度の規模の崩壊が発生した。

法面勾配はおおよそ1 : 1.8 (30deg)、地質は砂岩泥岩互層であり、崩壊は層理面に沿って発生した平面すべりとされた。写真5 - 1に見られるように、層理面上には削痕があり表面に光沢がみられ、泥岩の風化により粘土層が生成してすべり面を形成したと考えられる。

崩壊はK - 3の位置に達するものではなかった。K - 3の計測値が安定していたので、崩壊に伴う法面の不安定化とゆるみがK - 3を設置した小段まで及ぶものではないと判断され、早急な復旧作業開始のための判断材料を提供することができた。工事法面の監視では、掘削工事の邪魔にならないこととセンサーを保守し易いことから、小段上に通常設置する。小段は法面の構造的な安定確保にも関係しており、小段における変状がないことを計測データに基づいて明らかにすることで、その後の素早い復旧作業、および、設計変更につなげることができる。斜面に変状がないことを観測することは斜面崩壊検知センサーの重要な機能であることがわかった。

斜面崩壊検知センサー間の距離は約20m～約50m程度である。これ以下の小規模の崩壊を捕捉するには、掘削の進捗に応じて設置場所を移動すること、日毎の工事終了後に法面末端部に設置することなどが必要となる。工事法面の監視において、簡便に設置でき移動できる計測機器とすることが重要である。



写真5 - 1 法面崩壊の様子¹⁰⁶⁾

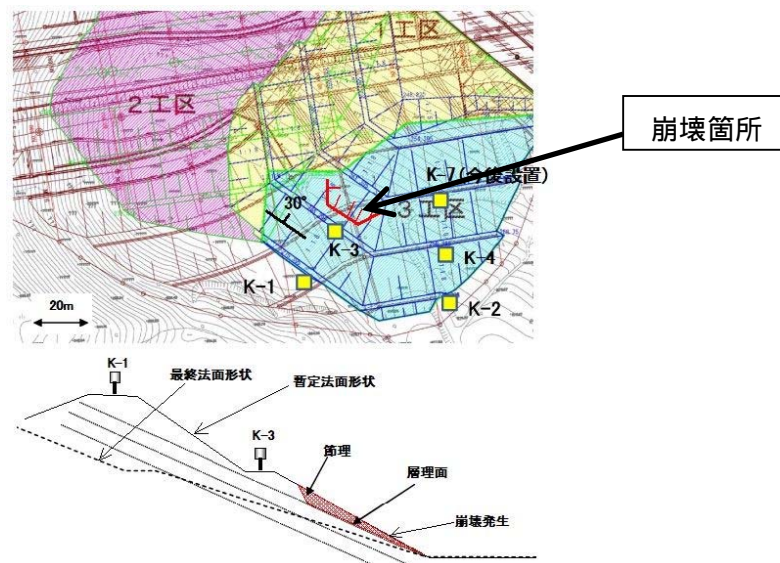


図5 - 8 現場の平面図および断面図¹⁰⁶⁾

5 . 4 . 3 家屋被災範囲に応じた設置位置

土砂災害防止法施行令（第2条）では、斜面崩壊が発生した場合に身体に危害が生じるおそれのある区域を土砂災害警戒区域（警戒区域）とし、さらに建築物を損壊するおそれのある区域を土砂災害特別警戒区域（特別警戒区域）とし開発規制している。警戒区域は斜面形状により定められており、急傾斜地（傾斜角30度以上、高さ5m以上）の場合、斜面上端から10m以内、下端から斜面高さの2倍（最大50m）以内で、この範囲が影響範囲とみなされる。特別警戒区域は、建物強度と流出する土砂の衝撃力や堆積による土圧との関係から決められ、影響範囲の中でも崩壊した場合に生死に直結するような危険区域と考えられる。これらは予防という観点から土砂の及ぶ範囲を明確にして減災しようとするものである。

よって、斜面変状の異常値を検出する場合において、崩壊メカニズムの想定とは別の視点で、崩壊土砂による影響範囲の想定から観測機器を設置する手法について検討する。斜面崩壊検知センサーを設置する斜面としては、亀裂などあきらかな変状がある斜面、変状はないが崩壊のおそれのある斜面、工事など開発行為がある斜面や法面などに大別される。通常、斜面の下端側あるいは上端側には、家屋や道路などの何らかの資産や施設、工事現場の場合は作業員や車両などが存在する。それらの斜面・法面に対して、崩壊規模や影響範囲を想定し、影響範囲内にある施設などを念頭において、斜面モニタリングすることが前提条件となる。

斜面崩壊の被災範囲の算定方法については、「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律施行令第2条第2号の規定に基づき国土交通省大臣が定める方法を定める告示」（平成13年3月28日国土交通省告示第332号）により定められている。それによれば、地形把握、崩壊土砂の移動高さと堆積幅の想定、土質定数設定などを行い、土砂の移動による力（衝撃力）と堆積による力（土圧）を算出し、建築物の耐力との比較を行って、建築物の耐力を超過する範囲を家屋被災範囲とする。

表5 - 7に、影響する地域の地盤に勾配がなく、崩壊土量が崩壊幅×到達距離の矩形状に均等に到達する場合の到達距離として概算値を示す。この到達距離の範囲内に建物などがある場合、その構造（木

造・軽量鉄骨構造、重量鉄骨構造、RC・SRC造）の違いによって衝撃力や土圧に対する耐力が異なるため、建物の構造を把握し、前述の告示（平成 13 年 3 月 28 日国土交通省告示第 332 号）に従って、土砂の衝撃力と土圧、および、建物耐力とを比較し、警戒区域と同レベルの危険性があるかどうかを把握しておく必要がある。

家屋被災範囲が設定されない場合は、5 - 4 - 1（実証実験における設置手法）、あるいは、5 . 4 . 2（工事法面における設置位置）に従って、斜面崩壊検知センサーの設置を行えばよいと考えられる。一方、家屋被災範囲が設定される場合、つまり、土砂到達範囲内に人命に関わる家屋被害が発生するような場合は、

建築物に最も近接する斜面末端部に少なくとも 1 個のセンサーを設置する。

建築物を斜面に投影したときの両端の末端部に設置する。投影には斜面の向きや建築物がある地形の状況（勾配など）を勘案する。

建築物と斜面との距離を到達距離にみたてて、その斜面高さまでの間に設置する。必要ならさらに上部に設置する。で建築物を投影したときの両端部上方の位置も同様に設置する。

グリッド状に充分密に設置できる場合、の限りではない。また、家屋被災範囲の算定式は、傾斜角 30 度以上で高さ 5m 以上の急傾斜地を対象とするものである。

表 5 - 8 に、家屋被災範囲を算定するために必要な F_{sm} （土砂移動による力（衝撃力））、 F_{sa} （土砂堆積による力（土圧））、および、 P_1 （土砂移動の衝撃力に対する建築物の耐力）に係る定数や参考値を掲載する。なお、国土交通省・国土技術政策総合研究所は、土質定数については必ずしも土質試験結果によらなくても実際の被災と算定例が一致すると報告²⁷⁾した。また、損害保険料率算出機構⁶⁷⁾は影響範囲を斜面高さの 1.8 倍かつ最大 35m、崩壊高さを 60m 以下として実態に合わせて計算した。

「待受け擁壁の設計計算事例」では、地質調査などで推定が困難な場合の崩壊土量について表 5 - 7 を参照している。

家屋被災範囲の状況に応じて、異常値検出するための設置位置、設置密度に留意する必要があるだろう。

表 5 - 7 斜面高・崩壊土量などと到達距離の関係（114）に加筆）

斜面高 (m)	崩壊土量 V (m^3)	崩壊幅 W (m) (注 2)	土砂の移動高 (m) (注 3)	到達距離 (m)
5 $H_s < 10$	40	14	0.6 ~ 1.0	5.7 ~ 9.5
10 $H_s < 15$	80	17	0.6 ~ 1.0	9.4 ~ 15.7
15 $H_s < 20$	100	19	0.6 ~ 1.0	10.5 ~ 17.5
20 $H_s < 25$	150	21	0.6 ~ 1.0	14.3 ~ 23.1
25 $H_s < 30$	210	24	0.6 ~ 1.0	17.5 ~ 29.2
35 $H_s < 40$	240	25	0.6 ~ 1.0	19.2 ~ 32.0
45 $H_s < 50$	370	29	0.6 ~ 1.0	25.5 ~ 42.5
50 H_s	500	32	0.6 ~ 1.0	31.3 ~ 50.0

注 1) 全国の斜面災害データ（4671 件）に基づき、斜面高さ毎に区分した崩壊土量が累積度数 90% となる値。

注 2) 崩壊幅 W は崩壊土量 V から近似式； $W = 3.94 V^{0.336}$ に代入して算出。

注 3) 小山内ら²⁷⁾は原則として、移動高 = 1 m とした。一方、「土砂災害防止に関する基礎調査の手引き」（（一財）砂防フロンティア整備推進機構、2001）によれば、崩壊深さの 1 / 2 とされ、小山内ら²⁶⁾の統計資料から崩壊深さ = 平均値 1.2m とすると、移動高 = 0.6m になる。よって、移動高 = 0.6 ~ 1.0m を用いた。

注 4) 一般的な到達距離は斜面高の 2 倍で最大 50m とされる。

表 5 - 8 被災範囲算定のための主な定数²⁷⁾⁶⁷⁾

項目	定数	記号	参考値	備考、引用文献
土石による 衝撃力 (F_{sm})	土石の移動高	h_{sm}	1m	27)
	"	"	0.6m、1m (崩壊深さの 1 / 2)	67)
	崩壊深さ	-	1.2m、2m	67)
	土石等の移動時の密度	ρ_m	1.8 t / m ³	67)、注 1)
	末端に隣接する急傾斜地居合いの土地の傾斜度	θ_d	(原則として) 0	27)
	土石などの移動時の比重		2.6	67)、注 1)
	土石等の移動時の容積濃度	c	0.5	67)、注 1)
	土石等の流体抵抗係数	f_b	0.025	67)、注 1)
	土石等の移動時の内部摩擦角		15 ~ 40 °	67)、注 1)
堆積による 土圧 (F_{sa})	土石等の単位堆積重量		14 ~ 20kN / m ³	67)、注 1)
	建物の壁面摩擦角		$\times 2 / 3$ (度)	67)、注 1)
建築物の 耐力	移動の力(衝撃力)に対する S 造建築物の外壁耐力	P_1	移動高 0.6m ~ 1m のとき 100kN / m ³	S 造(重量鉄骨)の外壁が損壊、67)
	移動の力(衝撃力)に対する木造建築物の軸組耐力	P_1	移動高 0.6m のとき 11.77k / m ³	木造の軸組破壊(全壊)、67)
	"	P_1	移動高 1 m のとき 7.68k / m ³	"

注 1) 原典は、一般財団法人砂防フロンティア整備推進機構：土砂災害防止に関する基礎調査の手引き(2001)による。

5 . 4 . 4 設置手法

斜面に設置する手順について検討する。機器設置手順を図 5 - 9 に示した。

これまでの実績に基づいて、観測が開始される状況とその斜面について類別すると、緊急に実施される観測(雨期の変状や被災斜面などで資料が充分でない場合)、計画立案から入る観測(現地調査などの資料に基づいて計画的に観測に入れる場合)、切盛土工事法面の観測に類別できる。それぞれの状況に応じて、斜面の異常値検出を行う必要がある。

の場合、踏査や既往資料に基づいて斜面の状況を把握し、システムの概略検討を行って速やかに観測を開始する必要がある。この場合、斜面崩壊検知センサーが軽量・安価・設置が容易であるという利点を活かし、必ずしも熟練者や専門家でなくても、速やかに多数の機器を斜面へ設置することが可能になると考えられる。表 5 - 6 に示すように少なくとも、斜面崩壊検知センサーを斜面方向に 3 個(末端部、中間部、頭部)、斜面幅が広ければ水平方向に 2 個(斜面の左右端)を設置する。斜面末端部は応力が集中し地下水が集まり、より早く変位を検知できることから設置する必要がある。また、斜面崩壊検知センサー以外で、頂頭部に伸縮計、深いすべりでは深度方向に小型孔内傾斜計(あるいは孔内傾斜計)を配置する。遠隔地が多いためカメラを設置して映像で確認できるようにしておくとうわかりやすい。緊急の場合、特に斜面変状が現れやすい重要位置に設置するように専門家の意見を踏まえる必要がある。機器設置のイメージを図 5 - 10 に示す。

の場合、既往資料に基づいて地質調査を行い観測システムを検討する。すでに設置されている観測機器がある場合は、機器の仕様にもよるがアナログデータの場合は A / D 変換し、無線通信機能を利用して本システムにデータを取り込み、斜面崩壊検知センサーのデータと同様にサーバー上でリアルタイム

処理・監視することが可能である。斜面延長が長い場合には周囲の谷地形などの状況を参考に設置位置を決める必要がある。

の場合、地質調査データに基づき施工工程を勘案して設置する。法面では通常小段への設置となる。工事の進捗に応じて、小段から小段へ機器を移動する。法面上部だけでなく、夜間は小段末端部へ設置することで、より変状をとらえやすくなる。

家屋被災範囲が設定される場合には、されない場合に加えて、対象家屋を念頭により密に斜面へ観測機器を設置する必要がある。家屋被災範囲の算定法は土砂災害防止法の特別警戒区域指定に準じるため、勾配 30° 以上で高さ 5m 以上の急傾斜斜面を対象とするが、その条件に該当しない場合であっても斜面近傍に家屋がある場合は留意して設置する必要があると考えられる。崩壊土量と到達距離から影響範囲内の斜面近傍に家屋がある場合、その家屋近くの斜面末端部に設置し、より確実に検知する必要がある。

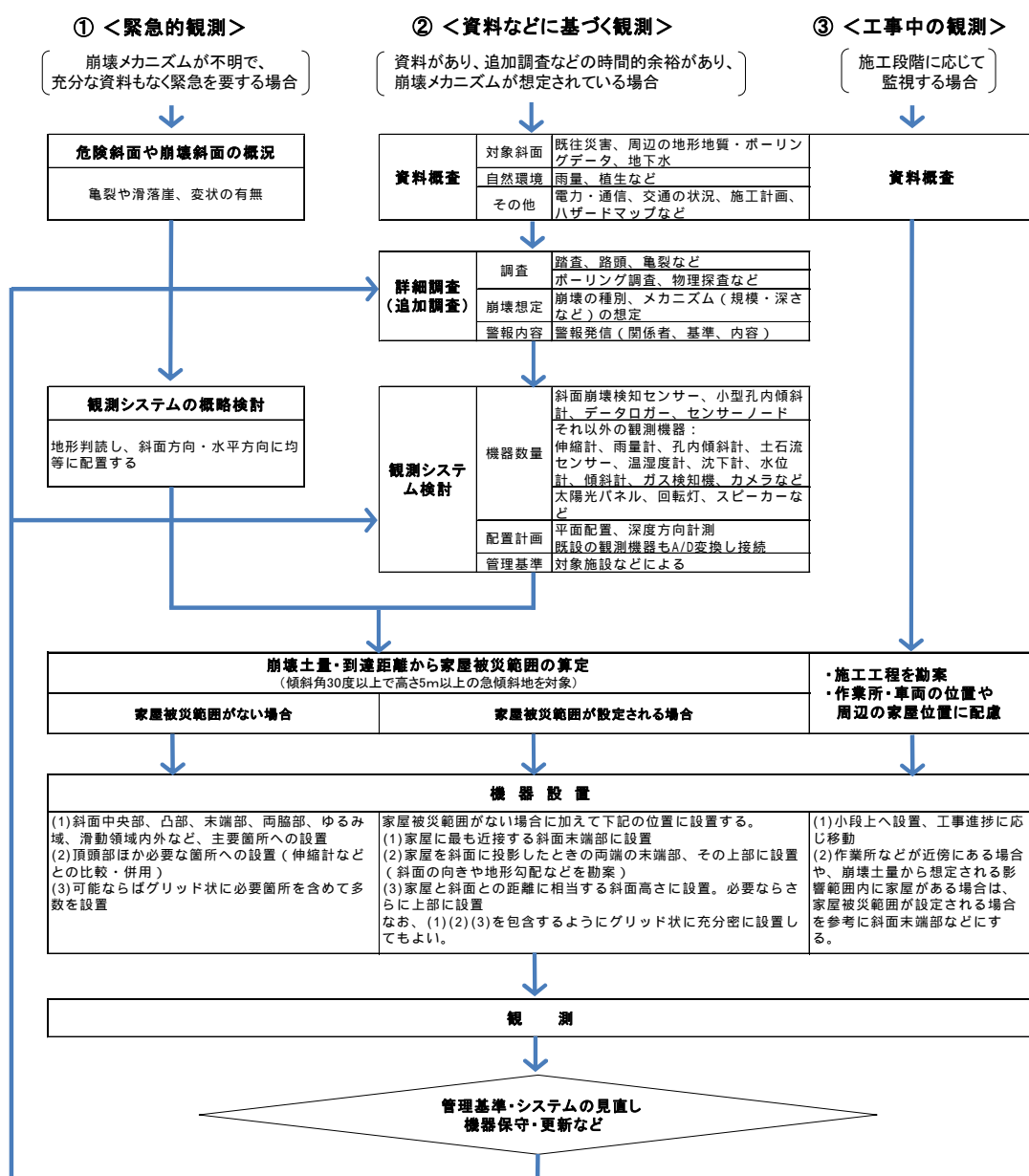


図 5 - 9 機器設置の手順

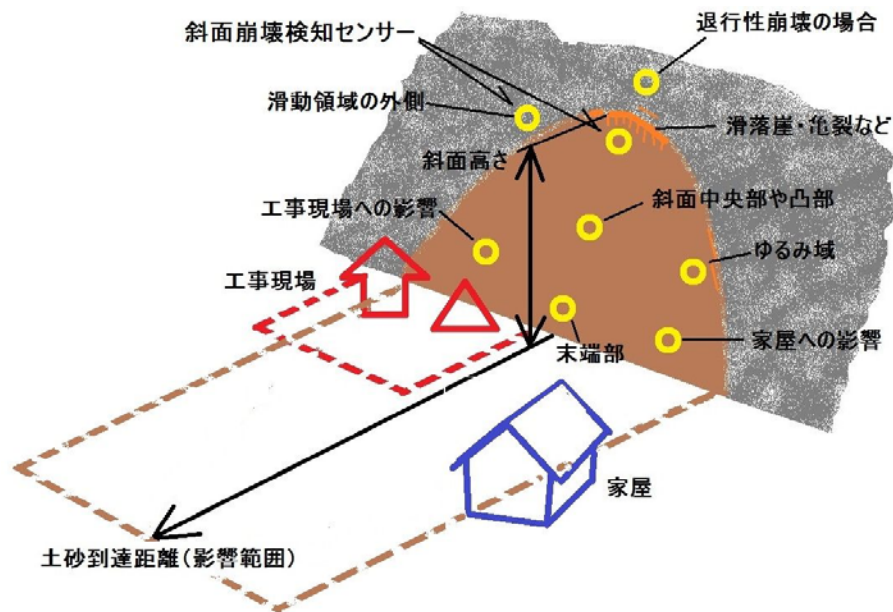


図 5 - 1 0 斜面崩壊検知センサー設置のイメージ

5 . 4 . 5 まとめ

斜面傾斜変位の異常値検出をするためには、実証実験における設置位置を参考（表 5 - 6）に、変状が早く現れる斜面末端部から、斜面を代表する中央部にかけて設置し、踏査や既往調査に応じ、あるいは、周辺の崩壊跡などの状況に応じて設置する必要がある。計画的に観測を行う場合、グリッド状に斜面崩壊検知センサーを配置し、崩壊ブロックの内側および外側に配置することで、崩壊ブロックを特定することが可能となる。

崩壊土量や土砂到達距離に基づいて家屋被災範囲を算定し、家屋被災範囲が存在する場合は、当該建築物へ土砂到達することのないように設置位置と設置密度を配置する必要がある。少なくとも建築物に近接する斜面末端部などに斜面崩壊検知センサーを設置して変位がないことを確認する必要がある。

工事法面では工事進捗に応じて変状を検知しやすい小段上に斜面崩壊検知センサーを移動する。また、斜面の一部分が崩壊するような場合でも、設置した位置で変位を観測しない場合はその位置にはひずみが及んでいないことを示すものと判断され、安全で素早い復旧作業に向けて斜面に関する情報を提供できるものとする。

5 . 5 ノイズ低減（分解能の改善）による異常値検出

5 . 5 . 1 MEMSセンサーの温度補正

実証実験を通し、斜面崩壊検知センサーのデータが温度特性を持っていることがわかった。そこで、恒温室に斜面崩壊検知センサーをセットし、温度特性を測定した。図 5 - 1 1 にその温度特性を示す。測定の結果、温度特性は MEMS 素子毎に異なっており、図 5 - 1 1 (b) の例では室温に対し、Y 軸傾斜角度で 0.05deg/ の温度特性を確認した。この場合、温度補正を行わないと、Y 軸の誤差は 5 倍

以上に膨んで測定データのノイズとして顕われてくることになる。

このため、センサー毎に温度特性を把握して補正する必要が生じて、現地試験結果を温度補正したものを図5 - 1 2に示す。補正前はX軸、Y軸とも0.3deg / 日程度の温度シフトがあったが、補正後はほぼフラットになることが見てとれる。よって、斜面崩壊検知センサー、および、小型孔内傾斜計ともに、MEMS素子を搭載するユニットの一つひとつについて実装を行った時点で温度特性をキャリブレーションする必要があることがわかった。

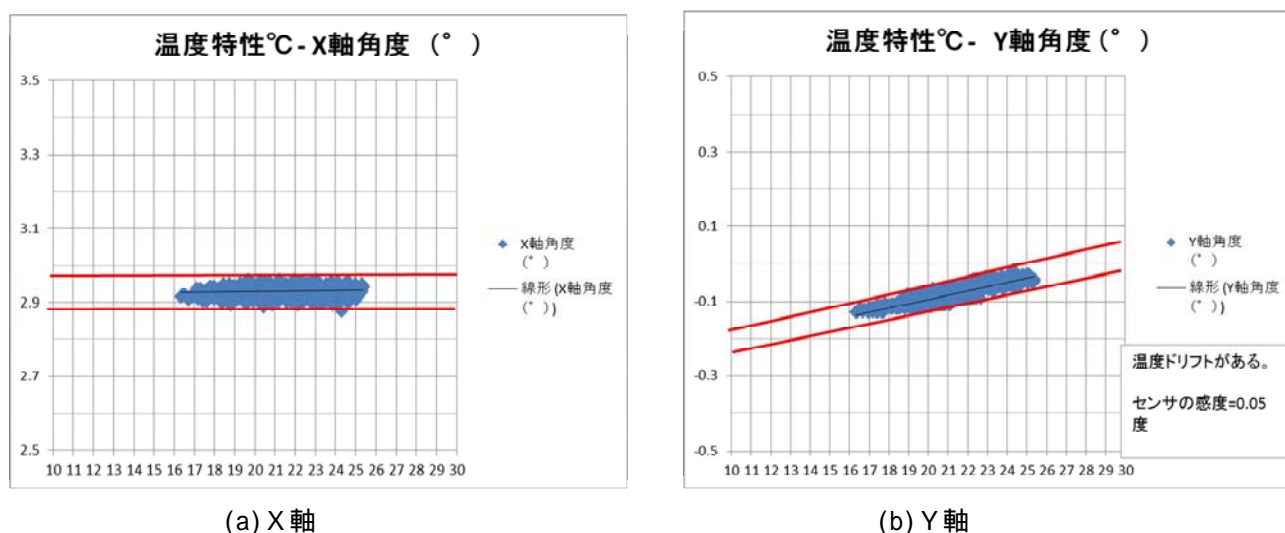


図5 - 1 1 センサーの温度特性

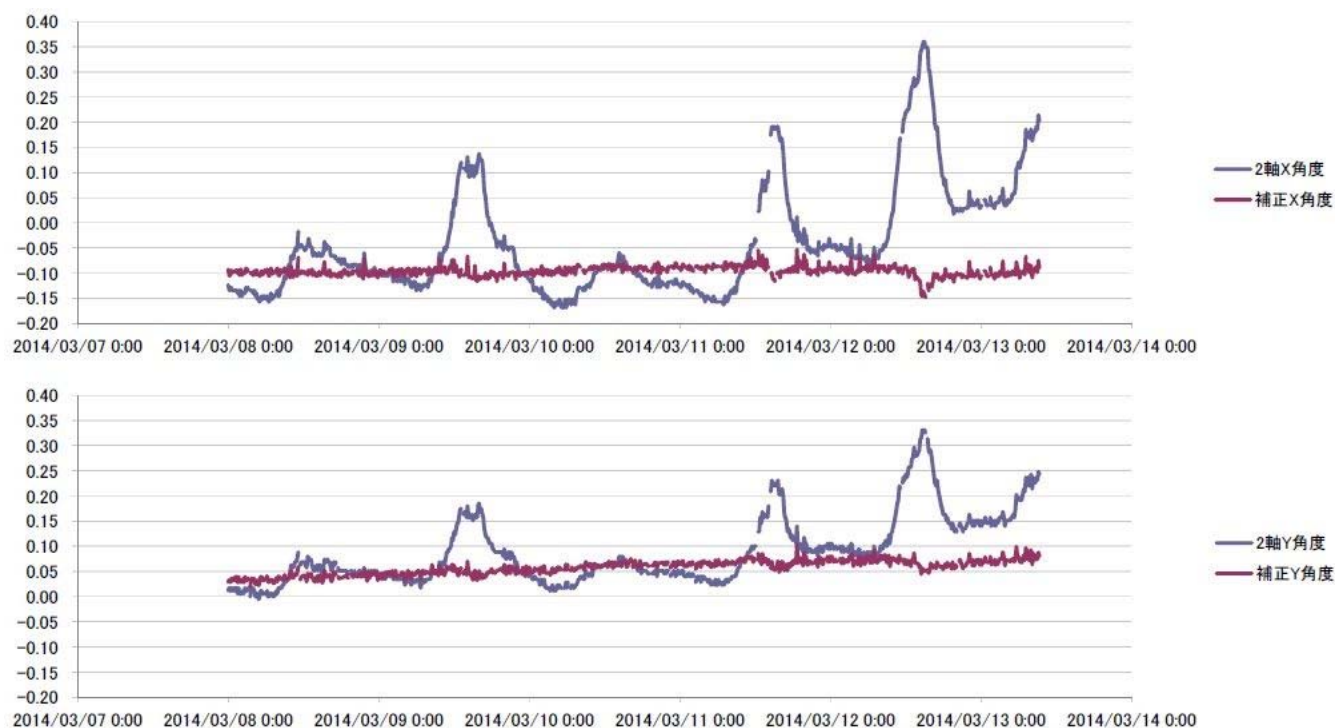


図5 - 1 2 現地試験結果の温度補正

5.5.2 シールドによるノイズ低減

前節で温度特性を調べた斜面崩壊検知センサーを写真5-2のようにアルミホイルでシールドして、電磁気的なノイズの有無について調べた。

その結果、図5-13のようにX軸傾斜角、Y軸傾斜角ともアルミホイルを巻いてシールドした方が若干ノイズは低減されることがわかった。MEMSの温度特性を考慮して、室温20.0～20.9の範囲内で傾斜角計測値のバラツキを調べると、アルミホイルなしの場合（N=485）、標準偏差がX軸、Y軸それぞれで0.0104、0.0117あったものが、アルミホイルを巻くと（N=44）、それぞれ0.00609（巻く前の59%）、0.00528（45%）に低下した。よって、ケースにシールドを施して（今回アースをとっていないがアースをとればさらに）電磁気的な影響によるノイズ成分を低減させることができるものと思われる。

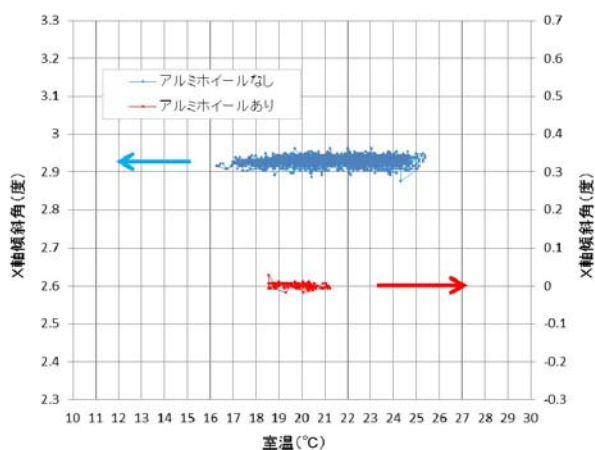


(a) アルミホイルを巻く前

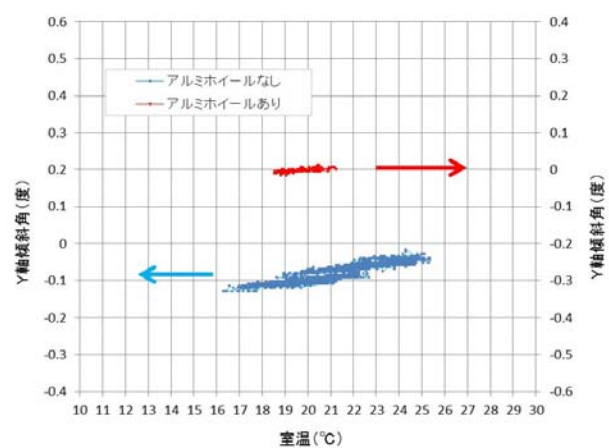


(b) アルミホイルを巻いた後

写真5-2 シールド試験



(a) アルミホイルなし
(期間：平成26年9月5日～12月15日)



(b) アルミホイルあり
(期間：平成27年1月9日～1月15日)

図5-13 シールドの有無による傾斜角測定値のばらつき

5.5.3 時間移動平均処理によるノイズ低減

田川郡添田町斜面のデータ整理では、ノイズの影響をできるだけ除去する目的で、計測データを1時間移動平均してランダムノイズを除去した。

傾斜角データに対する処理の流れを図5-14に示す。斜面崩壊検知センサーは、通常、MEMS素子内の命令処理の段階で、2秒間隔で計測した3点(計6秒間)の傾斜角データについて平均値をとり、その平均値をその時間の傾斜データ(生データ)としてデータロガーに送信している。その生データを10分間隔で繰り返し計測し、センターサーバーで蓄積する。田川郡添田町でのデータ整理では、サーバー内の処理で連続する6個の生データ(1時間分)をさらに平均化処理して当該時刻のデータとした。よって、当該時間に対して30分のタイムラグが発生することになるが、ノイズの除去を優先した。

表5-9に、田川郡添田町の観測データの生データと1時間移動平均データとの違いを示す。生データは10分毎の傾斜角データそのものであり、1時間移動平均データは当該時刻から過去に遡って連続した6点のデータを平均したものである。6点のデータの平均をとることによりランダムノイズを1/6に小さくすることができる。表5-9に示すように、1時間移動平均処理を行うことによって、ノイズ成分は標準偏差で0.0077degから0.0016deg(元の21%)に低減された。

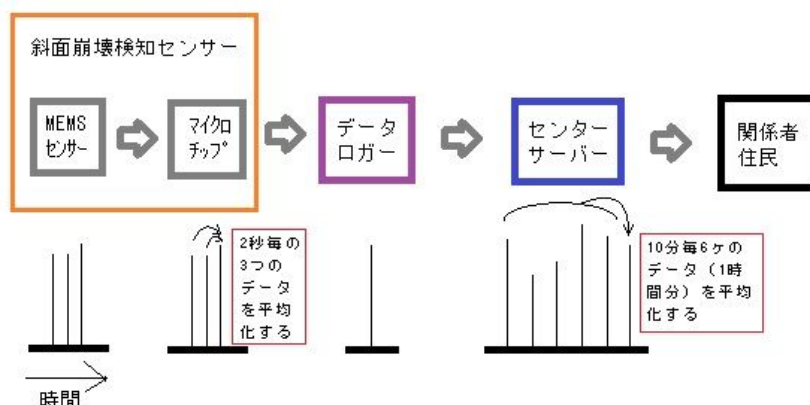


図5-14 測定データ処理の流れ(田川郡添田町の事例)

表5-9 観測データと1時間移動平均データの違い

ノイズ成分	生データ	1時間移動平均データ
平均値	0.000076 deg.	0.000076 deg.
Max.	0.05 deg.	0.025 deg.
Min.	-0.13 deg.	-0.022 deg.
標準偏差	0.0077 deg.	0.0016 deg.

1時間移動平均データを用いて、10分前から24時間前のデータとの差分によって作成した1時間当たりの傾斜角変化を図5-15に示す。生データはノイズ成分で隠れてしまうが、10分前、1時間前、3時間前との差分、および、2時間前～6時間前との差分(同図の楕円で囲んだ部分)では、異常値を比較的よくとられていることがわかった。加えて、長時間での差分をとる方が、感度が低くなる傾向が読

み取れる。

工事現場において、傾斜角変位速度 0.1deg/h によって警報を発する場合、（ノイズの影響を抑えることは前提として）10 分前との差分から換算するよりも 6 時間前との差分から換算する方が、ピークが低く感度が鈍くなる傾向がある。よって、工事現場毎に警報を発する頻度について、何時間前との差分をとって 1 時間当たりに換算するかによって感度的な調整をすることが可能である。

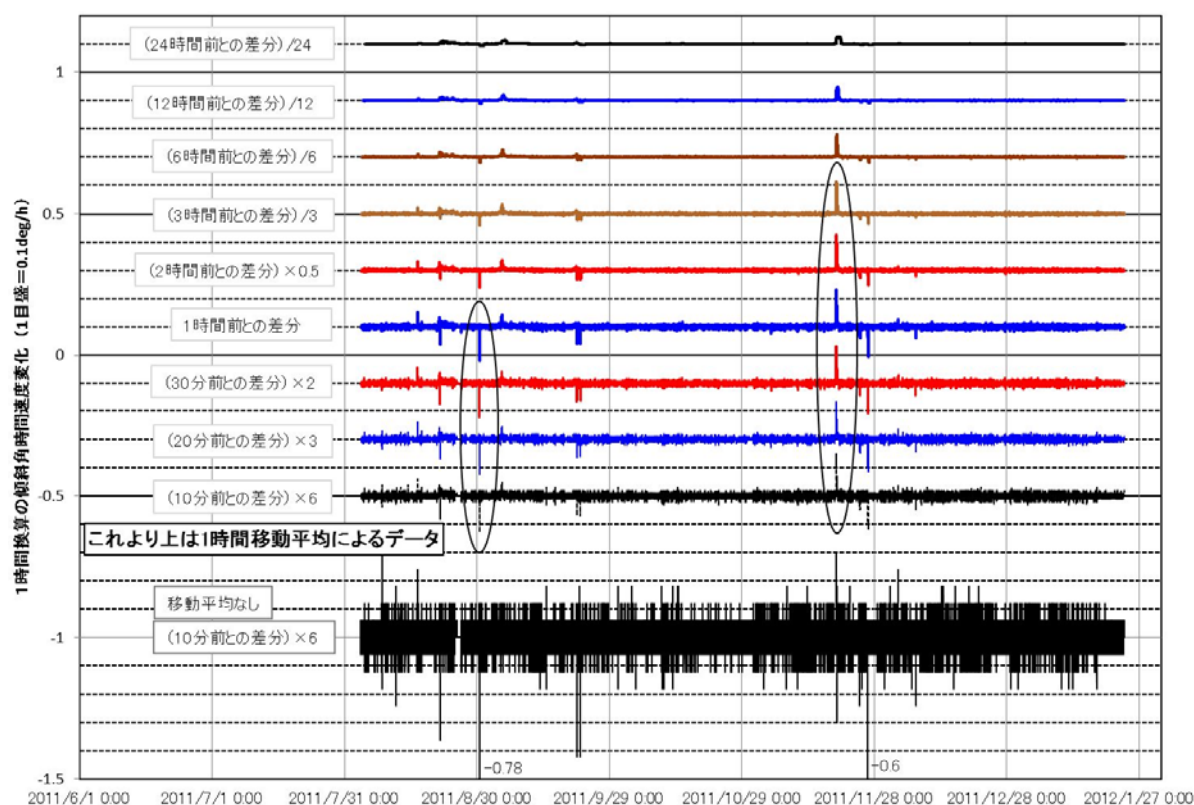


図 5 - 1 5 監視観測結果の変動速度図

5 . 5 . 4 まとめ

的確な異常値検出を行うためには、傾斜角変位計測の分解能を向上する必要がある。そのためにはノイズをできるだけ低減する必要がある。ノイズの大きな要因として、MEMS素子の温度特性があげられ、素子を搭載した斜面崩壊検知センサーの温度特性をキャリブレーションすることで気温の日変動の影響を受けにくい傾斜変位測定が可能になる。

電磁気的なノイズを低減するためケース自体をシールドしたところ、測定データのばらつきを約 5 割程度低減できる見通しを得た。

田川郡添田町の実証実験のデータ整理において（気温による日変動ノイズの改善前であったため）、1 時間移動平均（6 点の平均）をとってランダムノイズを取り除く処理を行った。1 時間移動平均データは生データと比べてノイズを 2 割まで低減できた。ただし、時間移動平均を行うとその分タイムラグが発生する。よって、MEMSセンサー内の命令処理により現在行っている平均化処理（2 秒毎の 3 点のデータの平均化）を、2 秒毎の数 10 点の平均化処理に改善するなどが検討課題となる。

5.6 リアルタイム・サンプリングに関する考察

5.6.1 傾斜角変位の加速度

酒田市の実証実験データ（図4-59）を基に、斜面崩壊検知センサーの日変化によるノイズをとり
のぞくため5日間移動平均を行った後、当該日の1日前と1日後の傾斜角の差分から傾斜角変位速度を
求め、図5-16に図示した。さらにその傾斜角変位速度の1日前と1日後の差分から加速度変化を求
め、図5-17に示した。

傾斜角変位速度は、法肩にクラックを発見して抑え盛土を施工し始めた10月18日頃を境にそれまで
増加していたのが減少する方向に変わっていることがわかる。傾斜角速度はそれまで2ヶ月間の最高値
(0.0003deg/h)を超え、4日間程度のうちにその5倍超まで増加して、対策工施工によって減少に転じ
た。

これを傾斜角変位加速度でみると、10月13日頃にゼロだった値が、それまでの2ヶ月間の最高値($8 \times 10^{-6}\text{deg/h}^2$)を超え、2日程度のうちにその2倍超まで増加した。

傾斜角変位の管理基準値として、傾斜角速度が 0.1deg/h 以上になった場合に厳重な監視が必要とお
いた。加速度でとらえると速度変化点をとらえるため、変化検知に対して感度がより高くなると考えら
れる。よって、管理基準値として有用であるとみられるが、感度がよいだけにノイズを含め微細な速度
変化もとらえ易いと考えられ、留意する必要がある。時間移動平均によりノイズ除去するとタイムラグ
が発生するので、気温日変化によるノイズなどを充分に取り除き、加速度変化の立ち上がりを明確にと
らえられるようにしていく中で検討していく課題とみられる。

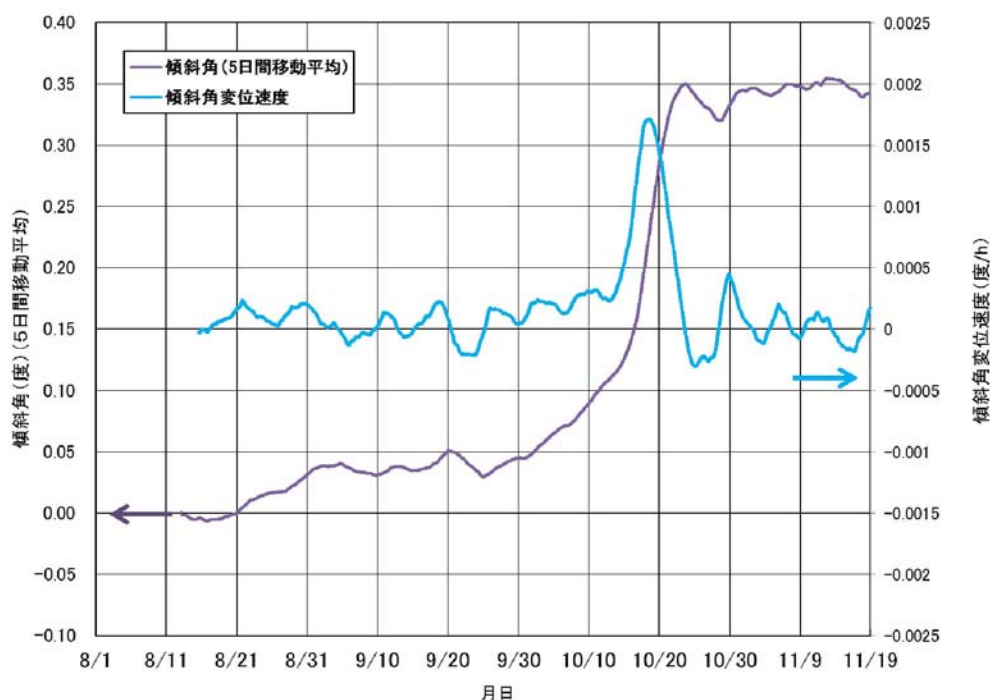


図5-16 傾斜角変位と傾斜角変位速度

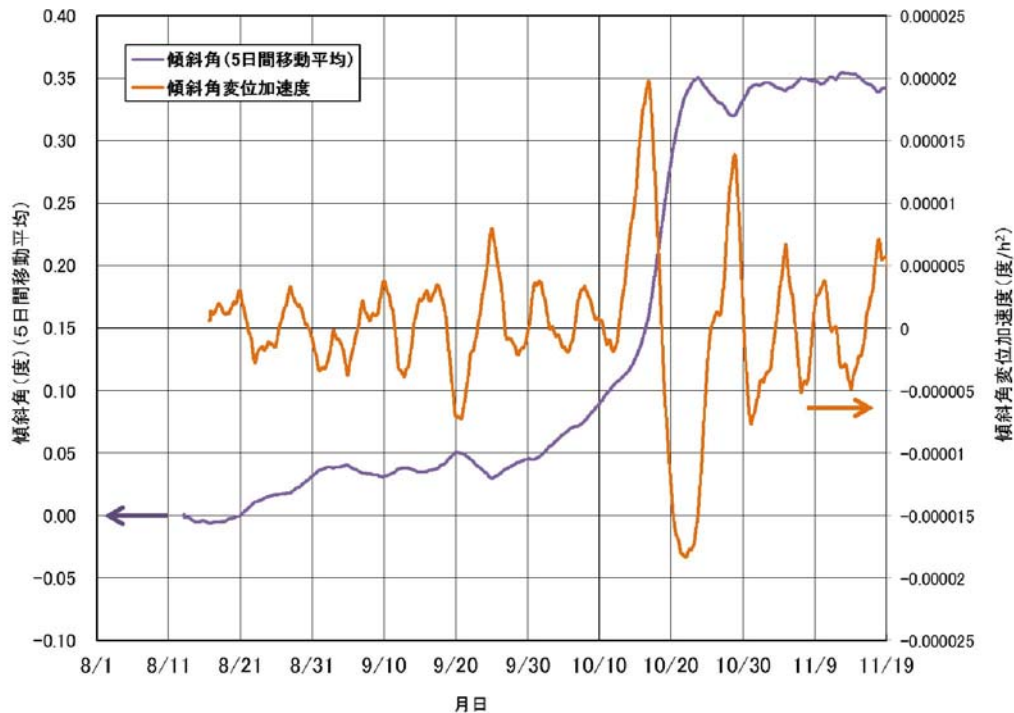


図5 - 17 傾斜角変位と傾斜角変位加速度

5.6.2 サンプル間隔

1) 崩壊時刻の予測とその対応（警報、対策工）の観点から

福園⁸⁾は時刻に対して表面移動速度の逆数をプロットすることにより正確な崩壊時刻の予測を行った。崩壊時点において、表面移動速度 になり、表面移動速度の逆数 ゼロ に収束することを利用したものである。図5 - 18に示すように、酒田市の例で傾斜角変位速度の逆数をプロットすると、気温変化などのノイズなどの影響を受けて波打つものの、全体的には崩壊に近づくにつれて傾斜角変位速度の逆数はゼロに近づいていく。ここで、崩壊時刻に近づくにつれて移動平均をする時間を短くしていき、日変動ノイズを適当なレベル以下に保つよう処理した。

10月16日～17日は12時間移動平均して12時間前のデータとの差分、18日は6時間移動平均して6時間前のデータとの差分、19日0:00～7:50までは1時間平均して1時間前のデータとの差分、19日8:00以後は1時間移動平均して10分前のデータとの差分をとって速度を求めたものである。傾斜角変位速度の逆数は、徐々にゼロに近づき、同図では、19日～20日頃にかけてほぼゼロに収束しているように見える。図5 - 19は、10月19日0時～18時をさらに拡大したものであり、18～19日にかけて抑え盛土を施工し、崩壊を回避した。

気温の日変動によるノイズの影響を含んでおり正確な崩壊時刻の推定には適さないが、早期警報システムとして崩壊の予兆をとらえ早く警報を出すこと、および、対策を講じる上では10分間隔のサンプリングで特に問題はないとみられる。平成26年広島豪雨土砂災害報告において、土田¹¹⁵⁾は実効雨量の計算を現行1時間ごとではなく10分毎に行っていれば、深夜3時ではなく2時20分頃に危険の判断をできた可能性を指摘しており、その点からも10分間隔のサンプリングが粗過ぎることはないと考えられる。実際、現時点までの設置実績において10分間隔のサンプリングで問題が生じた例はない。

サンプリング間隔を短くすれば電池寿命が短くなるため、メンテナンスの手間と予測の精度、実際の避難の状況などのバランスに配慮しつつ、サンプリング間隔の短縮化について検討していくことが考えられる。酒田の例では変状を発見して抑え盛土の対策工を施工した。このような場合、対策工を施工し始めた時点を時刻ゼロとして、1分毎、5分毎、10分毎と徐々に間隔を増やしていき、傾斜変位に対策効果が現れるかどうかを確認することが考えられる。斜面崩壊の計測は時間経過による傾斜量の差分をみておりイニシャル値はないが、工事や対策工施工では、着工時間がゼロ時でありイニシャル値ともいえる。そういう意味でもサンプリング間隔については検討余地のある課題とみられる。

2) 研究的観点などから

10分間隔のサンプリングでは、リアルタイムという名目に対して最大10分のタイムラグが発生している状況になる。例えば、体積含水率の増加や降雨を検知したら、1分毎のサンプリング間隔に変更するように命令を出すなど、ソフト的に変更する方法、あるいは、ハード的に変更する方法はありえると考えられる。

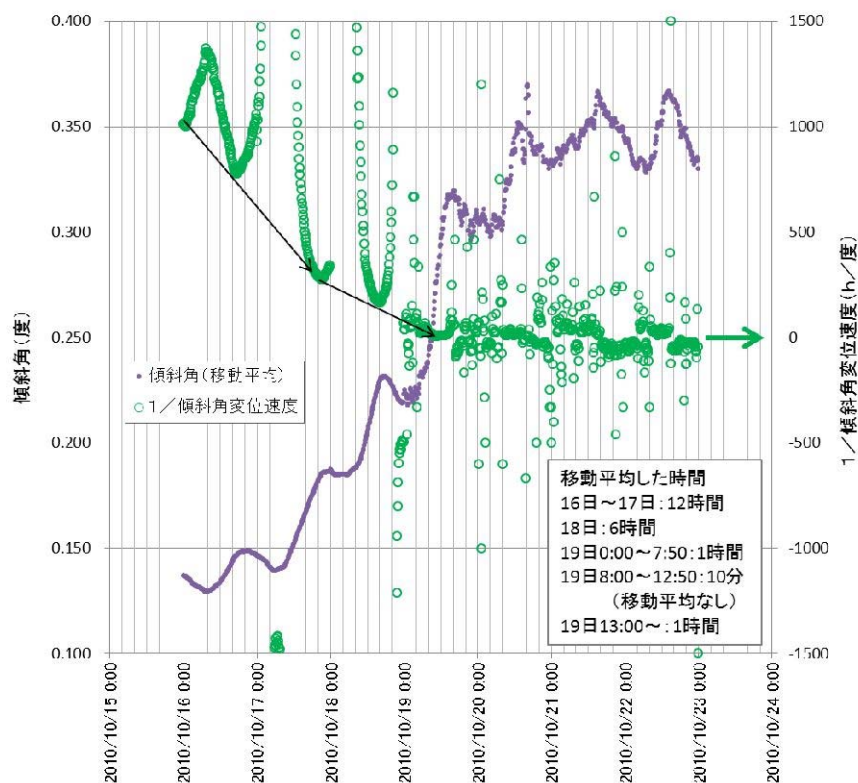


図5 - 18 傾斜角変位と1 / 傾斜角変位速度の関係

双方向通信システムを利用して、管理者側からデータロガーを介し、斜面崩壊検知センサーへ変更命令を出すことは可能であり、検討課題である。特に、工事現場の場合では、電力も融通できメンテナンスもしやすいため、サンプリング間隔をスイッチ切り替えにしておく設定も可能とみられる。

また、予想外の異常事態が発生する場合などにおいて、より短いサンプリング間隔を選べるようにしておけば、万一異常事態直後に対策を期待できなくても、将来の原因解明や研究の中に検討を委ねるといった機会を保持できる。

また、斜面崩壊はクリープ段階から面的な土塊の移動という時間的幅をもつ現象であるから、サンプリング間隔を短くするということではなく、斜面の性状に合わせて観測精度を高めていく方法が他にもあると考えられる。例えば、サンプリング間隔が 10 分のみまだとしてもセンサー設置台数を増加してグリッド状に密に配置し、面的により細かく変状をとらえられるようにして、システム全体として崩壊リスクに対して時間的リアクションを素早くとれるようにするなど、手法的な検討も重要と考えられる。

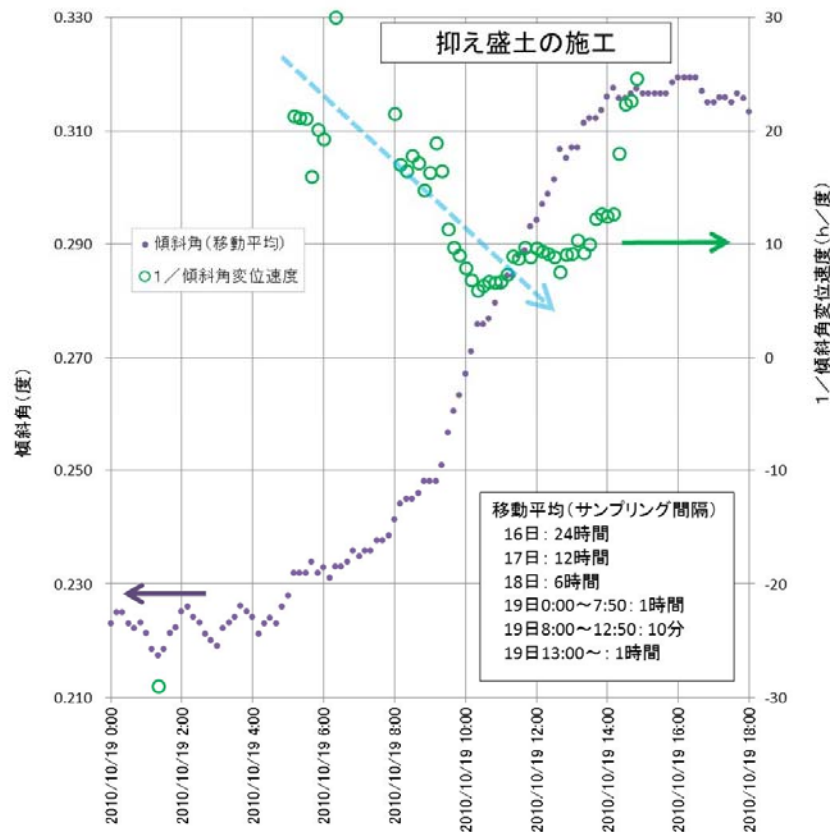


図 5 - 1 9 傾斜角変位と 1 / 傾斜角変位速度の関係

5 . 6 . 3 まとめ

リアルタイム・サンプリングにより異常値を検出するため、傾斜角変位の速度変化を基準として観測しているが、加速度に着目することで速度変化をより素早くとらえることができる。ただし、そのためにはさらにノイズの除去などが必要である。

傾斜角速度の逆数を図化することにより崩壊時刻を正確に推定できる可能性があり、10 分より短いサンプリング間隔の必要性も生じる。早期警報システムの運用上やこれまでの実績において、斜面変状の予兆に基づいて警報を発するためには 10 分間隔のサンプリングで特に問題は発生していない。

変状を検知し対策を行う場合や、工事の安全監視などにおいては、あるいは、研究目的や斜面における不測の事態を将来の検討に委ねる場合などにおいて、10 分より短い間隔のサンプリングを選択できるようにしておくことも必要とみられる。

5.7 種々の斜面に対する適用性

5.7.1 斜面崩壊メカニズムへの適用性

1) 浅層崩壊

本システムは浅層崩壊を対象としている。

斎藤⁵⁾によれば長い風化した斜面で基盤面に沿うすべりの場合、部分的にせん断抵抗が減少し、図5-20に示すような応力が発生し、表面中央でゼロ、斜面上側では引張応力、下側では圧縮応力が発生する。巨視的には並進しているような場合でも滑動体を2つに分ければ上半分と下半分ではそれぞれ引張と圧縮を受ける形となり、斜面崩壊検知センサーを設置する際、ある程度深く杭を打ち込めば平行移動するということではなく、相応する歪みを検出することができると考えられる。円弧すべりにおいてもひずみが微小な領域において、土塊が平行移動するとはいえず、傾斜変位として検知することは可能と考えられる。応力ひずみ曲線において限界状態の変状をみているのではなく、立ち上がりの弾塑性領域に近い状態をみていると考えられ、大変形して土塊が平行移動するような状態とは異なると思われる。

実証実験における斜面崩壊検知センサーの動きは、最終的に斜面変位の増大とともに、斜面下方向に向かって傾斜が増大するが、それまでの過程で細部では山側へ傾斜するような動きもみせ、地盤内の細かいひずみを反映しているように思われる。従って、崩壊メカニズムの解明に併せて、斜面の各部分がどのように傾斜していくのかを詳細に明らかにするという課題がまだ残っている。

小型孔内傾斜計については、先端のユニットを基盤内へ入れるぐらいの深さまで挿入することにより、先端部を不動点として取り扱い、各ユニットが地下の絶対的な傾斜変位をとらえることができると考えられる。

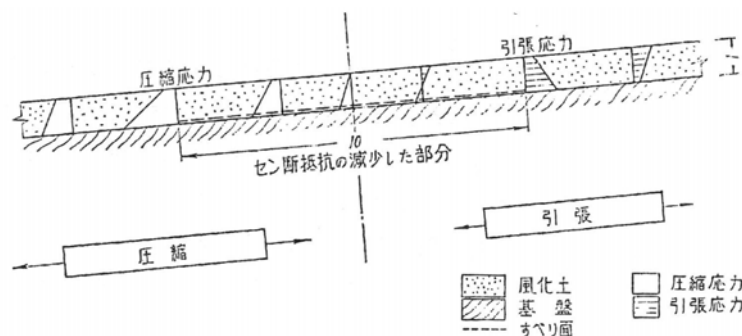


図5-20 斜面に生じる応力分布⁵⁾

2) 斜面崩壊全般に関して

斜面崩壊検知センサーや小型孔内傾斜計を適用する地盤としては、自然地盤と人工地盤がある。地盤災害としては表層崩壊、深層崩壊、土石流などがあるが、本研究では表層崩壊を主対象としてきた。表5-10にこれまでの実績に基づいて対象斜面(構造物)と使用した計測機器を整理して示す。地すべりでは伸縮計を併用することが多い。表5-11では、対象斜面(構造物)毎に斜面災害の種別と誘因、現象・メカニズム、斜面崩壊検知センサーの適用性などを一覧表にまとめた。(実績は表4-4参照。)

表5 - 10 対象斜面（構造物）と観測機器の設置実績

設置場所	監視対象	目的構造物など	対象斜面(物)種別							計測機器														
			表層・急傾斜	深層崩壊	地すべり	土石流	岩盤・落石	切盛土・法面	構造物	傾斜センサー	雨量計	伸縮計	カメラ	水位計	孔内傾斜計	沈下計	土石流センサー	温度計	振動計	ひずみ計	ガス検知器	酸素濃度計	回転灯	スピーカ
京都府	福知山市	道路脇河道斜面監視	道路（国道）	○							○	○	○	○		○		○						
福岡県	福岡市	地すべり監視	下水処理場	○							○													
高知県	土佐郡大川村	斜面監視（表層崩壊）	砂防対策	○							○													
兵庫県	朝来市	道路脇斜面監視	道路	○							○		○											
山梨県	富士川斜面	斜面崩壊監視	砂防斜面	○							○													
群馬県	利根川（砂防）	斜面監視	砂防対策	○							○													
沖縄県	沖縄市	斜面監視	道路（国道）	○							○													
福島県	いわき市	小学校校庭被災法面監視	自然斜面	○							○													
鹿児島県	奄美市	自然斜面	集落、道路	○							○													
山口県	岩国市	斜面監視	家屋	○							○			○										
福岡県	田川郡添田町	道路脇法面（二次災害）	道路（国道）	○							○	○	○	○										
静岡県	富士宮市	導水路脇斜面監視	発電所導水路	○							○					○								
奈良県	吉野郡川上村	斜面監視	農地	○							○												○	○
山形県	月山	斜面監視	道路	○							○	○												
鳥取県	日野郡日南町	鉄道路斜面監視	鉄道	○							○													
岡山県	高梁市	道路災害箇所監視	道路（県道）	○							○		○											
静岡県	三島市	導水路脇斜面監視	導水路	○							○					○								
山形県	西村山郡西川町	斜面監視	-	○							○	○										○		
和歌山県	海南市日方	斜面監視（二次災害防止）	崩壊斜面								○	○												
宮城県	栗原市	深層崩壊斜面監視	荒砥沢ダム貯水地		○						○													
山形県	小国村	地すべり監視	地すべり対策			○					○		○											
山形県	月山	集水井工事監視	地すべり対策			○					○		○											
山形県	西川町	集水井工事監視	地すべり対策			○					○	○				○						○		
兵庫県	朝来市	ダム湛水に伴う地すべり監視	ダム貯水池			○					○	○	○	○	○	○				○				
岡山県	高梁市	地すべり監視	地すべり斜面			○					○		○											
東京都	大島町	土石流発生斜面監視	被災斜面				○				○	○	○	○										
鳥取県	日南町	斜面転石監視	鉄道				○				○													
兵庫県	丹波市市島町	転石監視	転石				○				○	○	○	○										
静岡県	小山町	掘削斜面監視	ダム堤体					○			○		○											
山形県	酒田市	切土法面監視	道路					○			○													
栃木県	日光市	貯水池斜面監視	ダム					○			○				○									
兵庫県	神戸市	近接共同溝への影響監視	大学病院					○			○								○					
福島県	喜多方市	貯水池斜面監視	発電用ダム					○			○				○									
大阪府	高槻市	鉄道橋梁工事に伴う変位監視	鉄道（東海道線）					○			○													
福岡県	飯塚市（冷水峠）	切土法面監視	道路（国道）					○			○													
福島県	いわき市	盛土法面監視	発電所					○			○													
福岡県	京都郡みやこ町	切土法面監視	ダム取付道路					○			○	○												
岡山県	倉敷市	根切掘削監視	架道橋					○			○													
埼玉県	熊谷市	堤防掘削監視	河川堤防					○			○													
宮城県	仙台市	切土法面	住宅					○			○													
兵庫県	三木市	造成地切土斜面監視	最終処分場					○			○													
奈良県	北葛城郡河合町	鉄道路法面監視	鉄道（私鉄）					○			○													
鳥取県	鳥取市	近接施工監視	専門学校					○			○													
静岡県	御殿場市	切土掘削斜面監視	ダム					○			○													
新潟県	村上市	掘削斜面監視	河川					○			○													
秋田県	仙北市	法面監視	発電所					○			○													
岩手県	住田町	掘削斜面監視	砂防対策					○			○													
高知県	安芸市黒島谷川	砂防ダム工事斜面	砂防工事の安全					○			○													
埼玉県	秩父市	掘削斜面の監視	道路					○			○	○												
三重県	鳥羽市答志島	斜面掘削監視	-					○			○													
京都府	福知山市大江町	道路脇法面監視	道路（国道）					○			○													
鳥取県	日野郡日野町	近接施工管理	鉄道					○			○													
台湾	高雄市	法面監視	産業廃棄物処分場					○			○													
徳島県	板野郡板野町	掘削斜面監視	道路（高速道路）					○			○													
奈良県	金峯山寺	石垣監視	寺（世界遺産）							○	○													
鳥取県	米子市	橋脚監視	鉄道橋							○	○													
合計				19	1	5	1	2	26	2	56	11	10	6	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1

表 5 - 1 1 斜面崩壊や人工地盤などへの適用性 (5 7) 1 1 1) 1 1 2) 1 1 3) を参考に作成)

地盤分類	対象	誘因	現象、メカニズムなど	地盤 (素因)	斜面崩壊検知センサーの適用性	設置実績	適用性
自然 地盤	表層崩壊、急傾斜地崩壊	降雨	一般的に地質との関連は小さく、地形や地下水での兆候もみられない。植生による影響がみられ、表層土が小規模に突発的に崩壊することが多い。土塊は大きな移動速度で乱れて斜面から抜け落ちる。火山地域では火山灰や降下火砕物が広く堆積した傾斜地で、降雨により地下水位が高くなると基盤との境界部でクリープが進行、大規模な崩壊に至る。	谷地形、尾根地形など	多数の実績を有し最も適用性が高い。表層を斜面崩壊センサー、深度的に小型孔内傾斜計で監視する。	19 ケ所	
	深層崩壊	500 ~ 1500mm の総雨量地震	地質構造 (層理、褶曲、断層など) との関連が大きく、崩壊前に兆候 (地形・地下水) がみられる場合がある。比較的急勾配で突発的に発生し、土塊は大きな移動速度を伴い乱れる。非火山地帯などでは多重山稜や山頂緩斜面、クリープ、クラック、滑落崖、末端小崩壊、はらみだし、崩壊跡地の存在などの斜面変形に特徴がみられる場合がある。	流れ盤構造など	実績もあり適用性がある。崩壊後の 2 次災害防止のために重点ヶ所に設置する。	1 ケ所	
	地すべり	地震、降雨、融雪 (地下水)	緩勾配の地すべり地形を呈し、地下水や重力の影響で継続的・断続的にゆっくり移動、一旦止まっている場合でも再発性がある。移動速度は小さく、土塊は乱れず一体的に滑動する。	緩勾配、地すべり地形など	実績があり適用性はある。重点ヶ所に設置する。	5 ケ所	
	土石流	降雨	山腹や谷底にある土砂が降雨や流水により一気に下流へ流される。斜面に存在する土砂が降雨によって移動し、天然ダムを形成した後に決壊したり (天然ダム決壊型)、そのまま渓流を流下したり (山腹崩壊型)、渓流の河床堆積物を巻き込み (渓床堆積物移動型) 移動する。	降雨により脆弱化する風化土表層	実績がない。渓流が宅地へ流出する地点や上部の傾斜変化点山腹への設置が考えられる。	1 ケ所	
	岩盤崩壊、トップリグ、落石	地震	もともと不安定に急崖や急勾配斜面に存在している岩塊や転石がまとまって一瞬のうちに移動・落下する。	クラックや節理面の弱線	予兆を捉えた例はない。対象物に直接固定する。	2 ケ所 (転石)	○
人工 地盤 構造 物	盛土斜面	降雨・地震	構造物毎に安定計算を行い必要な対策工を適応・施工。地質調査結果、基礎地盤処理、施工期間中の降雨や地震、アンカーや法枠などの施工状況によって、また、近接施工の場合や、地質的要請 (地震断層、地すべり、埋没谷、軟弱地盤、液化化層、流れ盤・受け盤、退行性の崩壊など) に応じて、斜面監視が必要となる。	-	実績がある。施工中の安全確保や災害後の 2 次災害防止のため、重点ヶ所に設置する。延長が長い構造物でも適用可能と考えられる。	26 ケ所	
	切土斜面	降雨、地震					
	構造物	-	橋脚、橋台など重要施設の動態観測	-	実施例は少ない。対象物に直接固定する。	2 ケ所 (石垣・橋脚)	

注) : 適用性大、○ : 適用性あり、 : 実績が限られ適用性が不明

5.7.2 斜面観測機器の比較

観測計器を表5-12にまとめる。精度・測定範囲などについては特定の製品を参考にしたものであり、目安として記載した。斜面崩壊検知センサーと小型孔内傾斜計以外の市販製品の価格帯は機器単品の価格を念頭においており、システム全体のケースや設置作業のための人件費・維持管理費などを含めるとさらに価格差が開くとみられる。なお、設置場所や地域によって設置費用や管理費用は異なってくる。斜面崩壊検知センサーは現時点で公称1機5万円（リース）～7万円（販売）であり、原価低減（材料費・製造費）によりさらに安価（5万円以下）にできると見込まれる。

最近ではMEMS傾斜計を組み込み、斜面崩壊検知センサーと同様の検知センサーが販売され始めている。しかし、設置位置の選定、崩壊メカニズムとの対応性、管理基準の設定、計測精度の改良、実績に基づくフィードバックなどに基いた異常値の検出精度において本システムとは大きな差があると考えられ、研究を継続的に前進させることによって優位性を保つことが必要とされる。

全般的に安価で設置・維持管理の容易さにおいて、一般的な観測機器に対し優位である。なお、斜面の変状をとらえるためには種々の観測機器の特長を活かして併用する必要がある。

表5-12 斜面観測機器の適応性（参考）

分類	名称	測定対象	自然斜面										精度／測定範囲 (概略)	価格帯					備考
			亀裂なし 急傾斜地	指定斜面 地すべり	亀裂あり 土石流	不安定斜面 崩壊斜面	不安定岩塊	転石・落石	火山泥流	切盛土斜面	構造物	地下空間		5万円以下	5～10万円	10～50万円	50～500万円	500万円以上	
傾斜	斜面崩壊検知センサー	角度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	±0.0025°／±30°(2軸)	■	■	★			★はシステム全体
	小型孔内傾斜計	角度(深度方向)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	±0.0025°／±30°(2軸)		■	■			ユニット数による
	傾斜センサー	角度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2軸±0.04～3軸0.5°／±30°	■	■	■			1)2)3)4)
	傾斜(転倒)センサー	転倒の有無	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	30度以上傾いたとき検知	■	■				5)
	孔内傾斜計	角度(深度方向)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	±0.00028°／±30°			■			6)
伸縮長・ひずみ	伸縮計	伸縮長	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	1mm以下／800mm			■			7)
	光ファイバー計測	散乱光(OFDR方式)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1mm／50m				■	■	8)9)
	光ファイバー計測	散乱光(BOCDA方式)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	±0.01%／位置同定約5～30cm				■	■	10)
3次元座標	トータルステーション	距離・角度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	角度±0.0014°、距離±3～6mm程度			■	■		11)
	レーザーキャナ計測	〃	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	±2mm(距離に関係なく)				■	■	12)
	GPS測量	3次元座標	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	数mm以上(最低4衛星)			■	■		13)14)
	デジタル写真測量	〃	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	±0.5mm／10m	■	■	■			15)
イベントの有無	ワイヤセンサー	切断の有無	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	±25mm／最長30m			■			16)17)
	光(ファイバ)ワイヤーセンサー	〃	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0/1の判定			■			18)
振動・加速度・地震動	振動センサー	振動	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1500μA/m/s ² (15μA/gal)			■			19)
	衝撃検知センサー	加速度(衝撃値)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3～10G			■			20)
	震度計(三成分)	地震動	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	±2048Gal(砂防堰堤)			■			21)
水位	水位計	水位、超音波反射時間	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	±1.0cm		■	■			22)
	水位計	水圧	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.05%F.S.(at20℃空気圧)		■	■			23)
映像	高精度カメラ	映像	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	特になし		■	■			

(注) 斜面欄のマークは、○：適用、△：条件あり、／：価格帯欄のマークは、△：範囲内、○：システム全体

(出典) 1) 明治コンサルタント(株)；<http://www.meicon.co.jp/unit/>、2) 株式会社リプロ；<http://www.ripro.co.jp/Tokyo-001/Download-07.pdf>、3) 株式会社リプロ；<http://www.ripro.co.jp/Tokyo-001/Download-07.pdf>、4) 株式会社レックス；<http://www.rexse.com/category/displacement/slope-displacement-monitoring/>、5) 株式会社拓和；<http://www.takuwa.co.jp/Product/detail/59>、6) 株式会社ジオファイブ；<http://www.geo5.co.jp/geology/index8.html>、7) 応用地質(株)；http://www.oyo.co.jp/products_lists/s-dl-extensometer-jr-lite/、8) OSMOS技術協会；<http://www.osmos.jp/?workscat=brige>、9) 富士テクニカルリサーチ；http://www.ftr.co.jp/n/products/fbi_gauge/、10) 鹿島建設(株)；<http://www.kajima.co.jp/tech/monitoring/structure/ofs.html>、11) 株式会社レックス；<http://www.rex-rental.jp/sok/set5ws.html>、12) 明治コンサルタント(株)；<http://www.meicon.co.jp/laser/index.php>、13) 国際航業(株)；<http://www.shamen-net.com/prod01.html>、14) 株式会社リナン；<http://www.rinan.co.jp/gps.html>、15) 株式会社横河技術情報；<http://www.yti.co.jp/vbm/vbm.shtm>、16) 株式会社ミライト；<http://sfs.mrt.mirait.co.jp/solutions/03?c=04>、17) 坂田電機(株)；http://www.sakatadenki.co.jp/product/_wire/wire.html、18) 株式会社拓和；<http://www.takuwa.co.jp/Product/detail/55>、19) 株式会社拓和；<http://www.takuwa.co.jp/Product/detail/56>、20) 株式会社リプロ；<http://www.ripro.co.jp/Tokyo-001/Download-07.pdf>、21) 株式会社拓和；<http://www.takuwa.co.jp/Product/detail/58>、22) 株式会社拓和；

5.7.3 まとめ

本研究は、監視対象として浅層崩壊や急傾斜地を扱うこととしている。ただし、適用実績においては必ずしも崩壊メカニズムがわかって設置している状況ではなく、地質調査データなどがない場合も多い。実際に、表5-10に示すような様々の斜面、すなわち、浅層崩壊や急傾斜地、地すべり斜面、深層崩壊や土石流が発生した後の斜面、掘削法面、転石や構造物を対象として監視を行ってきた。

観測用機器としては、斜面崩壊検知センサーに限らず、斜面災害の状況や崩壊メカニズムに従って、異常値検出の確度を確保するため種々の計測機器を併用している。一般的に、観測機器は高価で専門的な知識を必要とするため、安価で設置の容易な斜面崩壊検知センサーをグリッド状に配置し、それ以外の計測機器を条件に応じて必要箇所に設置することが効率的と考えられる。

5.8 斜面災害リスクのリアルタイム評価手法の活用

5.8.1 総合的災害リスクマネジメント

防災力を向上するための事前対策には、ハード施策が主である被害抑制対策、ソフト施策が主である被害軽減対策、そして、警報などが含まれる災害の予知予見がある。災害発生後の対策としては、被害の評価、人命救助などの緊急災害対応、災害前の状態に戻すための復旧対策、さらなる振興策を含んだ復興対策がある。

本早期警報システムが総合的防災マネジメントに関わると思われる点を、表5-13に防災対策の段階毎にまとめた。防災対策の段階としては、平常時、発災直前、発災後がある。平常時としては、例えば、豪雨後の斜面変状の確認、降雨量と変位との関連性の把握などがあり、発災直前では災害発生の時間的や規模的な予測、警報の発信などがある。発災後としては、2次災害防止、警報の解除、工事安全確保などが考えられる。これらの直接的な効果に加え、長期間にわたって観測を続けることにより、平常時から地域住民にも斜面動態に関して関心を持ってもらい、どの程度の降雨量で危険になるかを認識してもらい、防災マニュアルなどを通じて、発災時の適切な行動を促し地域防災力を向上するという効用があると考えられる。より早い時間に斜面の実際の変状についての情報を提供できれば、深夜の避難を避けることもできる。行政としては、斜面の状況をリアルタイムでどこに居ても把握することができ、斜面毎に確実な2次災害防止の処置をとれるものとする。実証実験では、崩壊斜面の復旧工事と工事中の円滑な道路交通確保を行い、システム運用面でも問題がないことを確認した。

また一旦警報を発令すると、いつどのように解除したらよいか難しいという問題がある。長期に継続して斜面を監視したデータに基づいて、豪雨が止んだ後には適切なタイミングで警報解除できる利点がある。

こうした防災時の行動や防災管理の担い手（当事者）として、自助、公助、共助がある。管理面では行政が中心になる場合が多く、本早期警報システムは公助や共助の仕組みの中で機能発揮するものと思われる。近年の豪雨災害（平成25年大島、平成26年広島市など）では、過去に例がないほどの降雨量があり、避難勧告が深夜になったり、夜間停電や既設堰堤を土石流が乗り越えるなどの予期せぬ状況が発生して被害が拡大する傾向もある。急傾斜地の近傍や土砂災害履歴のある扇状地の宅地化もそれに拍

車をかけている。数多くある急傾斜地全てを監視するぐらいのことが必要になるとも限らない。本早期警報システムを普及・活用することによって、総合的防災リスクマネジメントの各段階で直接的にも間接的にも役立っていくようにして、また、不足する点があればシステム改良にフィードバックしていくことが課題となる。

表 5 - 1 3 斜面崩壊検知センサーによる早期警報システムの効果・効用

段階	内容	直接的効果	効用
事前対策 (平常時)	簡便に設置・増設できる	土砂災害警戒区域斜面への設置	防災対策(マニュアル)への反映、 地域住民の防災意識向上
		災害履歴斜面における再度災害の防止	
	傾斜変位の常時観測できる	斜面毎に降雨と変位との関連性の傾向などを平時から把握	
	面的に(深度も)数多く設置できる	豪雨後や地震後の迅速な点検	
事前対策 (発災直前)	地盤の異常変位をより早い段階で把握できる	より早い段階での警報や避難行動の開始	発災初期の被害量の予測と迅速な対応
	(設置が可能な場合)亀裂のような初期的異常が生じた斜面へ容易に多数の計器を設置できる	崩壊規模の予測	
		より確実な警戒・避難行動の実施	
発災後の対策	被災斜面へ容易に多数の計器を設置できる	2次災害の防止、復旧工事の安全確保	円滑で迅速な復旧作業の支援と安全確保
	リアルタイムで集中的な監視を行う	夜間や遠隔地にあっても情報把握でき安全を確保	
		応急・復旧時の円滑な通行確保	
	リアルタイムかつ長期にわたり微小変位を監視する	異常がなく元の数値レベルに回復したら警報を解除	適切な警報の解除
(災害以外) 工事現場	簡便に設置でき移動も容易にできる	工事進捗に合わせた法面の監視	工事安全確保
	斜面のどこにでも設置できる	影響範囲にある家屋の被災防止	

5.8.2 海外の現場への適用性

CREDの調査⁷¹⁾が示しているように、地盤に関わる自然災害(土砂災害、暴風雨災害、地震災害)の比率は年々3~4%ずつ増加してきた。発展途上国では、自然災害に対してインフラ整備が追いついておらず、自然災害に対する情報不足や住民の知識不足、自然災害に対する構造物自体の脆弱性、警報や避難体制・整備の遅れ、救助や復旧時の2次災害など、多くの問題を抱えている。

本研究では、中国(中華人民共和国)で機器を設置し長期間観測を行った。電波や電力の事情、要員の確保、諸法規への対応、機器メンテナンスの難易さ、盗難への対応など多くの課題をある程度クリアにし実証実験を継続してきた。中国の名目GDPは世界第2位になったが、一人当たりGNI(国民総所得)¹¹⁷⁾では6,560ドル(2013年)で世界76位にある。このGNIレベルは、世界銀行の分類¹¹⁷⁾によれば、高位中所得経済国レベル(4,125ドル以上12,746ドル以下、タイ、マレーシアなど49カ国が含まれる)に相当し、発展したとはいえ地方や都市周辺部では貧困の問題も残っている状況にある。そうした状況を踏まえ、中国における実証実験に基づいて、海外において斜面崩壊検知センサーを適用

する場合の留意点を図5 - 14にまとめた。

斜面崩壊検知センサーは安価（約5万円）で容易に設置できることを特長とするが、為替レートを1ドル117円（平成27年1月頃）とした場合、1機427ドルになる。中国では一人当たりGNIの7%程度に相当するが、低位中所得経済国を対象とすると10%～41%、低所得経済国では41%以上になり、一人の年間所得の半分近くに相当するものとなる。

海外で適用する場合、ODAなどに関係して政府の援助の下で適用することになるが、さらにコスト低減、厳しい設置条件に適應していくように改良が必要であろう。一方、極端な条件下では代替する方法がなくコストを許容する場合もあると思われる。本システムでは携帯モバイル網の部分人工衛星回線に代替して動作試験を実施¹²⁾¹¹⁶⁾しており、電波事情が極端に悪い状況でコストを考慮しないならば、リアルタイム・データ伝送が可能である。

現地の法制度や自然環境、住民意識に応じ、機能を付加あるいは簡素化したり、マニュアルなどを整備していく必要がある。また、機器を直接取り扱う関係機関へシステムの利便性について啓蒙するとともに、盗難防止などへの対策の一環として受益住民への理解を求めることも途上国では必要な行為となる。

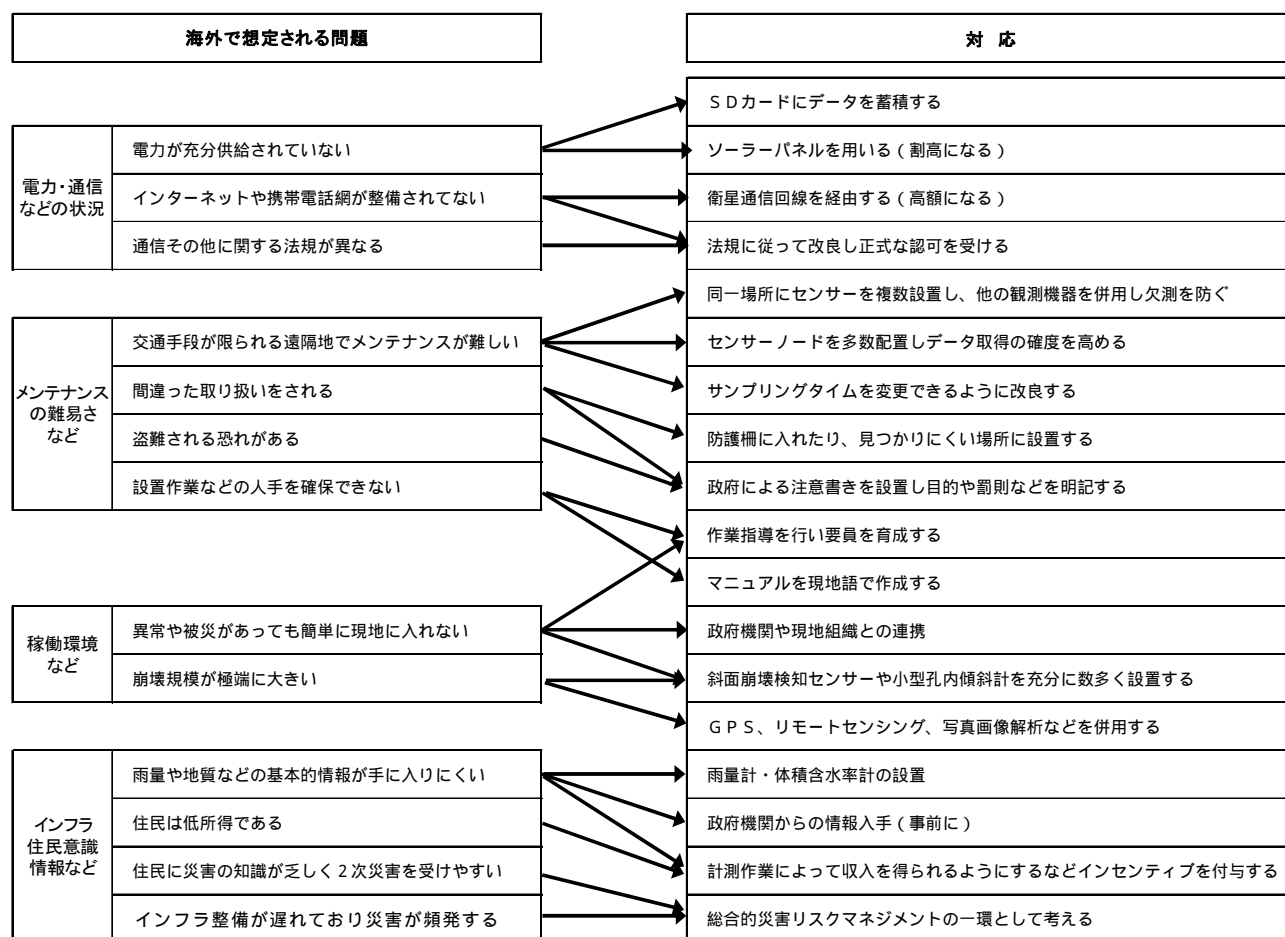


図5 - 14 海外での適用における課題と対応策

5.8.3 まとめ

本研究のシステムおよび斜面崩壊検知センサーは、安価で取り扱いが容易であり、リアルタイムに遠隔地から斜面監視が可能である。これにより、総合的な災害リスクマネジメントにおける平常時からの事前対策、発災直前の対策、発災後の対策などにおいて、直接的な効果や効用を生み出すことが期待される。特に、前兆現象につながる崩壊の予兆を斜面毎にとらえることによって、発災初期の被害量を低減し、その後の復旧工事においても、被災者面をリアルタイムに監視し、円滑・迅速、かつ、安全な施工を支援できると考えられる。逆に降雨によってまったく斜面が変位しない場合、斜面が安全と判断され、適切なタイミングで警報を解除するための情報を提供できるとみられる。

世界的に災害が頻発しており、日本の海外援助において防災が重要なテーマの一つになっている。海外においても、安価で設置の容易性なこと、遠隔でリアルタイムの監視をできることから、斜面災害における防災に寄与していくことが重要となる。

6．結論および今後の課題

6．1 目標に対する評価

1) 安価、簡便に設置・移動でき僻地でも維持管理が容易かつ監視基準を明確にすること

双方向無線通信システム・斜面崩壊検知センサー・小型孔内傾斜計、および、斜面災害リスクのリアルタイム評価手法の開発など全体として、安価、簡便な設置、簡便な移動、僻地でも稼働可能、容易な維持管理、異常値を検出する監視基準について達成できたと考えられる。価格については、現状5~7万円であり、目標とした1機5万円に近づいてきた。精度と安定動作を確保しながら、センサーノードの開発と、原価的な低減を図ることで5万円以下に到達すると考える。

小型孔内傾斜計については基本的動作を確認しており、今後防水性を高めることが課題である。センサーノード（孫機）は動作確認できた段階であり、今後現場での実証試験を継続していく必要がある。

2) メッシュなどの地域毎ではなく斜面毎に前兆現象に通じる斜面内部の変状を観測すること

傾斜角速度 0.1deg/h を超えると残余時間がおおよそ1~10数時間以内であることがわかった。斜面崩壊検知センサーを適切な位置（特に斜面末端部など）に設置して観測することで、斜面毎に、地盤内の微小な傾斜変位をとらえられることを実証した。また、深度方向にはMEMS傾斜計ユニットを縦に連結した小型孔内傾斜計により計測できるようにした。体積含水率計を外付けし、斜面毎の降雨による含水状態を計測し、傾斜変位速度と体積含水率との関係から体積含水率が履歴最大値を超えると傾斜ひずみが増大することを確認した。

3) 亀裂や滑落崖の有無に関わらず崩壊メカニズムや法面の状況に即して設置すること

浅層崩壊を主対象として、その他の種々の斜面へ設置し傾斜変位の計測を行った。崩壊が生じた被災斜面での2次災害防止はもとより、亀裂などがない斜面の監視、工事法面の監視などで、降雨による変状の予兆をとらえることができた。その結果、災害を未然防止する対策へ寄与した。また、深層崩壊被災斜面、地すべり、転石、土石流被災斜面など、種々の崩壊メカニズムの斜面に設置・計測した。現地資料の有無に応じて設置手法や留意事項を整理するとともに、崩壊土量と到達範囲を算定して機器設置する手法を呈示し、工事法面も含め、様々の現地状況に応じた設置をできるようにした。

4) リアルタイムかつ直接住民へ通知でき迅速な避難に資すること

国内外の実斜面において、10分毎のサンプリングで、リアルタイムかつ遠隔地から1年以上にわたり計測し、変状をとらえられることを実証した。被災斜面における2次災害防止のための復旧工事や法面掘削工事において、崩壊の予兆をいち早く連絡し道路通行と工事の安全を確保した。現状、斜面の状況や警戒レベルを直接住民へ通知するまでには至っていないが、行政や工事関係者へ直接通知し素早い対策に寄与するレベルまでに達した。

リアルタイム・サンプリングの改善、種々のノイズの除去、センサーノードおよび小型孔内傾斜計の改良、実績に基づく崩壊メカニズムとの関係の分析評価などを進めて、国内外の総合的防災リスクマネジメントの中で役立っていくようなシステムづくりをしていく必要がある。

6.2 結論

1) 試作および国内外での実証実験の実施

斜面崩壊検知センサーの検知部にMEMS傾斜素子、および、体積含水率計を組み込み、特定小電力無線でデータ転送を行う斜面崩壊検知センサーを試作し、実証実験を行って、実用化への目処をつけた。試作品では、温度サイクル試験、無線通信能力試験、消費電流の確認試験などの基礎的試験を行った。その後、国内で動作確認試験、国内と中国において実証実験を行って、微小な傾斜角速度の変化から崩壊の予兆を検出した。

次に、MEMS傾斜検知部を利用し、深度方向にパイプ内に連続的に配置し、斜面に打込んで深度方向の動態観測を行う小型孔内傾斜計を試作した。地磁気センサーによる方位検知試験、傾斜試験、消費電流確認などの動作確認試験を行い、国内では神戸市六甲砂防斜面、中国では都江堰市地すべり斜面にてそれぞれ動作確認試験と実証実験を行った。防水性などの課題があったが、リアルタイムの傾斜量の計測について確認できた。

さらに、IEEE 802規格の短距離無線（ZigBee）技術（2.4GHz帯）を利用して、斜面崩壊検知センサーへデータ通信するセンサーノード（孫機）を試作した。センサーノードは、孫機専用機（短距離無線のみ）と子機兼用機（斜面崩壊検知センサーに短距離無線受信部を内蔵）を試作し、実斜面にて動作確認試験を行った。センサーノードは自動的に周辺の孫機を探索してデータ伝送を実施するため、子機から50m以上離れた地点でも、50m以内に孫機があれば伝送経路を確保できるようになった。2013年11月、高知県黒鳥谷サイトで動作確認試験を行った。

通信距離は、データロガーと斜面崩壊検知センサー間で最大600m、斜面崩壊検知センサーとデータロガー間で最大50mを確保した。データロガー・斜面崩壊検知センサー・センサーノードからなる早期警報システムを構築することにより、多数の傾斜検知センサーを安価（斜面崩壊検知センサー単体で現状5～7万円程度）に簡便に、斜面に平面的および深さ方向に設置できるようになり、インターネットサーバーを介して斜面の状態・崩壊の予兆を関係者へ通報できるシステムを構築できるようにした。

斜面崩壊検知センサーの実証実験としては、国内では2008年4月から神戸市六甲山の急傾斜地に多数を設置し基本的な動作確認を行った。同年10月、中国・三峡ダム湖（重慶市万州区）の地すべりサイトに設置し、2年間以上の長期観測を行った。降雨のたびに体積含水比が上昇することを確認した。中国・万州区の観測では、斜面最大傾斜方向に傾斜変位4～6degの傾斜角の漸増を確認し、大規模な崩壊の予兆となる微小な傾斜変位をとらえた。

国内では、2009年7月、福岡県冷水峠・道路脇の斜面崩壊復旧工事において、斜面崩壊検知センサーを設置して動態観測し、工事と道路通行の安全確保を行った。降雨によりセンサーの浸食倒壊が発生したが、リアルタイムで検知し通行止を行い、2次災害防止に有効であることを実証した。2010年8月～11月に山形県酒田市の切土法面の頭部に斜面崩壊検知センサーを設置し監視した。降雨後の掘削により傾斜角変位の異常値を検出し警報を発し、押さえ盛土により変状が収束した。2011年8月、福岡県田川郡添田町・道路脇斜面の災害復旧工事に斜面崩壊検知センサーを設置し、降雨により斜面変状が発生し収束する状況を観測した。斜面末端部にセンサーを設置することにより、より早く予兆を検知できることがわかった。

小型孔内傾斜計については、2010年4月から国内・六甲山斜面で動作確認試験を行い、2010年10月

に中国・都江堰市地すべり斜面のボーリング孔跡を利用して、約3週間監視した。地盤内部の傾斜変位をとらえることを確認した。防水が十分でないこと、測定値に日変動があることなどの課題が認識された。

2011年6月には中国・都江堰市で実際の地すべり斜面を用い、人工降雨実験を行った。小型孔内傾斜計、斜面崩壊検知センサー、伸縮計などを設置し、2日間にわたり累積雨量1159mm（1時間積算雨量最大292mm）の降雨を降らせた。データ比較した結果、斜面崩壊検知センサーと小型孔内傾斜計で崩壊の予兆をとらえるとともに、斜面崩壊検知センサーの地表面換算変位と伸縮計の変位が1：1で対応することを確認した。

2) 斜面の異常値検出と総合的災害リスクマネジメント

国内外における実証実験の結果から、傾斜角変位速度と崩壊（安定）に至るまでの残余時間との関係を整理した。斜面崩壊検知センサーの管理基準案として、傾斜変位速度が数日間0.01～0.1deg/dayが続くと警戒レベル1（点検・要注意・観測強化）、0.1deg/day～0.1deg/hになると警戒レベル2（対策検討・応急対策など）、さらに、0.1deg/hを超える場合は警戒レベル3（厳重注意・通行止）を呈示した。警戒レベル3になると、崩壊までの残余時間が1～10数時間以内になり、厳重警戒や通行止が必要であることがわかった。同管理基準案の妥当性について伸縮計の基準などから検証した。

斜面崩壊検知センサーでは飽和度に代わる土中水分の指標として体積含水率を用いた。体積含水率の変化により降雨の有無や、履歴最大値の更新から異常値を検出できることがわかった。土砂災害警戒情報の土壌雨量指数と体積含水率について整理し、個別の斜面においてメッシュ情報である土砂災害警戒情報の雨量予測利用を検討した。

実証実験を通して、斜面の異常値を的確に検出するためには、設置位置や手法が重要であることがわかった。実績に基づいて標準的な設置位置や手法を整理し、異常値検出をしやすい設置位置（末端部、中央部、凸部など）、グリッド状に設置する手法、万が一の場合でも被災することがないように崩壊土量や影響範囲を算定して設置する方法などについて検討した。工事法面では小段上に設置し、工事の進捗に応じた設置位置を選択する必要がある。秩父市の工事現場の場合、一部が崩壊したが、小段上の斜面崩壊検知センサーに異常がなかったため素早い復旧につなげることができた。

異常値を精度良く検出するため、ノイズの低減を行った。MEMSセンサー素子自体に温度特性があり気温の日変動の影響を受けた。センサー毎に温度キャリブレーションを行うことで温度依存ノイズを取り除く見通しを得た。電磁気的なノイズ、ランダムノイズなどについても試験を行い、改善の方向性を見いだした。他に、PF管（蛇腹管）でコードを保護する獣害対策、MEMS傾斜検知部の分離型モジュール化・地中埋設による温度影響抑制、同モジュールの防水対策、体積含水率計の安定動作などの逐次改良を重ねた。

サンプリング間隔は現在10分で一定としている。実証実験を通じて警戒警報を発する上で10分間隔で特に支障は生じなかった。サンプリング間隔を短くする目的としては、傾斜角変位速度に今までにないような急激な立ち上がりがある場合、対策開始時点をゼロ時として詳細に変位を観測したい場合、工事の施工段階に応じたサンプリング間隔を選択したい場合、研究的な目的で詳細なデータを必要とする場合などが考えられる。これに対して、ハード的（スイッチの切り替え）あるいはソフト的（初期的に命令で変更する、あるいは、双方向無線の改良）などの対応が考えられる。

本研究の主対象は浅層崩壊として実証実験を行ったが、実際には、地すべり、深層崩壊、転石、法面、構造物などにおいて観測を行ってきた。それらについても適用が可能であった。ただし、実績の少ないものもあり、観測事例を増やしていく必要がある。地すべりでは頭頂部に伸縮計を用いるなど、他の計測機器を併用する必要があるとともに、崩壊メカニズムを明らかにして種々の観測機器も必要に応じて用い、的確に異常値を検出できるようにしていくことが重要である。

土砂災害警戒避難ガイドライン^{5 6)}では、前兆現象を見つけることも予防策の一つとしている。また、2次災害防止のためセンサー設置や住民側の知る努力について言及している。もし前兆現象があればそれを引き起こす変状が斜面内部にあるとされ、変状を数値で予兆としてとらえることが重要となる。平常時から斜面を観測することで、降雨と斜面変状との関係を説明できるようになり、斜面防砂について住民が関心をもつきっかけを生み出すかもしれない。そういう意味で、総合的災害リスクマネジメントという視点から、地域の防災の一助となるように、リアルタイムで常時監視していく意味づけを持たせることも重要と考えられる。

防災は、自然災害の多い日本において最重要なテーマの一つである。最近のODAの援助テーマにもなっている。研究開発成果を国内だけでなく海外にも適用していくことが重要である。

6.3 今後の課題

1) 斜面の実績の整理に関して

実証実験で、福岡県冷水峠と田川郡添田町の被災斜面に設置し、2次災害防止と復旧工事の安全確保で具体的成果を出した。酒田市の切土掘削工事では崩壊の予兆を検出し対策工につなげる成果を出した。一方、六甲砂防斜面では斜面の危険性にもかかわらず、設置したほとんどの箇所(50ヶ所)で異常値を検出しなかった。これらの箇所の中に降雨との関係で有用な情報が眠っていないのか洗い直すことも手を付けていない課題の一つと思われる。変状が出ない斜面や被災履歴のある斜面の予兆をとらえられるか、現在の観測手法で十分なのか、継続的に検討していく必要がある。

2) 欠測やノイズに関して

計器を設置するにあたり、小動物や枝・転石の接触、ケーブルへの獣害^{3 8)}、人によるいたずらなどがあり、中国では盗難が懸念事項となった。中国では政府機関による注意書きと罰則を立て札で設置したり、手の届かない高所に設置するなどした。センサーは厳しい自然環境下にあり、暴風雨・積雪・寒冷・日射などの影響を受ける。遠隔地が多く簡単にメンテナンスできない場合が多い。長期間安定動作することが前提であり、想定外の欠測がないように注意し、そして、ノイズについてはさらに取り除いていくように改良を重ねる必要がある。

3) 現場実験の安全管理に関して

中国・都江堰市の四川大地震で崩壊した地すべり斜面で人工降雨実験を行った。過去、国内の実地実験で被災例があるなど、安全管理には十分な注意が必要とされる。第47回地盤工学会研究発表会(2012年、八戸)の質疑応答^{9 0)}において、人工降雨実験の写真(写真4-3、d)を見て、人の背丈ほどの

深さの斜面末端部で人力掘削を行った点について、かつて国内で発生した現場実験中の事故（昭和 46（1971）年 11 月 11 日、川崎市生田緑地公園にて科学技術庁など 4 省庁の研究機関が合同で行った斜面崩壊実験で、関係者 25 人が生き埋めとなり 15 名が死亡した事故）を引き合いに斜面の下側にいる危険性を指摘する質問があった。現場実験にあたって客観的な目で十分なチェックをする必要性を感じ、課題とする。

4）土砂災害警戒情報に関連して

土砂災害警戒情報の土壌雨量指数は、個別の斜面を対象とせず、5 km メッシュの情報である。気象庁では各気象台の雨量データを公開し、各メッシュの C L 値なども公開している。自治体が発する避難警戒は土砂災害警戒情報を基にしているため、斜面崩壊検知センサーによる警戒についても、土砂災害警戒情報と関連づけることがわかりやすいものとなる。土壌雨量指数と、個々の斜面の傾斜変位や体積含水率との関係をさらに詳しく調べる必要がある。

5）予測雨量に対する整理について

最近の災害では、深夜避難できない状況下で情報がないままに斜面崩壊の危険が迫る場合がありえるということである。少しでも早い段階で危険性がわかるようにするためには、予測雨量とそのときの個々の斜面の変状がわかるようにする必要がある。未対策の斜面が多い中でモニタリングの必要性は今後多くなると考えられる。実効的効果のある観測、わかりやすい判定基準、少しでも早い段階での警戒通知など、検討すべき課題は多くあり、本研究で設定した目標へ少しでも近づいていけるようにすることが第 1 の課題である。

6）行政や工事関係者への警戒通知に関して

最終目標として一般住民への警戒通知を目的とするが、現段階では行政や工事関係者への通知を行っている。個人への通知はまだ検討すら行っていないが、工事法面監視では斜面の状態を作業管理者が直接閲覧でき変状があれば直接通知を受け、現場でサイレンを鳴らす仕組みになっている。個人への通知は、パニックや予想外の行動も想定され、十分な段階を踏んで進めていく必要があると考えられる。当面、斜面崩壊検知センサーの精度向上と適切な判定基準の確立が優先課題であり、実斜面のデータ蓄積を進め、行政や工事関係者へ確実に通知できるようにすることが重要と考える。

7）様々の崩壊パターンへの対応に関して

本研究は浅層崩壊を対象とした。地盤災害としては、深層崩壊、流れ盤や摂理・層理に沿ったすべり、岩塊や転石の落下、トップリング、盛土の崩壊など、地質・地形・変状メカニズムの違いにより様々のパターンがある。誘因も降雨だけでなく地震動がある。地質調査資料がない場合や予算的に必要な計測機器を設置できない場合もある。このため、実績的にも様々の斜面に設置してきた。実務上は現地踏査や各種資料を踏まえ、崩壊メカニズムをある程度想定しながら、異常値を検出する的確な手法について経験的に検討を進めていくことが必要である。設置する斜面の状況のある程度類型化しながら適切な手法を確立していく必要がある。

8) 双方向通信について

本研究では、無線通信の双方向性について、サーバーからデータロガー（親機）へ命令できることまでを確認した。データロガーから斜面崩壊検知センサー（子機）への命令（サンプリング時間間隔など）については実行した例は一部あるが、安定して通信できる状況をまだ確立できていない。その理由は、現時点で10分間隔のサンプリング時間をさらに短時間にする必要性が大きいことが一因である。本研究のとりまとめを通して、その必要性を結論に整理し、今後の課題とする。双方向通信（下りの命令）については、斜面崩壊検知センサーからセンサーノード（孫機）への命令も同様に課題となる。

9) 海外での適用に関して

海外では通常、電波や通信に関する法規制が日本と異なる。よって、それぞれの国の法規に従った認可を受ける必要がある。安価にするとともに共通仕様で開発していく必要がある。電波が届かない僻地では、人工衛星回線を利用するか^{12) 116)}、SDカードにデータ蓄積することになる。人工衛星回線の場合はコスト増になることから、サンプリング間隔や電力供給との兼ね合いになる。海外では現場状況に応じて適切な方策を見つける必要がある。

10) 地震との関係について

本研究は、降雨による斜面変状についてとりまとめた。外力としては他に地震動による変状がある。斜面崩壊検知センサーは長期間にわたって同じ斜面に設置するため、地震が起こった場合は地震動と変状の関係について検討する可能性が生まれ、長期観測する上での課題である。

11) 公助・共助・自助に関して

総合的災害リスクマネジメントの担い手として、自助・共助・公助⁶⁹⁾が考えられている。本早期警報システムの運用は、行政と専門家（コンサルタント・工事管理者など）にて行っている。将来、NPOなどが行う場合や、最終的には個人が担う場合もあり得ると考える。企業や防災に特化したNPOなどの団体が防災活動全般の中の斜面災害検知センサーなどをツールの一つとして本システムを利用する場合にどのような課題があるか、客観的な視点から検討していく必要がある。自助には時期尚早としても、行政を主体とした公助の次の段階として共助・自助に用いられるようにすることは課題である。

12) 隘路事項として

本研究は浅層崩壊を対象として、崩壊に至る過程で傾斜角変位が単調増加し単純な変位をすることを前提において、0.1deg/hという基準値を設けたが、斜面変状の過程で、極大値や極小値をもつような場合にどうするか、あるいは、そのような崩壊メカニズムがあるかどうかは検討課題と考えられる。

本研究は、予測を行った斜面が対象となっている。一方で、予測を行わなかったにもかかわらず崩壊が起きたというような事例を収集して、そういう場合が確率的にどの程度あるかを把握しておくことも必要である。

本研究では傾斜角の差分をとって斜面変状を検知するためいわゆるイニシャル値を持たないとされる。無降雨が続けば累積降雨が一旦リセットされるように、変位を観測しない状態が続けば、リセット（安定）し、それを新たなリファレンス値とする考え方は検討課題である。

7. 謝辞

本研究は、2005年頃から本格的な開発が始まった。その後、2007年11月に日中地盤工学シンポジウムが開催され、中国で発表する機会を得た。翌年2008年5月に四川大地震が発生して、それをきっかけに東京大学・成都山地災害与環境研究所・中央開発株式会社の三者による日中共同研究が始まり、大きく進展してきたものである。

今日までの10年間に多くの方々からご指導とご協力を頂いた。その賜物として本成果にたどりついたと思う。東京大学 東畑郁生 教授、内村太郎 准教授には、日本国内はもとより海外でも実験と成果のとりまとめ・発表にいたるまで研究全般にわたって、様々の点でご教授・ご鞭撻を頂いた。研究の細部についてはもちろんのこと、国内外にまたがる長期の研究開発とその展開という観点についても薫陶頂いたように思う。そういう感慨も込めてここに深謝を申し上げる次第である。この間、多くの東京大学の留学生・学生も研究に参加しておりここに感謝を申し上げたい。

中国科学院・水利部・成都山地災害与環境研究所の 蔣建平 教授には日中共同研究の場を通じて、人工降雨実験から実斜面における長期観測にいたるまでご指導・ご助言を頂いた。日中友好ということの意味を考えさせられる期間もあったが、終始一貫した姿勢で中国側から研究をリードして頂き、また、我々を支援して頂き、そうしたお陰をもって本成果をとりまとめるに至ったと思う。感謝の念が盃からあふれ出んばかりになっていることを伝えて御礼の言葉としたい。成都山地災害与環境研究所からは他にも多くの研究者が本研究に関わったことを付け加え感謝の念を添えたい。

本研究では、模型実験や実証実験で独立行政法人土木研究所をはじめ、国土交通省にも大変お世話になった。開発初期の頃は、試作品の動作確認試験を通じて課題が山積し、対応に追われることもあったが、そうした実験を行う機会を与えて頂いたこと、また実験を通して多くのご指導ご助力を頂いたことに感謝を申し上げたい。模型実験・現場実験ができたことをきっかけに研究が大いに進展したと思う。そういう点について心から御礼を申し上げたい。

中央開発株式会社の西江俊作 技術センター長、王林 部長、山口弘志 事業部長には、研究の推進から現場実務までを含め、原動力そのものであったことに感謝申し上げたい。西江俊作 技術センター長には国内外との調整や推進、王林 部長には研究全般の先導や牽引、山口弘志 事業部長には積極的な国内試行など担って頂き、それらがあってこそ本研究が加速してきたことに感謝申し上げたい。岡田直人君には御礼はもちろんであるが将来の開発と地盤工学への貢献を期待したい。中央開発株式会社、および、関連する日本建設機械商事株式会社や成都東中環境防災減災技術有限公司の関係者にはこの場で感謝の意を捧げ、謝辞とする。

8 . 参考文献

- 1) 東畑郁生 : Geotechnical Earthquake Engineering、Springer、pp.310、2008
- 2) 千木良雅弘 : 近年の斜面災害が与えた教訓、地盤工学会誌、Vol.61、No.9、Ser. No.668、pp.1-5、平成 25 (2013) 年 9 月
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部 : 土砂災害対策の強化に向けた検討会、ソフト対策分科会 (第 1 回) 資料 1 (討議資料)、平成 26 (2014) 年 2 月 7 日
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部 : 平成 24 年の土砂災害、国土交通省ホームページ (ホームページ - 砂防部 - 土砂災害の諸情報 - 土砂災害発生事例 - 平成 24 年に発生した土砂災害) から引用 (http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h24dosha/h24doshasaigai_gaiyo.pdf)、平成 26 (2014) 年 7 月
- 5) 斎藤迪孝・上沢弘 : 斜面崩壊時期の予知、地すべり第 2 巻第 2 号、7 ~ 12 頁、昭和 41 (1966) 年 2 月
- 6) 斎藤迪孝 : 第 3 次クリープによる斜面崩壊時期の予知、地すべり第 4 巻 3 号、昭和 43 (1968) 年 4 月
- 7) 斎藤迪孝 : 斜面崩壊時刻予測のためのクリープ曲線の適用について - 崩壊予測の批判に答えて、地すべり、第 24 巻第 1 号、昭和 62 (1987) 年
- 8) 福園輝旗 : 表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法、地すべり、Vol. 22、No.2、昭和 60 (1985) 年
- 9) Kimimasa Kuroki、Koji Ishikawa、Jun ' ichi Nishikawa : Forecast time and analysis of rupture mechanism using video-tape records for a rock failure of a cut slope、8th ISRM Congress、Tokyo Japan、25-29 Sep. 1995
- 10) Khalid Farooq、Rolando P. Orense and Ikuo Towhata : Response of Unsaturated Sandy Soils Under Constant Shear Stress Drained Condition、Soils and Foundations、Vol.44、No.2、pp.1-13、Apr. 2004
- 11) Rolando P. Orense、Suguru Shimoma、Kengo Maeda、Ikuo Towhata : Instrumented Model Slope Failure due to Water Seepage、Jurnal of Natural Disaster Science、Vol.26、No.1、pp.15-26、2004
- 12) 王 林・瀬古一郎・西江俊作・オレンセ : 衛星双方向通信サービスを利用した斜面危険警報システムについて、第 3 回地盤工学会関東支部研究発表会 (Geo-Kanto 2006、関東学院大学)、地盤工学会関東支部、平成 18 (2006) 年 11 月
- 13) Rolando P. Orense、Khalid Farooq、Ikuo Towhata : Deformation Behavior of Sandy Slopes during Rainwater Infiltration、Soils and Foundations、Vol.44、No.2、pp.15-30、Apr. 2004
- 14) 三浦清一・赤川敏・石川達也・横浜勝司・岩花剛 : 道路政策の質の向上に資する技術研究開発の研究テーマ「凍結融解作用を受ける斜面の崩壊予知・災害危険度評価システムの確立」に関する研究状況報告書 (1 年目の研究課題対象)、平成 19 (2007) ~ 21 (2009) 年度
- 15) 常田賢一・小田和広・中平明憲 : 道路政策の質の向上に資する技術研究開発の研究テーマ「道路機能に基づく道路盛土の経済的な耐震強化・補強技術に関する研究開発」の研究終了報告書、平成

17～19年度

- 1 6) 玉手聡・伊藤直幸・遠藤明：地盤の透水性と降雨強度の関係に着目した斜面の表層崩壊に関する実験的考察、労働安全衛生総合研究所特別研究報告((独)労働安全衛生研究所)、No.35、pp.33-58、平成 19 (2007) 年
- 1 7) 福田徹也・横田修一郎・岩松暉・和田卓也：シラス斜面における降雨水の浸透過程と崩壊予測 - 比抵抗値と土壌水分変化に基づいて、応用地質、第 50 巻、第 4 号、pp.216～227、平成 21 (2009) 年
- 1 8) 岡田憲治：土壌雨量指数、地盤工学会誌、Vol.57、No.8、Ser.No.619、pp.56～57、平成 21 (2009) 年
- 1 9) 岡二三生、木村亮、木元小百合、肥後陽介：道路政策の質の向上に資する技術研究開発の研究テーマ「水分履歴を考慮した不飽和道路盛土の耐震性の評価と強化法」の研究状況報告書(1 年目の研究課題対象)、平成 21 (2009) 年～23 (2011) 年
- 2 0) 石澤友浩、笹原克夫、酒井直樹、福園輝旗：降雨履歴に伴う地下水位変動と斜面変位の関係について、第 61 回(平成 24 年度)砂防学会研究発表会概要集、p.308-309、平成 24 (2012) 年 5 月
- 2 1) 石澤友浩、酒井直樹、福園輝旗、諸星敏一：降雨下における砂質土模型斜面のせん断挙動について、第 62 回(平成 25 年度)砂防学会研究発表会概要集、pp.B228-B229、平成 25 (2013) 年 5 月
- 2 2) 笹原克夫、酒井直樹：降雨浸透による砂質土模型斜面の間隙水圧上昇に伴うせん断変形、第 61 回(平成 24 年度)砂防学会研究発表会概要集、p.310-311、平成 24 (2012) 年 5 月
- 2 3) (社)土木学会：活褶曲地帯における地震被害データアーカイブスの構築と社会基盤施設の防災対策への活用法の提案(第 5 章活褶曲地帯の地質・地盤災害に関する研究(課題 3))、平成 17 年度文部科学省科学技術振興調整費・研究成果報告書、平成 18 (2006) 年 3 月 (なお、図 1 - 2 8 の出典は、鈴木隆介：建設技術者のための地形図読図入門、全 4 巻(pp.1-1322)、古今書院、1997-2004 とされる。)
- 2 4) 秋山一弥ほか、国土交通省国土技術政策総合研究所・危機管理技術研究センター(砂防研究室)、(独)土木研究所・土砂管理研究グループ(火山・土石流チーム、地すべりチーム、雪崩・地すべり研究チーム)：能登半島地震建築物被害調査報告(3 . 土砂災害)、建築研究資料 No.111、pp.21～51、平成 20 (2008) 年 2 月
- 2 5) 臼杵伸浩、田中養成、水山高久：移動距離の長い地すべりの実態、砂防学会誌、Vol.57、No.5、pp.47～52、平成 17 (2005) 年
- 2 6) 小山内信智、富田陽子、秋山一弥、松下智祥：がけ崩れ災害の実態、国土交通省国土技術政策総合研究所・砂防研究室、国土技術政策総合研究所資料 No.530、平成 21 (2009) 年 3 月
- 2 7) 小山内信智、内田太郎、曾我部匡敏、寺田秀樹：がけ崩れによる家屋被災範囲の設定手法に関する研究、国土技術政策総合研究所資料、No.225、平成 17 (2005) 年 1 月
- 2 8) 恒岡伸幸・加藤俊二：斜面表層崩壊モニタリング技術の開発(新道路技術五箇年計画のうち岩盤・斜面崩壊のリスクマネジメント技術)、国土交通省道路局・国土技術政策総合研究所・(独)土木研究所、平成 11 (1999) 年度～14 (2002) 年度
- 2 9) 内村太郎、東畑郁生、Gallage Chaminda Pathma Kumara、Trinh Thi Lan Anh、王林：小規模斜面を対象とした低コストで簡易な豪雨時の斜面監視装置の開発、降雨時の斜面モニタリング技術と

- リアルタイム崩壊予測に関するシンポジウム発表論文集（地盤工学会降雨時のモニタリング技術とリアルタイム崩壊予測に関する研究委員会編）、地盤工学会、pp.154、平成 18（2006）年 11 月
- 3 0) Christopher R.J. Kilburn、Alessandro Pasuto : Major Risk from Rapid, Large-volume Landslides in Europe (EU Project RUNOUT)」、Geomorphology 54、pp.3-9、2003
- 3 1) 国土交通省：総合技術開発プロジェクト・社会資本の管理技術の開発・総合報告書、平成 20（2008）年 12 月
- 3 2) (独)土木研究所・つくば中央研究所・土砂管理研究グループ・火山土石流チーム（田村、内田、武藤）：土砂災害の警戒避難支援のための斜面崩壊検知センサの開発、平成 19（2007）年度～20（2008）年度
- 3 3) 田村圭司、内田太郎、武澤永純、伊藤洋輔（以上(独)土木研究所（土砂管理研究グループ、火山・土石流チーム）、秋山健一郎、天野悟志（以上(有)秋山調査設計）、樋口佳意、金子綾一、永江祐（以上坂田電機(株)）、安本寿人、霜田日出雄、佐久間剛、藤田哲、能和幸範、柳町年輝、（以上(株)拓和）、西江俊作、王林（以上中央開発(株)）、上野雄一、下村幸男、沼尾信二、菅沼健、小原大輔、田方智（以上日本工営(株)）：土砂災害の警戒避難支援のための斜面崩壊検知センサの開発、共同研究「土砂災害の警戒避難支援のための斜面崩壊検知センサの開発」報告書、(独)土木研究所、平成 21（2009）年 3 月
- 3 4) 深川良一、島川博光、大久保英嗣、杉山進、木股雅章、小西聡、横田裕介、原田史子、酒匂一成、鳥井原誠、山本彰、菅野幹人、桐村綾子：道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート No.18-3、研究テーマ「センサーネットワークを利用した次世代型斜面防災システムの構築」、新道路技術会議、平成 21（2009）年 6 月
- 3 5) Apiniti Jotisankasa、Hansa Vathananukij : Investigation of Soil Moisture Characteristics of Landslide-prone slopes in Thailand、International Conference on Management of Landslide Hazard in the Asia-Pacific Region (Sendai、Japan)、11th～15th、Nov. 2008
- 3 6) Development of An Automatic Landslide Monitoring System に関する PPT 印刷物、International Conference on Management of Landslide Hazard in the Asia-Pacific Region (Sendai Japan)、11-15 Nov. 2008、
- 3 7) Rafiq Azzam、Tomas M. Fernandez-Steege、Christian Arnhardt、Herbert Klapperich、Keh-Jian Shou : Monitoring of Landslides and Infrastructures with Wireless Sensor Networks in an Earthquake Environment、5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering、Jan. 2011
- 3 8) 八嶋厚、沢田和秀、馬貴臣：道路政策の質の向上に資する技術研究開発の研究テーマ「レーザー波干渉を利用した亀裂性岩塊の遠隔からの安全な安定性調査法の確立に関する研究開発」に関する研究状況報告書（F S 課題対象）、平成 20（2008）～22（2010）年度
- 3 9) 西山哲、大西有三、矢野隆夫、里優、吉崎呉：無線機器を利用した斜面変位計測法の研究、地盤工学ジャーナル、Vol.6、No.4、pp.503-511、平成 23（2011）年
- 4 0) Yueping Yin、Wamo Zheng、Yuping Liu、Jialong Zhang、Xiaochun Li : Integration of GPS with InSAR to Monitoring of the Jiaju Landslide in Sichuan、China、Landslides 7、pp.359-365、2010

- 4 1)国土交通省水管理・国土保全局砂防部：土砂災害対策の強化に向けた検討会・討議資料(資料 1)、pp.43、平成 25 年 12 月 25 日
- 4 2) 四宮卓夫、輿水聡、蔭山朝昭：土砂崩壊検知システムの開発、JR EAST Technical Review No.02 - Winter 2003
- 4 3) 芥川真一：防災・安全管理対策のための新技術「On Site Visualization」の現状と動向、平成 23 年度近畿地方整備局研究発表会、平成 23 (2011) 年 7 月
- 4 4) 平岡仲隆、三品健、田中克彦、酒匂一成、深川良一、島村誠、外狩麻子：超音波土中水分・水位計測における周波数特性の検討、平成 23 年度第 66 回年次学術講演会・講演集、土木学会、平成 23 (2011) 年 9 月
- 4 5) 国立大学法人群馬大学 (工学部社会環境デザイン工学科地盤工学研究室・鶴飼教授)、株式会社日立製作所 (トータルソリューション事業部公共・社会システム本部)：建物や橋梁などの構造物や地盤に容易に設置可能な地震加速度計測システムを開発、計測データの無線送信での駆動が可能な小型な計測システム、HITACHI ニュースリリース・U R L から引用 (<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2007/08/0827a.html>)、2007 年 8 月 27 日
- 4 6) 株式会社日立製作所：ビルや工場の温度や湿度を簡単に検知するポータブル型と身につけるだけで健康管理のできるリストバンド型の無線センサ「日立 AirSense™」を発売、ニュースリリース・U R L から引用 (<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2005/12/1226a.html>)、平成 17 (2005) 年 12 月 26 日
- 4 7) 小泉圭吾、藤田行茂、平田研二、小田和宏：無線センサネットワークによる多点型土砂災害予測システムの開発 (平成 22 ~ 23 年度・建設技術研究開発助成制度採択テーマ)、平成 24 年度国土交通省国土技術研究会・イノベーション部門発表資料、国土交通省ホームページから引用、平成 24 (2012) 年 10 月 25 日
- 4 8) 荒木春視、村井俊治：災害リスクの G P S による監視 - 地震火山活動と地殻変動、先端測量技術、公益財団法人日本測量調査技術協会発行、No.102、pp.72-83、平成 22 (2010) 年 8 月
- 4 9) Sri Kumar、Richard Butler：Sensor Information Technology (SensIT) Program、The Defense Advanced Research Projects Agency(DARPA)、U R L から引用 (<http://comlab.ecs.syr.edu/workshop2002/files/RichardButler.pdf>)、2002
- 5 0) 竹内芳明：ユビキタスネット社会における安心・安全環境の実現に向けた取組、総務省・情報通信政策局研究推進室、平成 17 (2005) 年 6 月 2 日
- 5 1) 東京ガス：ピピッと！ガス百科 - 安全・防災 - シュープリーム「S U P R E M E」、東京ガスホームページ「東京ガスについて」から引用 (<http://www.tokyo-gas.co.jp/encyclopedia/dictionary/dictionary159.php>)、平成 26 (2014) 年
- 5 2) 東京ガス：東京ガス C S R 報告書 2012 のうち「ガスの安全への責任」、東京ガスホームページから取り組み・活動の U R L より引用 (http://www.tokyo-gas.co.jp/csr/report_j/rightmenu/PDF/2012/csrr2012_07-1.pdf)、平成 26 (2014) 年
- 5 3) Rex L. Baum and Jonathan W. Godt：Early Warning of Rainfall-induced Shallow Landslides

- and Debris Flows in the USA、Landslides 7、pp.259-272、2010
- 5 4) Christopher I. Massey、Vernon Manville、Graham H. Hancox、Harry J. Keys、Collin Lawrence and Mauri McSaveney : Out-burst flood (Lahar) triggered by retrogressive landsliding、18 March 2007 at Mt Ruapehu, New Zealand - a successful early warning、Landslides 7、pp.303-315、2010
- 5 5) Nobutomo Osanai、Takeshi Shimizu、Kazumasa Kuramoto、Shinichi Kojima、Tomoyuki Noro : Japanese Early-warning for Debris Flows and Slope Failures Using Rainfall Indices with Radial Basis Function Network、Landslides 7、pp.325-338、2010
- 5 6) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部：土砂災害警戒避難ガイドライン（平成 19 年 4 月）、URL（砂防部ホーム - 土砂事業等の紹介 - 土砂災害警戒避難・土砂災害ハザードマップ - 土砂災害警戒避難ガイドライン）から引用(<http://www.mlit.go.jp/common/001024520.pdf>)、平成 26(2014) 年 7 月
- 5 7) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部：土砂災害警戒避難に関わる前兆現象情報の活用のあり方について（前兆現象資料 - 1）、土砂災害警戒避難に関わる前兆現象情報検討会（平成 17 年度）、平成 18（2006）年 3 月 31 日
- 5 8) 群馬県県土整備部砂防課：群馬県県土整備部ホームページ「土砂災害の前兆現象！」の URL から引用(http://www.kendoseibi.pref.gunma.jp/section/sabo/hp/main_page_0402.htm)、平成 26（2014）年 6 月 8 日
- 5 9) 寺田秀樹、中谷洋明：土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法、国土技術政策総合研究所資料（危機管理技術選球センター砂防研究室）、No.5、平成 13（2001）年 9 月
- 6 0) 小杉賢一朗、水山高久：2014 年 7 月 9 日に発生した長野県南木曾町の土石流災害の誘因となった降雨イベントの特徴、京都大学大学院・農学研究科山地保全学研究室、平成 26（2014）年 7 月 18 日
- 6 1) 国土交通省砂防部：長野県木曾郡南木曾町（なぎそまち）読書（よみかき）で発生した土石流災害（H26.8.5 時点・速報値）、国土交通省砂防部ホームページから引用（<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h26dosha/h26dosha.html>）、平成 26（2014）年 8 月 4 日
- 6 2) 国土交通省：異常気象時事前交通規制区間一覧表
- 6 3) Thomas K. Collins: Debris Flows Caused by Failure of Fill Slopes - Early Detection, Warning, and Loss Prevention、Landslides 5、pp.107-120、2008
- 6 4) 島村誠：鉄道防災技術の進化と課題、2010 予防時報 241、pp.43-49、一般社団法人日本損害保険協会、平成 22（2010）年 4 月
- 6 5) 島村誠：JR 東日本における防災に関する研究開発の取り組み～進化する観測・評価・対策技術（講演）、JR EAST Technical Review No.26 - Winter 2009、pp.17-24、平成 21（2009）年
- 6 6) 東畑郁生：市民レベルの斜面崩壊警報システム、(社)日本地すべり学会・関東支部シンポジウム・講演資料（東京大学工学部武田先端知ホール）、平成 19（2007）年 6 月 1 日
- 6 7) 損害保険料算出機構：全国を対象とした地震時の斜面崩壊危険度評価手法に関する研究、地震保険研究 24、損害保険料算出機構、平成 24（2012）年 3 月

- 68) 目黒公郎：東日本大震災を踏まえた地域防災計画と地域連携のあり方、第15回都市防災推進セミナー「災害時の自治体間連携」講演概要集、pp.31～40、(公社)全国市有物件災害共済会、2013年11月7日
- 69) 目黒公郎：間違いだらけの地震対策、pp.182～185、(株)旬報社、平成19(2007)年10月15日
- 70) 目黒公郎：災害イマジネーション能力を高める(特集：スペシャリストに聞く、第46回)、日本医師会ホームページ・医療安全推進者ネットワークURLから引用
(<http://www.medsafe.net/specialist/46meguro.html>)、平成18(2006)年1月23日
- 71) CRED(D. Guha-Sapir, R. Below, Ph. Hoyois, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, EM-DAT): The International Disaster Database (URLは<http://www.emdat.be>、所在地はUniversite' Catholique de Louvain - Brussels - Belgium)から引用
(<http://www.emdat.be/disaster-trends>)、平成26(2014)年10月
- 72) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部：全国における土砂災害警戒区域等の指定状況(H26.2.28時点)、国土交通省ホームページ(ホーム - 水管理・国土保全 - 砂防 - 土砂災害防止法 - 土砂災害警戒区域等の指定状況)から引用
(<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/sinpoupdf/jyoukyou-140228.pdf>)
- 73) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部：平成16年に発生した土砂災害・平成17年に発生した土砂災害、国土交通省ホームページ(ホーム - 水管理・国土保全 - 砂防 - 土砂災害の諸情報 - 土砂災害発生事例(平成26年～平成16年に発生した土砂災害はこちら)から引用
(<http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/jirei.html>)
- 74) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部：平成18年に発生した土砂災害～平成25年に発生した土砂災害、同上(<http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/jirei.html>)
- 75) 西江俊作、瀬古一郎、王林、木田川純：圧密応力経路を制御した粘性土の非排水三軸圧縮・伸張試験、第44回地盤工学研究発表会、平成21(2009)年8月
- 76) S. Nishie, L. Wang and I. Seko: Undrained Shear Behaviors of High Plastic Normally K_0 -Consolidated Marine Clays, No.28 Geotechnical Symposium in Roma, pp.273-286, Mar. 2006
- 77) Ichiro SEKO, Lin. WANG, Shunsaku NISHIE, Lin. ZHANG: K_0 -Consolidation Behaviors of Aged Marine Clays, The 3rd Sino-Japan Geotechnical Symposium, pp.479-487, 中国人民交通出版社(Chongqing)、2007
- 78) 気象庁：気候変動監視レポート2012(世界と日本の気候変動および温室効果ガスとオゾン層等の状況について)、気象庁ホームページから引用
(http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2012/pdf/ccmr2012_all.pdf)、平成25年6月
- 79) 瀬古一郎、王林、内村太郎、東畑郁生、福田穰：斜面崩壊を対象とした監視ネットワークの構築とその危険予測について、斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム、福岡、平成19(2007)年12月18日
- 80) 王林、R. オレンセ：交通ネットワークにおける豪雨斜面災害防止のためのインターネット環境上でのリアルタイム警報システムの開発、第2回土砂災害に関するシンポジウム、鹿児島、平成16(2004)年8月
- 81) 瀬古一郎、王林、内村太郎、東畑郁生、福田穰：斜面崩壊を対象としたリアルタイム危険予測ネ

ットワークシステムの開発、第 42 回地盤工学研究発表会、平成 19 (2007) 年 8 月

- 8 2) Taro UCHIMURA、Ikuo TOWHATA、WANG Lin、Ichiro SEKO : Development of low-cost early warning system of slope instability for civilian use、The 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering、Alexandria Egypt、5-9 Oct. 2009
- 8 3) Taro Uchimura、Ikuo Towhata、Wang Ling and Ichiro Seko : Simple and Low-cost Wireless Monitoring Units For Slope Failure、Japan-Egypt Joint Symposium、Geotechnical Engineering Research Laboratory - Tanta University、TANTA EGYPT、15-17 Sep. 2008
- 8 4) 瀬古一郎、王林、福田穰、Carlos Jose、内村太郎、内田太郎、伊藤洋輔 : 斜面変動のリアルタイムモニタリングシステムの開発と実証その 1、第 44 回地盤工学研究発表会、平成 21 (2009) 年 8 月
- 8 5) 瀬古一郎、王林、内村太郎、東畑郁生、田村圭司、内田太郎、伊藤洋輔 : リアルタイム斜面監視システム構築のための斜面崩壊検知センサー開発、平成 21 年度砂防学会シンポジウム、平成 21 (2009) 年 5 月
- 8 6) T. Uchimura、I. Towhata、Trinh Thi Lan Anh、J. Fukuda、C. J. B. Bautista、L. Wang、Seko、T. Uchida、A. Matsuoka、Y. Ito、Y. Onda、S. Iwagami、M. S. Kim、N. Sakai : Simple monitoring method for precaution of landslides watching tilting and water contents on slopes surface、Landslides、Vol. 7、No. 1、Jan. 2010
- 8 7) 日本イーテック : 太陽光発電のススメ・太陽電池の基礎知識、日本イーテックホームページから引用 (<http://www.etech-japan.com/susume/kiso/index.html>)、平成 26 (2014) 年 12 月
- 8 8) 王林、西江俊作、内村太郎、山田卓、内田太郎、秋山浩一 : 土砂災害の 2 次被害防止のための迅速に設置可能な監視装置の開発、平成 22 年度砂防学会シンポジウム、砂防学会、平成 22 (2010) 年 5 月
- 8 9) 気象庁・地磁気観測所 : 地球電磁気の Q & A、気象庁地磁気観測所ホームページから引用 (<http://www.kakioka-jma.go.jp/knowledge/qanda.html>)、平成 26 (2014) 年 12 月
- 9 0) 岡田直人、内村太郎、Getie Gizachew、Seo Hongkwan、東畑郁生、王 林、西江俊作、瀬古一郎、Qiao Jianping : 自然斜面の人工降雨による崩壊実験における崩壊前の傾斜変位、第 47 回地盤工学研究発表会、八戸、平成 24 (2012) 年 7 月
- 9 1) Taro Uchimura、Ikuo Towhata、Lin Wang、Shunsaku Nishie、Hiroshi Yamaguchi、Ichiro Seko、Jianping Qiao : Precaution and early warnig of surface failure of slopes by using tilt sensors、Soils and Foundations 投稿中、Aug. 2014
- 9 2) 内村太郎、東畑郁生、王林、西江俊作、瀬古一郎、蕎建平、中国塔子坪の地すべりを対象とした小型孔内傾斜計によるモニタリング、第 46 回地盤工学研究発表会、平成 23 (2011) 年 7 月
- 9 3) 王林、内村太郎、西江俊作、瀬古一郎、蕎建平 : M E M S 技術と特定小電力無線技術を利用した斜面災害早期警報システム、基礎工、2012 年第 5 号、平成 24 (2012) 年 5 月
- 9 4) 王林、西江俊作、瀬古一郎、内村太郎、東畑郁生、蕎建平 : 中国三峡ダム貯水池地すべりを対象としたモニタリングシステムとその危険予測について、第 46 回地盤工学研究発表会、平成 23 (2011) 年 7 月
- 9 5) L. Wang、I. Seko、S. Nishie、H. Yamaguchi、T. Uchimura、I. Towhata、J. P. Qiao : Field validation

- of tilt sensor for simple slope monitoring and early warning of landslide disaster、
 Proceedings of the 5th China-Japan Geotechnical Symposium、Chengdu China、18-19 May 2013
- 9 6) 田邊裕明、瀬古一郎、王寺秀介、王林、山口弘志：斜面崩壊感知センサーの有用性について（その1、切土法面）、第46回地盤工学研究発表会、平成23（2011）年7月
- 9 7) 山口弘志、瀬古一郎、王寺秀介、王林、田邊裕明、斜面崩壊感知センサーの有用性について（その2、崩壊斜面）、第46回地盤工学研究発表会、平成23（2011）年7月
- 9 8) 内村太郎、瀬古一郎：斜面災害のモニタリング、基礎工、2011年第7号、平成23（2011）年7月
- 9 9) 山口弘志、藤谷久、瀬古一郎、西江俊作、王林：伸縮計、検知センサー及びネットワークカメラによる被災斜面の監視事例、第47回地盤工学研究発表会、八戸、平成24（2012）年7月
- 1 0 0) Lin WANG、Taro UCHIMURA、Shunsaku NISHIE、Ichiro SEKO：Study on field detection and monitoring of slope instability by measuring tilting motion on the slope surface、The 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering、Paris France、2-5 Sep. 2013
- 1 0 1) 福田穰、内村太郎、東畑郁生、瀬古一郎、王林：斜面崩壊を対象とした傾斜計によるリアルタイム危険予測、第42回地盤工学研究発表会、平成19（2007）年8月
- 1 0 2) 福田穰、内村太郎、王林、瀬古一郎、内田太郎、伊藤洋輔、恩田裕一、岩上翔、Kim Min-seok、関英理香、酒井直樹：斜面変動のリアルタイムモニタリングシステムの開発と実証その2、第44回地盤工学研究発表会、平成21（2009）年8月
- 1 0 3) 王林、内村太郎、西江俊作、瀬古一郎、喬建平：斜面表層変動監視を対象とした警報システムとその現場実証実験について、第47回地盤工学研究発表会、八戸、平成24（2012）年7月
- 1 0 4) T. Uchimura、D. Suzuki、G. Getie、S. Yamada、I. Towhata、L. Wang、I. Seko、S. Nishie、J. P. Qiao：Evaluation of instability of slopes under heavy rainfall based on realtime monitoring of deformation and water contents、Proceedings of the 5th China-Japan Geotechnical Symposium、Chengdu China、18-19 May 2013
- 1 0 5) 鈴木大健：斜面の水分量・変位計測を利用した崩壊危険性のリアルタイム判定手法、東京大学修士論文、平成23（2011）年
- 1 0 6) 山口弘志：秩父法面崩壊状況（中間報告）、中央開発㈱資料、平成26（2014）年5月
- 1 0 7) 公益財団法人高速道路調査会：切土法面の調査・設計から施工まで
- 1 0 8) 田村圭司、内田太郎、秋山浩一、盛伸行：高精度空間情報を用いた表層崩壊発生危険度評価手法に関する研究、土木研究所報告214（2010）、pp.47-61、平成22（2010）年
- 1 0 9) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部：平成25年台風第26号伊豆大島の土砂災害の概要（2013年11月12日）、国土交通省ホームページ（ホーム - 水管理・国土保全 - 砂防 - 土砂災害の諸情報 - 土砂災害発生事例 - 平成25年台風第26号による土砂災害と対応状況 - 土砂災害の概要等）から引用（http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h25_typhoon26/izuoshimagaiyou131112.pdf）、平成26（2014）年12月
- 1 1 0) 内村太郎、東畑郁生、王林、山口弘志、西江俊作：斜面の傾斜変位の監視による崩壊の早期警報、地盤工学会誌、Vol.62、No.2、Ser.No.673、pp.4 - 7、平成26（2014）年2月

- 1 1 1) 奈良県・県土マネジメント部砂防課・深層崩壊対策室：大規模土砂災害監視・警戒・避難システム検討会資料 - 第 6 回検討会（平成 25 年 2 月 5 日開催）資料 2 - 2（その 1）：平成 23 年紀伊半島大水害・深層崩壊のメカニズム解明に関する現状報告、および、第 7 回検討会（平成 25 年 6 月 11 日開催）資料 1 - 2（その 2）：平成 23 年紀伊半島大水害で発生した深層崩壊、深層崩壊研究会、奈良県のホームページ（ホーム - 県の組織 - 県土マネジメント部 - 砂防課・深層崩壊対策室）から引用（<http://www.pref.nara.jp/secure/101873/shiryou1-2-1.pdf>、および、<http://www.pref.nara.jp/secure/101873/shiryou1-2-2.pdf>）、平成 26（2014）年 12 月
- 1 1 2) 深層崩壊に関する基本事項に係わる検討委員会：深層崩壊に関する基本事項に係わる検討委員会報告・提言、（社）砂防学会、平成 24（2012）年 3 月
- 1 1 3) 土屋智：地震による大規模斜面災害、平成 20 年度（社）日本地すべり学会・中部支部シンポジウム、平成 20（2008）年 10 月 22 日
- 1 1 4) 小山内信智、内田太郎、曾我部匡敏、寺田秀樹、近藤浩一：簡易貫入試験を用いた崩壊の恐れのある層厚推定に関する研究（参考資料：崩壊の恐れのある土層厚の空間分布を考慮したかけ崩れ対策に関する検討）、国土技術政策総合研究所（国総研）資料第 261 号、国土交通省国土技術総合研究所・砂防研究室、平成 17（2005）年 6 月
- 1 1 5) 土田孝：平成 26 年度広島豪雨土砂災害報告 - 緊急調査団報告の概要、地盤工学会・土砂災害シンポジウム（近年の激甚化する土砂災害への対応を考える）資料（PPT）、（公社）地盤工学会、平成 26（2014）年 10 月 30 日
- 1 1 6) 瀬古一郎、王林：衛星通信サービスを利用した斜面警報ネットワーク、土木学会第 62 回年次学術講演会、広島、平成 19（2007）年 9 月
- 1 1 7) 世界銀行：GNI per Capita, Atlas method (current US\$)（2013 年データ）、世界銀行ホームページ（Home - Data - Indicators - Economy & Growth - GNI per Capita）から引用（<http://data.worldbank.org>）、平成 26（2014）年 12 月

9 . 発表論文リスト

- (1) 瀬古一郎、王林：衛星通信サービスを利用した斜面警報ネットワーク、土木学会第 62 回年次学術講演会、広島、平成 19 (2007) 年 9 月
- (2) Taro Uchimura、Ikuo Towhata、Ling Wang、Ichiro Seko：Simple and Low-cost Wireless Monitoring Units For Slope Failure、Japan-Egypt Joint Symposium - New Horizons in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering、Geotechnical Engineering Research Laboratory - Tanta University、Tanta Egypt、15-17 Sep. 2008
- (3) Taro Uchimura、Ikuo Towhata、Ling Wang、Ichiro Seko：Development of low-cost early warning system of slope instability for civilian use、The 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering、Alexandria Egypt、5-9 Oct. 2009
- (4) 内村太郎、瀬古一郎：斜面災害のモニタリング、基礎工、平成 23 (2011) 年 7 月
- (5) L. Wang、I. Seko、S. Nishie、H. Yamaguchi、T. Uchimura、I. Towhata：Case histories of slope failure prevention by using a low cost tilt sensor monitoring during cutting slope construction along national road、Proceedings of the 18th Southeast Asian Geotechnical & Inaugural AGSSEA Conference、Singapore、29-31 May 2013.
- (6) Lin Wang、Taro Uchimura、Shunsaku Nishie、Ichiro Seko：Study on field detection and monitoring of slope instability by measuring tilting motion on the slope surface、The 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering、Paris France、2-5 Sep. 2013.
- (7) 王林、瀬古一郎、西江俊作、山口弘志、内村太郎、東畑郁生：地すべり斜面変動と降雨量・地下水位の関係についての検討、第 48 回地盤工学研究発表会、福岡、平成 26 (2014) 年 7 月