

(公社) 日本地すべり学会関西支部シンポジウム

「安 価 な セ ン サ 時 代」

日 時：平成25年4月15日(月) 10:00~16:40
場 所：大阪建設交流館8階グリーンホール(大阪市西区立売堀)
TEL：06-6543-2551

----- プログラム -----

10:00~11:40 話題提供

(1) 斜面土層内に埋設する地すべり警報センサ

東京大学工学研究科 内村 太郎

(2) 拡散レーザ変位計・Area net 傾斜計の開発と地すべり地への応用

明治コンサルタント株式会社 納谷 宏

11:40~12:10 (社)日本地すべり学会関西支部総会

12:10~14:00 昼 食

14:00~15:20 話題提供

(3) 切土掘削工事中の斜面崩壊による労働災害防止のための計測

独立行政法人 労働安全衛生総合研究所 伊藤 和也

(4) 地上設置型合成開口レーダーによる斜面変動監視

応用地質株式会社 水野 敏実

15:20~16:40 パネルディスカッション

「センサネットワークと地すべり防災」

司 会 福岡 浩(京都大学防災研究所)

パネラー 話題提供者

17:00~18:30 意見交換会(大阪建設交流館内レストラン)

主 催 (公益社団法人)日本地すべり学会関西支部

後 援 (社 団 法 人)砂 防 学 会

(公益社団法人)地 盤 工 学 会 関 西 支 部

(一般社団法人)建設コンサルタント協会近畿支部

(社)日本地すべり学会関西支部長
松浦 純生 (京都大学防災研究所)

シンポジウム実行委員

委員長	福岡	浩	(京都大学防災研究所)
委員	笹原	克夫	(高知大学)
委員	太田	英将	(太田ジオリサーチ)
委員	末峯	章	(京都大学防災研究所)
委員	山口	巖	(日本工営株式会社)

斜面土層内に埋設する地すべり警報センサ

東京大学大学院工学系研究科

内村太郎

1. はじめに

豪雨などによる斜面災害は、日本国内だけでも年間に数百～数千件発生しており、アジアなど各国でも多数発生している。その災害のほとんどが小規模な斜面の表層崩壊であるが、一方で危険箇所数は膨大である。これに対して、力学的な補強工事で対策することは困難であり、斜面をセンサで監視して、崩壊の予兆が生じたら避難するという方法が、「人命は助かるが、財産は失われる」という意味で次善の策ではあるが、有効である。

モニタリングによる早期警報は、低コストで有力な手段であり、近年のセンサと情報通信技術(ICT)の急速な進歩と普及によって、多くの研究者、技術者が警報システムを開発するようになった。実用化も進み、現地で計測してデータを回収する装置自体の開発は、一段落したのではないかと思う。

しかし、未だ以下の問題を抱えている。

- ・ 斜面のどこで何を測定し、データからどのように崩壊の危険度を判断するのか、物理法則に基づいて、個別の斜面の特性を考慮できる早期警報手法のロジックが存在しない。自治体などの多くは、地域ごとに降水量が閾値を超えたときに警報を出す手法をとるが、個別の斜面の危険度は判断できないし、ゲリラ豪雨のような局所的な降雨には対応できない。一方、潜在的な地すべりや2次災害の防止などで、特に監視すべき斜面では、伸縮計などにより変位を監視するが、「〇〇mm/時の変位速度」など経験のみに基づく管理基準が採用されていて、物理的な根拠はない。

- ・ その結果、精度の高い斜面崩壊の予測ができず、警報や避難指示の発令、解除の判断が難しく、空振りや見逃しが発生する。警報の精度が低いと、指示が出ても市民が避難せず被災することにもつながる。

- ・ 調査に基づく警戒斜面の指定と対策を行っているが、その基準は地形、地質、植生、気象、土地利用などの定性的な情報に基づいた、統計や経験による点数付けによっている。これも、斜面の安定性を物理的な方法で評価するものではなく、説得力が弱い。

例えば、2011 年の会計検査院の指摘によると、土砂災害防止法に基づく調査で 29 万箇所が危険と判定されたが、7 万箇所が、指定による土地の価値損失などの配慮が優先され、警戒区域の指定を受けていないという。

・また、斜面の状態をリアルタイムで監視し警報する既存のシステムは、高価で複雑であり、小規模斜面にはコスト面で利用しがたい。

筆者は、まず、できるだけ単純かつ安価で、簡単に設置できる斜面監視装置を試作し、その有効性を模型斜面、自然斜面の降雨崩壊実験や、実斜面の長期観測を通じて検証してきた（図 1）^{1) 2)}。安価で、簡単な装置にすることで、一般市民がコストを負担して、自主的な防災ができるようになる可能性もある。また、このような装置で手軽に計測ができるようになれば、より多くの斜面で常時計測を行って防災に役立つ情報を収集したり、他の種類のセンサを組み込んで、斜面防災に限らず多くの分野での地盤の常時計測、監視に応用したりできる可能性もある。

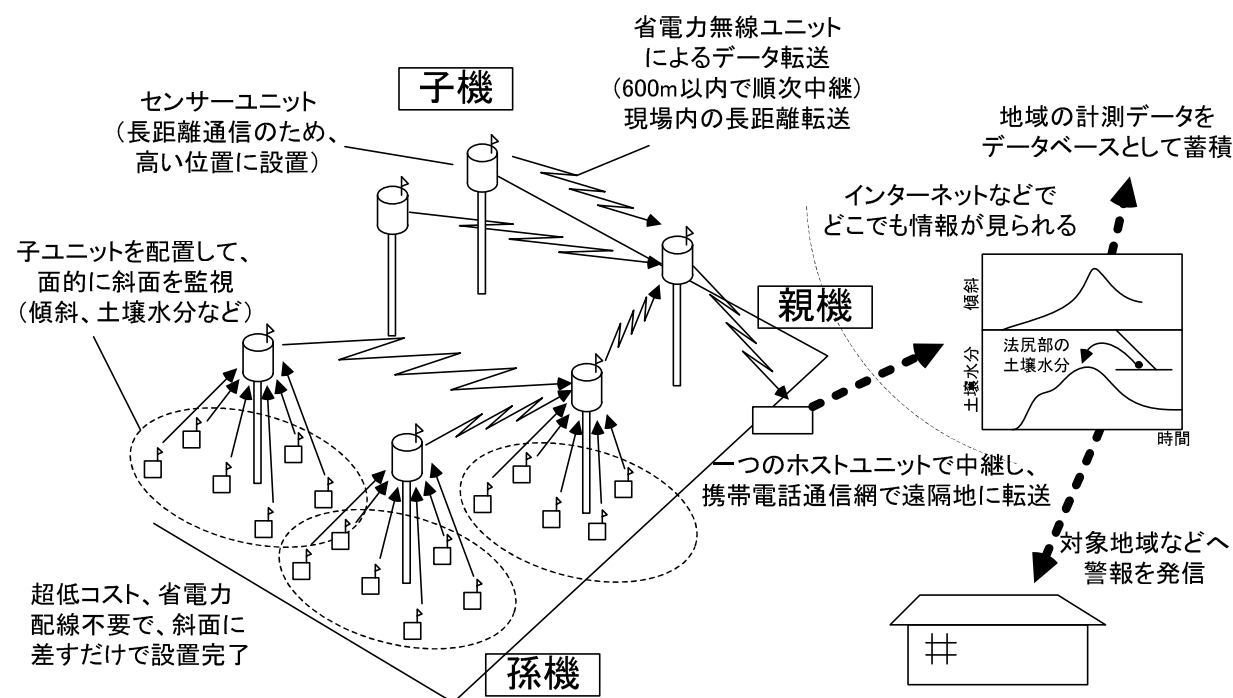


図1 斜面崩壊の予兆を監視するセンサネットワーク

2. 斜面表層・内部の傾斜変位の監視と早期警報

2. 1 初期の開発 ～ 表層の傾斜で崩壊の予兆が分かるか？⁶⁾

Orense、Farooq らによる模型斜面の降雨実験^{3~5)}によると、表層滑りの直前には、特に法尻部の変位と飽和度の上昇(80%~90%)がみられる。そこで、装置を簡単にするために、計測項目は土壌水分量と傾斜変位に限り、斜面法尻部を中心に設置することにした(図2)。

変位を測る方法としては、離れた不動点を基準にインバー線をひいて絶対変位を測る伸縮計がよく使われるが、設置場所の確保やインバー線の保護など、作業に手間とコストがかかる。これに対して、傾斜センサを使えば、センサーユニットを埋め込む1点に設置すれば測れる。傾斜センサを使って、作業を大幅に簡略化した(図3)。

土壌水分については、斜面安定に力学的に寄与するのはサクションであり、図4のようなセラミックカップと間隙水圧形を用いた計測がよく使われるが、カップの中を常に飽和させるなど、長期の計測に手間がかかる。そこで安価で扱いやすい土壌の誘電率を用いて体積含水比を測るタイプの土壌水分計を用いた。

また、計測データの伝送には無線通信ユニット(短距離用 2.4GHzISM バンド、最大 250Kbps、IEEE802.15.4 互換)を用いることで、配線を不要とした(図5)。このユニットの通信可能距離は 50m~100mであり、斜面から直近の民家などへの伝送は可能だが、さらに離れた山奥での測定の場合や、遮蔽物などの条件によっては工夫が必要である。また、電源も電池で駆動することで配線を不要とする(ただし、この時点では節電のための制御が未完成のため、この実験では外部からケーブルで供給した)。

これらにより、直径約 9cm、高さ約 25cm の斜面監視ユニットを試作した。設置は、斜面に手掘りで穴を開け、ユニットを鉛直に埋め込むだけで、1ヵ所30分ほどで完了する(図5)。

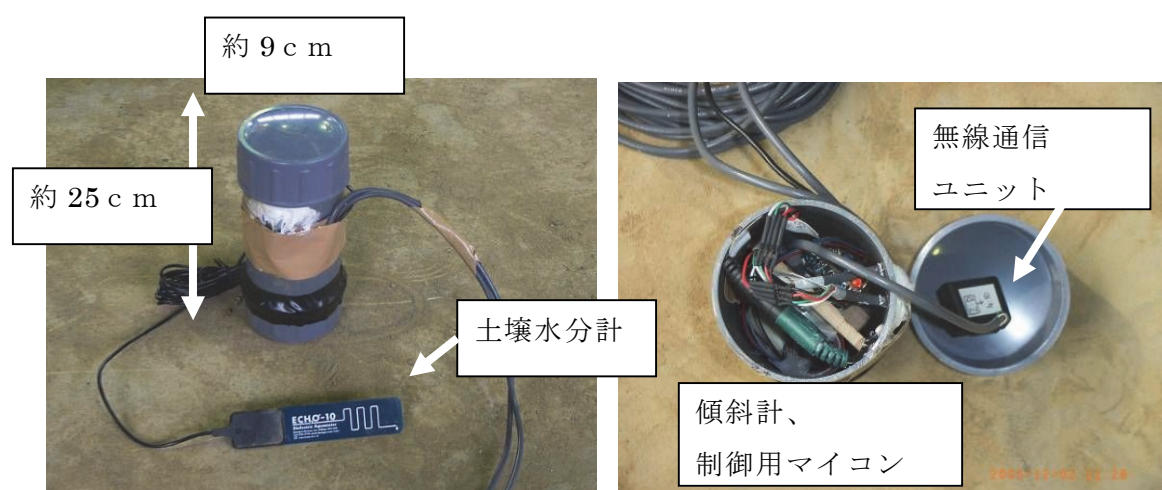


図2 試作した斜面監視装置
(上) 外観 (下) ユニット内部

【変位の監視】

- ・伸縮計による変位測定 ← 変位の絶対量を測れる。
(1時間に数mmオーダー) 離れた所に不動点を確認し、ワイヤーを張るので、設置やメンテナンスが難しい。
- ・傾斜計 ← 変位の絶対量は測れない。
計測する一点に埋めればよいので、取り扱いやすい。

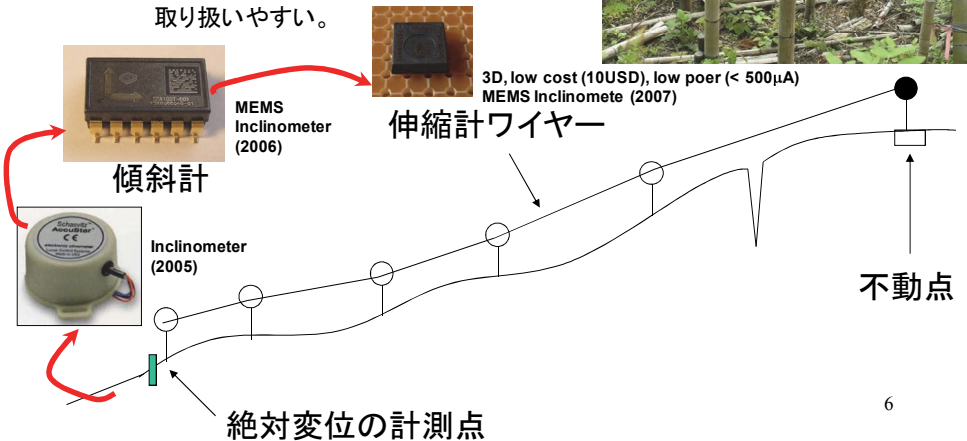


図3 斜面の変位の計測（伸縮計による方法と傾斜計による方法の比較）



【水分量の監視】

- (1) **間隙水圧の測定**
(物理的にはこちらが斜面安定に直接働く)
- (2) **土壌水分量の測定(体積含水比)**
(間接的な指標だが、取扱いが容易)



図4 土壌水分の計測（上：セラミックカップによるサクション計測、
下：誘電率の変化による体積含水率計測）

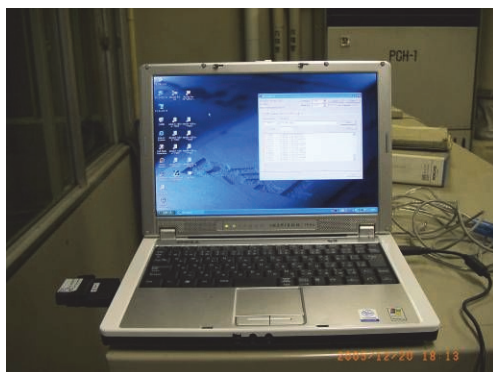


図5 データの無線転送（受信側）と試作したセンサーユニットの設置

堤防模型（砂質土、 $G_s = 2.69$ 、締固め密度 $\gamma_d = 1.365 \text{ g/cm}^3$ 、締固め時の初期含水比 $w = 19.6\%$ ）の人工降雨実験において、法面の2箇所にセンサーユニットを設置し、傾斜と土壌水分を計測した（図6，7）。豪雨時の河川堤防を模擬するため、先に背面側に湛水してから、 15mm/h の均一な雨を降らせた。降雨開始から約2時間後、法尻付近で崩壊が発生し、続いて斜面上部へ進行的に崩壊が広がった。

図8の縦軸は、傾斜角にセンサーユニットを埋込み深さ20cmを乗じて、地表面とユニット下端との水平相対変位量として表示している。法面下部の崩壊の30分以上前から、特にユニット2が大きく変化した。また、上部の崩壊の前にも、緩やかであるがユニット1の値が変化した。これらは、伸縮計などで変位の絶対値を測らなくても、斜面上の傾斜変位を監視することで、斜面崩壊の兆候を捉えられる可能性を示している。斜面安定解析で考えるようなすべり面に沿った完全な並行移動をすれば、傾斜変位は検出されないが、実際にそのような変位が起こるのは希だと考えられる。しかし、伸縮計が一方向に伸び続けるのとは異なり、傾斜変位は前に倒れたり後ろに倒れたりという複雑なパターンを示す。また、同様の実験を複数回行ったところ、斜面崩壊前の傾斜変位のパターンは毎回異なり、どのような変化が見られたときに危険と判断するのか、判断基準の定め方に課題を残した。

一方、土壌水分量の計測値（図9）は、降水開始から崩壊までの間に上昇したが、その絶対値はセンサを埋める深さにも依存し、崩壊時の水分量の測定値は実験によって異なり、土壌水分量の絶対値だけに基づく早期警報は難しく思えた。

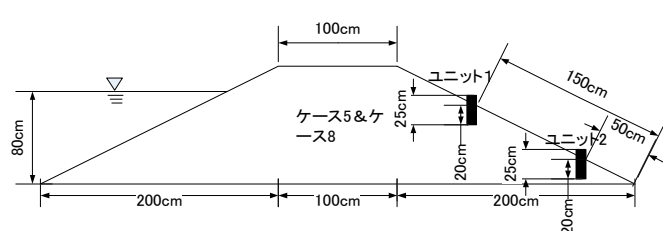


図6 模型断面とセンサーユニットの配置

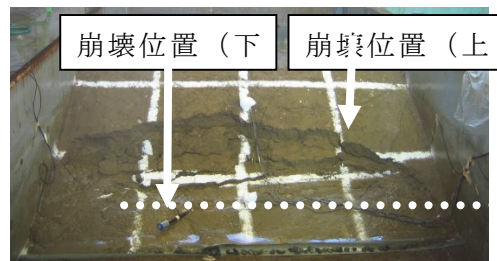


図7 法面の崩壊状況

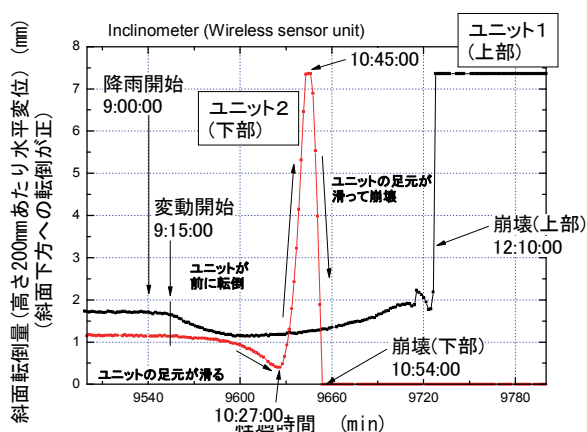


図8 傾斜変位の履歴

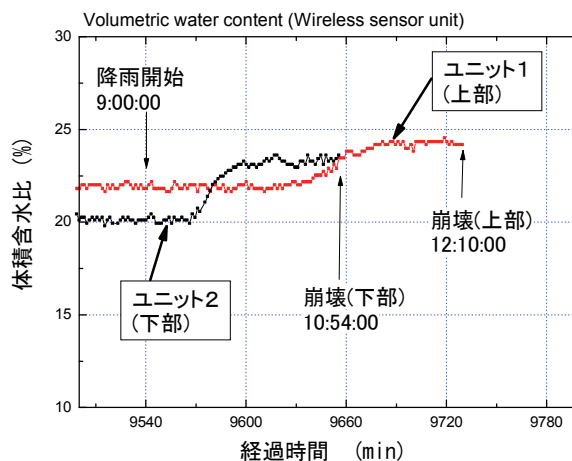


図9 体積含水比の履歴

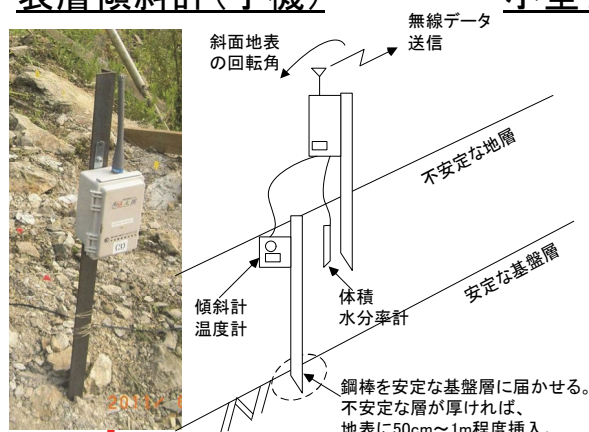
2. 2 実用機器の開発

最初の試作機器を製作してから 6 年をかけ、多くの現場で試行錯誤した結果、現在では図 10 のような 2 種類の傾斜測定の方法を主に使っている。この間に、傾斜センサは MEMS 技術を使った小型で省電力のものになり、無線モジュールも、429MHz 帯で 300～600m の長距離通信ができるものに変えた。センサは、温度にも反応するため、本体のケースから出して、温度センサと一緒に地中に埋めるようにした。この過程で、筆者も機器を設計するために、電子回路、通信、マイコン制御、センサなどの技術を身につけたが、近年の電子、通信、計測の技術の進歩（高性能・小型・省電力・低価格の部品が次々と現れて、通販で買える）に大いに助けられた。

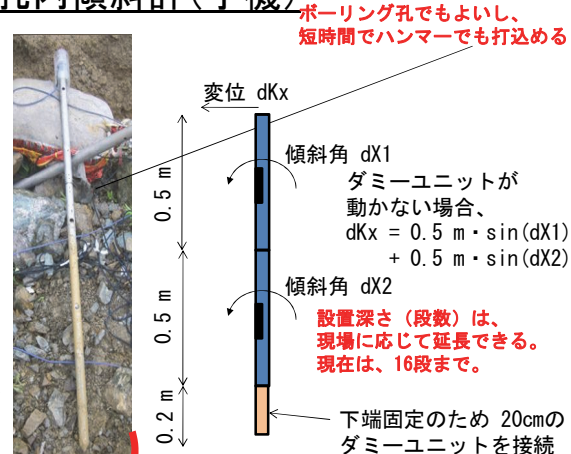
表層傾斜計は、地表に打ち込んだ 1m 程度の杭の微小な傾斜変位を計測する。小型孔内傾斜計は、傾斜計を仕込んだ直径 25mm のパイプを打ち込んで、必要な深さまで多段連結し、傾斜計を鉛直に配置する。

斜面崩壊のすべり層の深さは平均 1.1 m で、94%が 3 m 以下という調査がある。表層変位計を深さ 1m 打ち込むか、小型孔内傾斜計を最大 3m 打ち込めば、ほとんどの斜面災害に対応できる。深いすべりや深層崩壊への対応は、今後の課題であるが、すべり面の深さにかかわらず、地中のすべり変位は必ずその上に乗っている地表の変位に影響を及ぼすはずだから、表層に近い範囲の観測で異常を検知しようと考えている。

表層傾斜計(子機)



小型孔内傾斜計(子機)



現地受信装置(親機)

常時計測(10分間隔)
傾斜角分解能 0.003°
電池寿命 1年以上



インターネット
配信

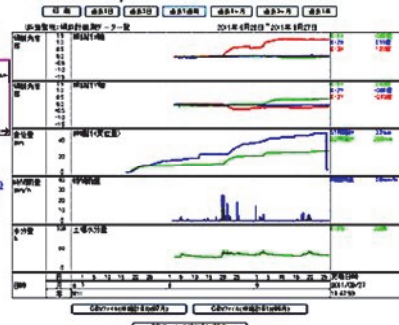


図 10 降雨時の法面・斜面の監視装置

3. 傾斜計測による早期警報の判断基準の検討

前節の実験の通り、斜面のごく表層に深さ 20cm 程度の傾斜センサーユニットを埋めた場合、斜面崩壊の前に何らかの傾斜変位は起こるが、そのパターンはまちまちで、危険度の判断基準を決めるのが難しかった。今は、地中に 1 m またはそれ以上の杭を打って、表層のある厚さの部分の傾斜（もしくはせん断）変位を監視している。

開発した装置を設置した斜面で、実際に崩壊や有害な変状が起きた事例のデータから、早期警報の判断基準を検討した。ここでは、そのうち 3 つの事例を紹介する。

3. 1 強風化花崗岩の斜面の二次崩落⁷⁾

集中豪雨時に崩壊した道路法面について、復旧工事中に 3 箇所の表層傾斜計および土壌水分計を設置した（図 10）。地質は、強風化花崗岩である。計測期間中に日雨量 103mm の豪雨により、センサユニット 2 が設置してある箇所で、局所的な 2 次災害（浸食崩壊）が発生した。工事期間中は片側通行を円滑安全に行うために、道路管理者がガードマンを現地に配置していたが、斜面崩壊検知センサーの状況とガードマンからの情報をもとに、通行止めの措置がとられた。

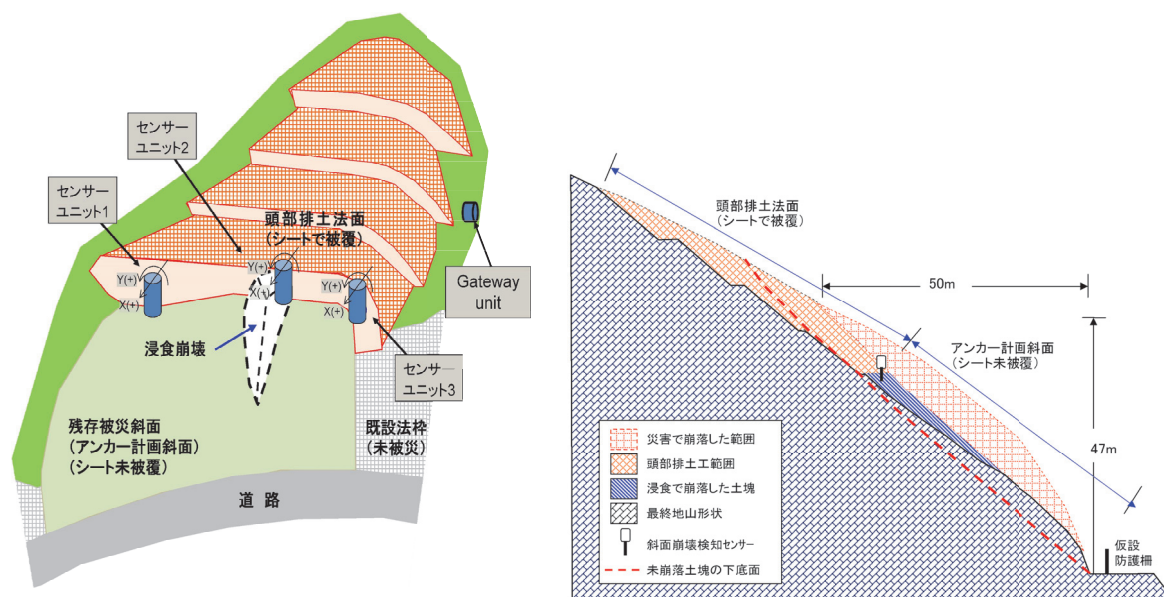


図 10 道路法面の概略図

この過程で、センサーユニット 2 において、図 11 のような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。センサの転倒確認時刻は、7:58 である。7:08 から急激に斜面直交方向の傾斜が増加し、 -0.1° で一度落ち着いたが、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、7:00～8:00 までの約 1 時間は崩壊前の前兆現象と見られる。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° 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と思われる。図 1 1 に示すように、2 次災害の直前の傾斜角は、 0.16 度/時（日速度に換算すると 3.8 度/日）であった。

一方、体積水分率は、斜面の地表から深さ 30cm 程度の表面近くを測っているが、図 1 2 のように、雨によるピーク値を 2 回観測しているものの、崩壊が起きたのは、水分量の値がピークになった時刻よりも 2 時間ほど後である。土壌水分量だけを見ても、斜面崩壊がいつ起こるのか判断するのは難しい。

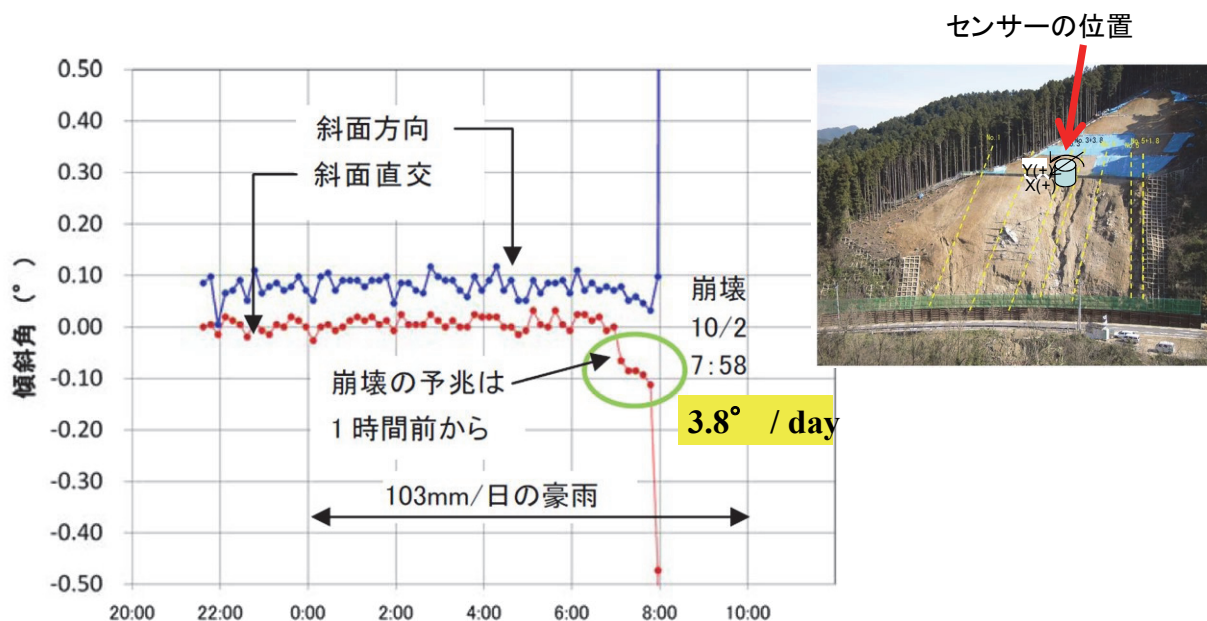


図 1 1 道路法面の崩壊時の傾斜変位

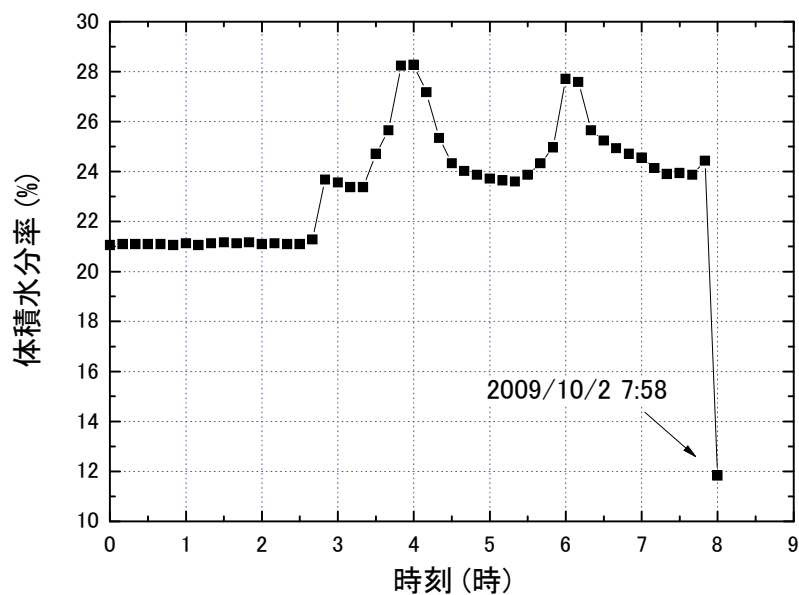


図 1 2 道路法面の崩壊時の体積水分率

3. 2 切土斜面の変状⁷⁾

高規格道路の切土法面（高さ約 20m）の掘削全工程を監視した。センサユニットは、法面の最頂部に 1 箇所のみ設置した（図 1 3）。地質は、新第三紀の砂岩層である。

標準勾配で掘削し、開始後 2 か月で計画高まで掘削が完了したが、その時点から崩壊検知センサーの傾斜角度が徐々に増加した（図 1 4）。これにシステム監視者が気づき、現場サイドに緊急点検を促した結果、法肩にわずかであるがクラックを発見し、押え盛土を施工した。クラック発見から押え盛土の施工が開始するまでは、現場のクラックの開口・小段の凹凸の進行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、最終的にアンカー付き法枠工を施工した。

この過程では、図 1 4 のように、斜面直交方向への傾斜増加が確認できるが、当該地の地質は斜面に 70～80° で斜交する流れ盤構造であり、岩盤すべりと見られる。掘削期間中は、0.1° 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、切土掘削が終了したものの、斜面直交方向の傾斜累積傾向は停止せず、10/17 には累積速度の増加が明白となり、緊急点検が行われた。その結果、変状の発見とその後の対策工が早まった。

このときに観測された傾斜変位速度は、日あたりに換算して、初期は 0.004° /日であり、最終的には 0.142° /日まで加速した。この値は、上述の大雨による崩壊前の傾斜変位速度に比べて、10 倍以上遅い。切土による境界条件の変化で、時間をかけて変状が起きる現象では、傾斜変位速度による異常検知のしきい値を厳しくする必要がある。

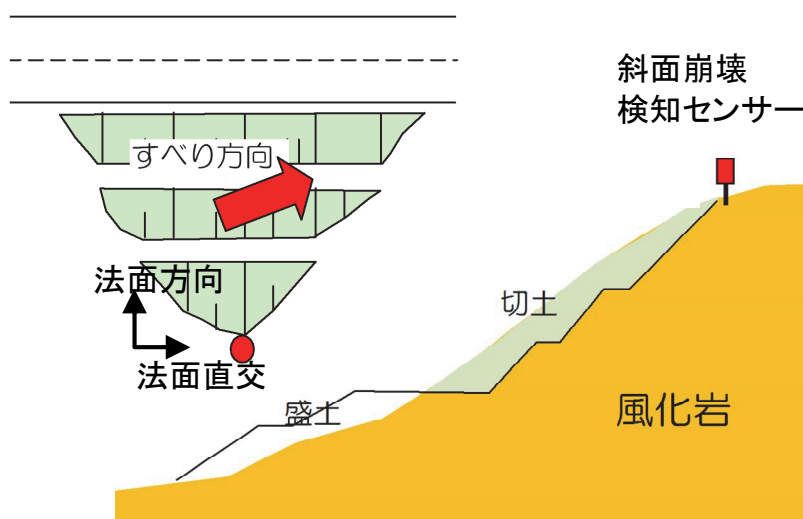


図 1 3 切土斜面の監視の概要

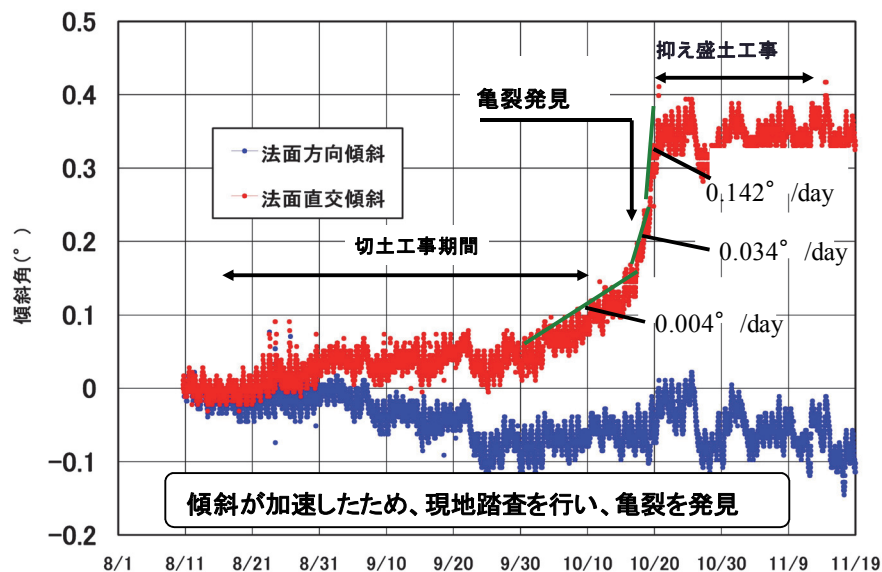


図 1 4 切土斜面の傾斜角の測定値

3. 3 人工降雨による斜面崩壊実験⁸⁾

2011 年 6 月に、中国四川省都江堰市の虹口・塔子坪地区の地すべり斜面で、人工降雨による斜面の崩壊実験を行い、傾斜計を含む各種のセンサを設置してその挙動を計測した。実験箇所は、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、傾斜角は約 18 度である（図 1 5）。風化安山岩斜面の崩落土が緩く堆積した場所で、細粒分を含む砂礫土である。

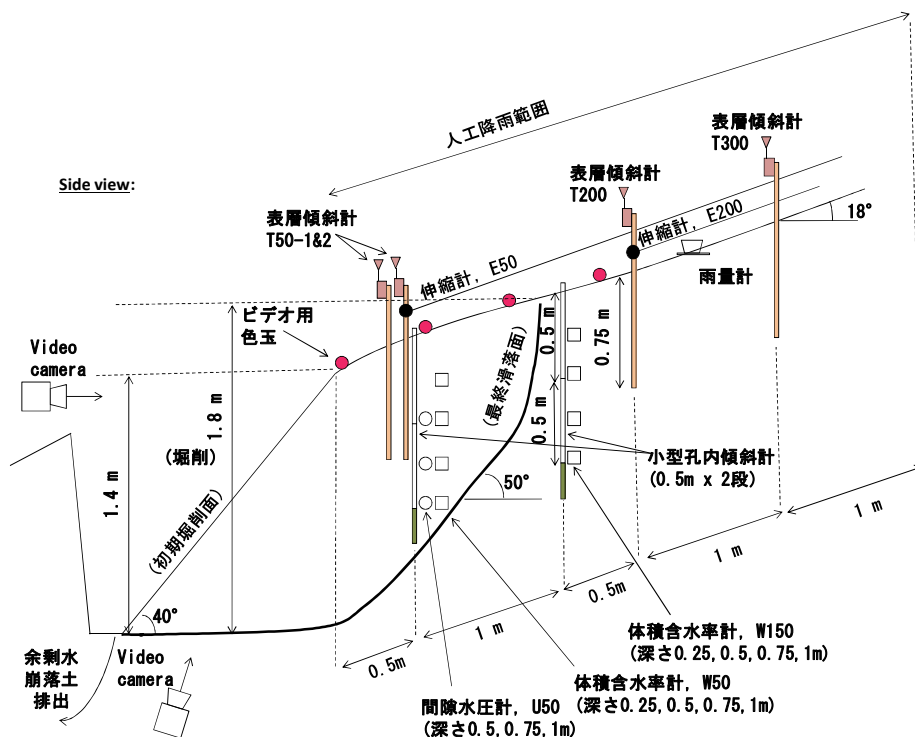


図 1 5 崩壊実験斜面の断面、計器の配置

ただし、実験による崩壊の過程で最大 50cm 程度の巨礫が複数出てきた。幅 1.5m、長さ 4m の範囲に、人工降雨装置を設置した。降雨範囲の下端部を、傾斜角約 40 度で掘削して、斜面を不安定化した。1 日目は、斜面下端の掘削深さを 1m として、時間雨量に換算して 100～120mm/h の雨を断続的に降らせたが、斜面は変位しなかった。そこで 2 日目は、掘削深さを 1.4m とし、200～300mm/h の強雨を断続的に与えたところ、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。

表層傾斜計は、地表に約 75cm 挿したロッドの傾斜を測り、斜面の下端から 50cm (T50-1 と 2)、200cm (T200)、300cm (T300) の位置に設置した。小型孔内傾斜計は、50cm×2 段の傾斜計ユニットを、50cm (K50)、150cm (K150) の位置に設置した。斜面が徐々に変形して斜面下部から順に崩壊する過程で、各所の表層傾斜計、小型孔内傾斜計は、図 16 のように挙動した。最下部に近い K50、T50-1,2 の傾斜計は、早い時期から、1 日あたりの速度に換算して 3.7 度/日ないし 9.6 度/日の速度で動き出し、その後転倒している。ただし、T50-2 は、傾斜計の直近に長さ 40cm 程度の巨礫が埋まっていて、崩壊の直前まで傾斜変位が抑制されていた。また、より上部にあった K150 は、最初は 0.5 度/日程度の速度で傾斜が進行していたが、その後、下部の崩壊が進行して崩壊面が近づくにつれて、5.7 度/日に加速した後、転倒した。このように、豪雨により、斜面に数時間にわたって 1～10 度/日程度の継続的な傾斜変位が観測される場合には、斜面崩壊のリスクが高まっていることが推定される。

なお、同時に設置した伸縮計では、4～6 時間にわたって 2～5mm/h 程度の変位速度が観察されている。

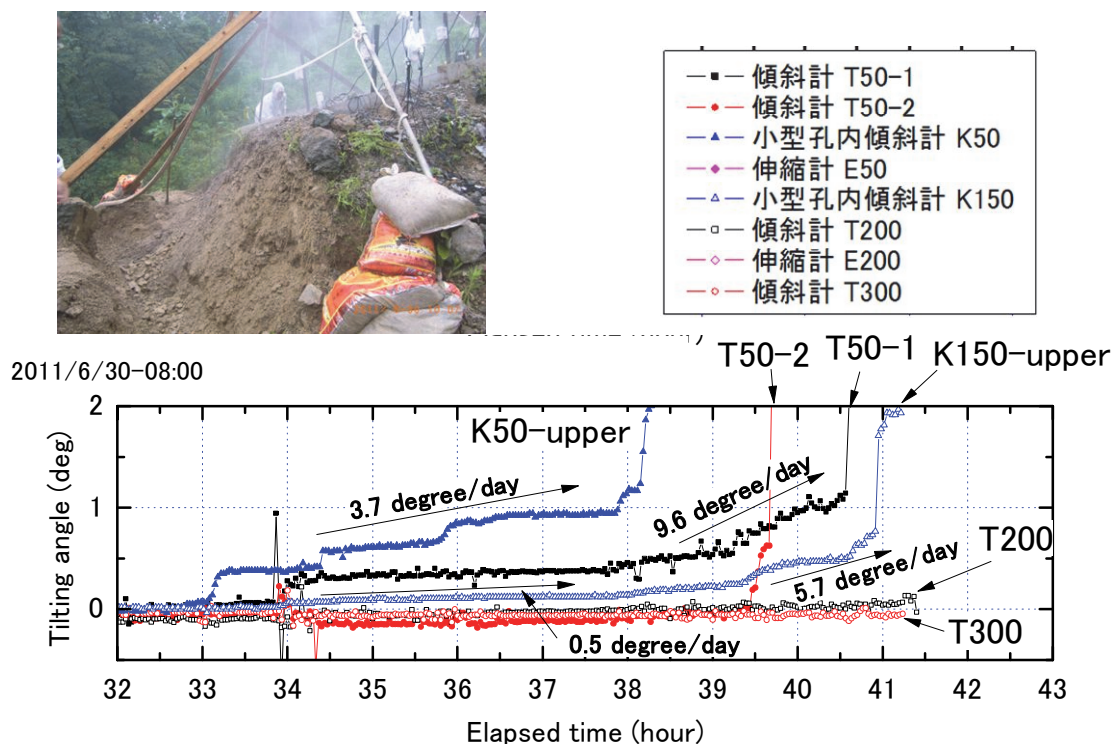


図 16 各センサーによる地表面変位の比較

また、降雨の初期で、まだ斜面の載荷端で崩壊が進んでいる段階であっても、そこから 1.5m 離れた K150 の位置で、非常に遅い速度ではあるが、継続的な傾斜が進行している。肉眼では分からないほどの低速度だが、傾斜センサーではとらえることが可能であり、この速度レベルの傾斜も斜面の異常を検知する一つの基準となり得る。

3. 4 表層の傾斜変位速度による警報のしきい値

ここに挙げた 3 つの事例での、斜面崩落前に計測された傾斜・変位速度をまとめると、以下のようになっている。

- ・道路法面の 2 次災害の事例：

0.16 度/時（3.8 度/日）が 1 時間弱続き、その直後に崩落。

- ・切土法面の岩盤すべりの事例：

長期的な変状が見られ、0.034 度/日に加速した時点で、緊急点検により法肩にわずかなクラックを発見。その後、応急施工の開始までに、0.142 度/日に加速した。応急施工のため、崩落はなし。

- ・人工降雨による斜面崩壊実験：

角度に換算して 0.15～0.4 度/時（3～10 度/日）程度。その後に崩落。同時に設置した伸縮計では、4～6 時間にわたって 2～5mm/h 程度の変位速度。

斜面崩壊前の計測データの挙動は、斜面の土質、微地形、植生、斜面内部の水理構造など、斜面の属性による要因のほか、斜面のどの部分を計測するか、センサーをどのように設置するか、という技術者の判断によっても大きく左右されることが考えられる。従って、計測データに基づく斜面崩壊のリスク判定基準は、さらに多くの事例を集めた上で、これらの要因を慎重に考慮して定める必要がある。

しかし、上記の 3 例に限ってみると、2 例目の数日～数 10 日にわたって起こる地滑り的な変動については、0.01～0.1 度/日の継続的な傾斜速度が観測されれば、何らかの変状を疑う意義があり、これが 0.1～1 度/日のオーダーになれば、応急対応が求められる可能性がある、といえるだろう。

また、1 例目、3 例目は、強い雨により 1～数時間のうちに、局所的な崩落に至る場合であるが、少なくとも 0.1 度/時以上の傾斜速度が観測されれば、現地を嚴重に監視する必要があるといえるだろう。

4. 安価なセンサを活かす

センサが安価に使えることの利点は、その分、多くの地点で、必要なときに、他種類で数多くのセンサを使えるということである。ただし、闇雲にセンサの数を2倍にしたからといっても、災害のリスクを半分にできるというものではない。センサを増やせるようになることを利用して、何を測り、データをどう使うか、これまでになかった新しい工夫の余地が生まれるはずである。

4. 1 斜面の変位と水分量の関係⁹⁾

降雨による土壌への水分浸透・排水に伴う斜面の挙動を観察するため、無限斜面のある深度における土の状態を再現する斜面模型を製作した（図17）。10枚のアルミ枠で囲まれた300 mm×200 mm×高さ65 mmの土部分にウェイトを載せ、全体を傾斜させることで無限斜面のある深さの滑り面における応力状態を再現することができる。アルミ枠の間には摩擦の小さいテフロンシートを挟み、ウェイトの荷重が全て土部分に作用するようにした。土のせん断する部分には土壌水分計を組み込み、体積水分率を測定した。また、土部分の上下面に配置したセラミックディスクを介して応力状態を維持したまま土壌水分を増加・減少させた。本研究では表1に示す条件の下、様々なパターンで土壌水分の注水・排水を行い、それに伴う土部分のせん断歪みの進行を観察した。土は江戸崎砂（ $D_{max} = 2.0$ mm, $D_{50} = 0.25$ mm, 細粒分 3.9 %）を使用した。

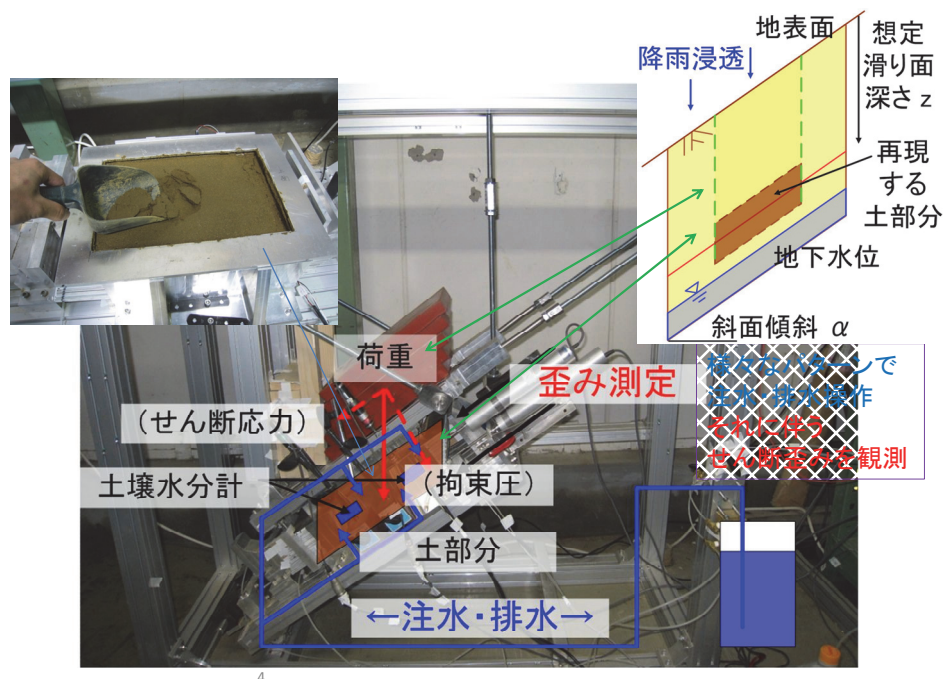


図17 一定応力下で水分量を増減する単純せん断試験

その結果、水分量とせん断ひずみは、それぞれ図 1 8 のように挙動した。このケースにおいては注水・排水を 4 サイクル繰り返した。排水するとせん断変形は止まり、その後に再度注水する時は、水分量がこれまでの履歴最大値を超えるとときにせん断歪みの進行が再開した。この関係を、縦軸に体積水分率を、横軸にせん断歪みをプロットすると、図 1 9 のようになる。この関係は、三軸圧縮試験の除荷・再積荷で得られる応力－歪み曲線によく似ており、注水・排水の過程によらない、水分量とせん断ひずみの一意的な関係があるように見える。

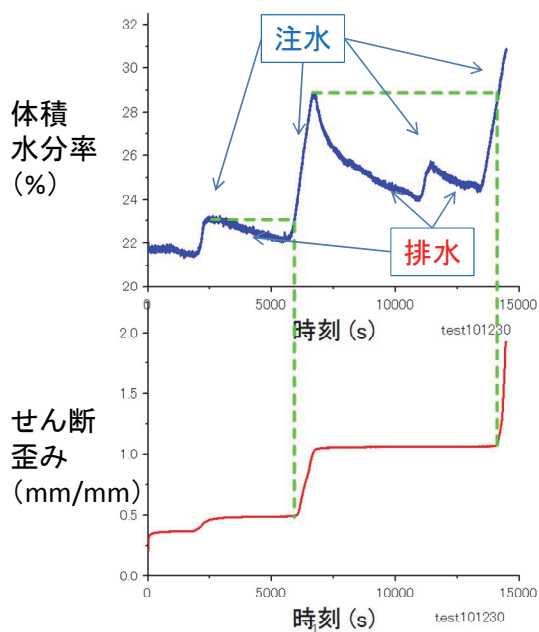


図 1 8 一定応力での水分量とせん断ひずみ
(傾斜 35° 上載荷重 13kPa)

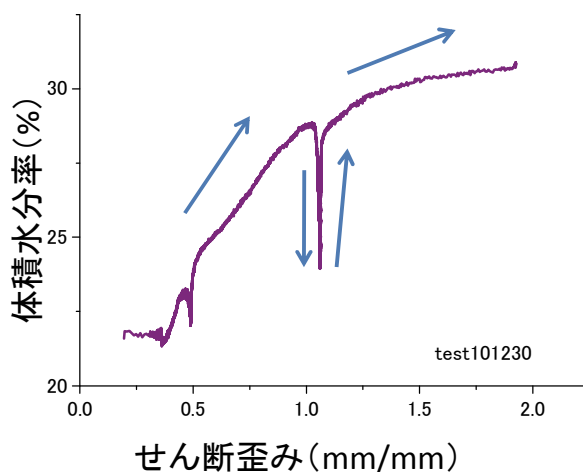


図 1 9 水分量とせん断ひずみの関係

このことを前提にすると、斜面において、変位（伸縮計でも傾斜計でも良い）と、水分量（体積水分率、サクション、あるいは土壌雨量指数のような概念的なものを使っても良いかも知れない）とを常に測定しておくことで、図 2 0 のようなデータの使い方が考えられる。例えば、体積水分率と、伸縮計によるせん断変位を 1 時間ごとに監視するとして、1 時間で水分が 1 0 %、変位が 2 mm 増える場合(A)と、水分が 2 %、変位が 2 mm 増える場合(B)とでは、B の方が少ない水分の増加で変位が生じており、より危険な状態だということになる。また、水分量の増加と変位の増加が比例している間は、まだ初期の段階であるが、水分量の増加に比べて、変位の増加が加速度的に速くなってきたら、危険な状態だといえる。

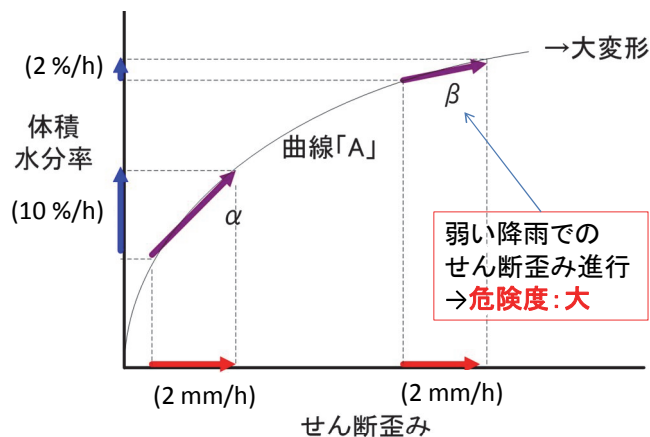


図 2 0 斜面の水分量と変形量の組み合わせの例

4. 2 降雨時に崩壊しなかったときの観測データの活用

センサが安価になれば、より多くの斜面にセンサを設置し、日頃から常に計測を続けることができる。斜面が崩壊するほどでない降雨イベント時に、その斜面の挙動を計測しておくことで、その斜面が豪雨に対してどの程度強いのか、評価する事ができるかも知れない。

例えば、降雨時に、斜面内の水分量を測定しておけば、この斜面は少量の雨でも短時間に多少の水分を含むようになる、あるいは、雨が降り止めばすぐに水分量が平常時に戻る水はけの良い斜面である、などの評価ができるだろう。

雨の降り方は、毎回、強さも時間もいろいろなパターンがあるので、この評価手法を実現するには、どのような雨に対しても、斜面の水分量がどのように変化するか予測できるモデルが必要である。通常の比較的弱い降雨の時の水分量の挙動から、モデルのパラメタを決めて、豪雨時に水分量がどの程度まで増え、どのくらいの時間をかけて排水していくのか予測する。降雨後の排水の過程については、モデル化を試みたことがあり、降雨イベントの降水量によらずに、排水速度を予測する方法を作ることができている¹⁰⁾。

また、降雨時に測るのは水分量だけでなく、変位であっても良い。それぞれの斜面が、崩壊に至らなくても、ある程度の降雨によっていくらか変位するのか、かなりの降雨があっても全く変位しないのか、常時計測によって評価する事ができる。

5. まとめ

斜面の表層の傾斜変位を監視することで、斜面崩壊の予兆をとらえる、低コストで簡単に扱えるモニタリング、早期警報の機器を開発した。傾斜変位の速度をしきい値として、危険度を判断できるのではないかと考えている。

センサが安価に使えるようになると、センサの数、種類、計測の地点と時期を自由

に選べるようになる。このことを利用して、何を測り、データをどう使うか、これまでになかった新しい防災の手法が生まれることを期待する。

- 1) 王 林・瀬古一郎・福田 穰・Carlos Jose・内村太郎・内田太郎・伊藤洋輔 (2009): 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発表講演集, pp. 1717-1718.
- 2) 瀬古一郎、王林、内村太郎、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22年度(社)砂防学会に研究発表会、2009年、広島
- 3) Orense RP, Towhata I, Farooq, K (2003a) Investigation of failure of sandy slopes caused by heavy rainfall. Proc. International Conference on Fast Slope Movements - Prediction and Prevention for Risk Mitigation (FSM2003), Sorrento.
- 4) Orense RP, Shimoma, S, Honda T, Towhata I, Farooq K (2003b) Laboratory experiments on failure initiation in sandy slopes due to rainwater infiltration. Proc. Soils and Rocks of America (Panam. Conf. Soil Mech. Geotech. Engrg), Boston, 2:2465-2470.
- 5) Orense RP, Farooq K, Towhata I (2004) Deformation behavior of sandy slopes during rainwater infiltration. Soils and Foundations 44(2):15-30.
- 6) チン ランアン・内村太郎 (2006): 小規模斜面を対象とした豪雨時の斜面監視装置の開発, 第41回地盤工学研究発表会発表講演集, Vol. 2, pp. 1267-1268.
- 7) 田邊裕明・瀬古一郎・王寺秀介・王 林・山口弘志 (2011): 斜面崩壊検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発表講演集, pp. 203-204.
- 8) 岡田直人・Gizachew, G.・Seo, H.-K.・内村太郎・東畑郁生・王林・西江俊作・Qiao J.-P. (2012): 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発表講演集, pp. 1843-1844.
- 9) 鈴木大健・内村太郎・可児健 (2011): 斜面の水分量と変位の計測を併用した崩壊危険性のリアルタイム判定手法, 第46回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1999-2000.
- 10) 田中良平・内村太郎・山田卓 (2010): 降雨時のモニタリングデータを用いた斜面の排水特性評価, 第45回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1747-1748.

《話題提供》

拡散レーザ変位計・Area net 傾斜計の開発と地すべり地への応用

明治コンサルタント株式会社 納谷 宏
野島 順二
溝上 雅宏
滝口 潤
松門 祐二
林田 昇
山口大学 清水 則一
中島 伸一郎

1. はじめに

地すべりの動態観測のうち，地すべり移動体の地表変位を計測する方法として一般的に用いられるのは地表伸縮計観測と移動杭測量である。しかし，地表伸縮計は接点式であるがゆえに移動点と固定点が離れた場合や高低差がある場合，また，計器の設置によって交通や生活などに支障をきたす場所などでは適用が難しいことも少なくない。一方，移動杭測量は，地すべり動態観測ばかりではなく，擁壁や橋梁など構造物の変位計測に用いられるが，手動計測が主流であり，長期間の自動計測には必ずしも向いていない。現在，地すべり動態観測や構造物の変位計測において，様々な条件下でも観測可能な低コストで使いやすい非接点式による自動計測技術が求められている。このような背景のもと，我々は非接点式（ワイヤレス）で，かつ長期間の連続自動計測が可能な計測機器として，拡散レーザ変位計と Area net 傾斜計を開発した。

拡散レーザ変位計（写真-1）は，2 点間の相対変位量を計測するもので，一般的なレーザ距離計と比べてスポット光の直径および光線の広がり角度を大きくしたものである。

Area net 傾斜計（写真-2）は，本体に傾斜センサと方位センサ，無線通信機能を一体化することにより，道路法面や危険斜面，構造物がどの方向に何度傾斜したのかを計測するものである。

本稿では，拡散レーザ変位計および Area net 傾斜計の機器の概要と性能実験をおこなった結果および地すべり対策工施工時の安全管理手法として変状監視をおこなった事例について紹介する。



写真-1 拡散レーザ変位計外観と反射板

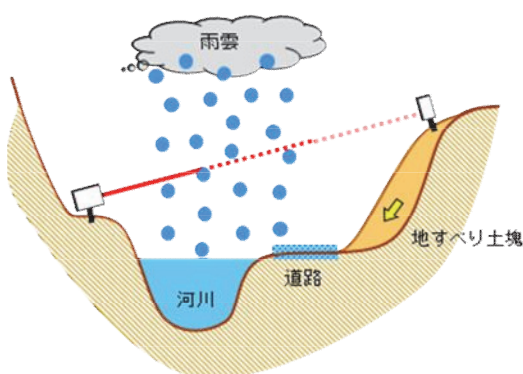


写真-2 Area net 傾斜計

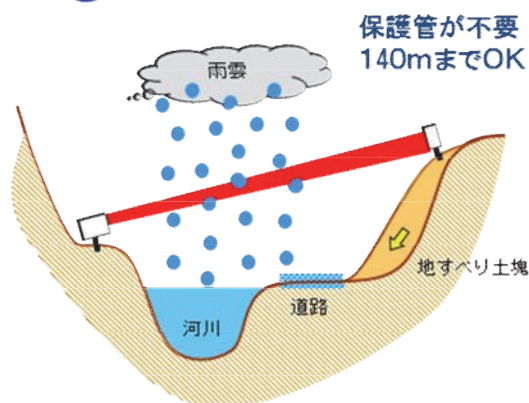
視界不良条件に強く、連続計測できる

✗ レーザー光が雨滴、雪、霧等に遮られてしまい、安定した計測が難しい

○ 独自の光学系によって雨滴、雪、霧等の影響を低減し、安定した計測を実現



通常のレーザー光の場合

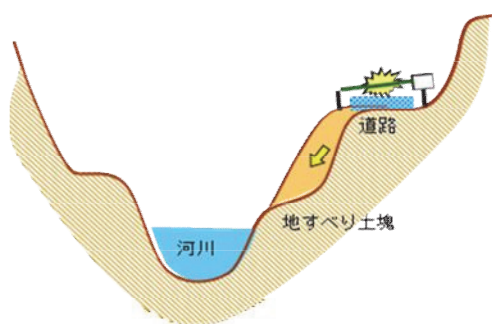


拡散レーザー変位計の場合

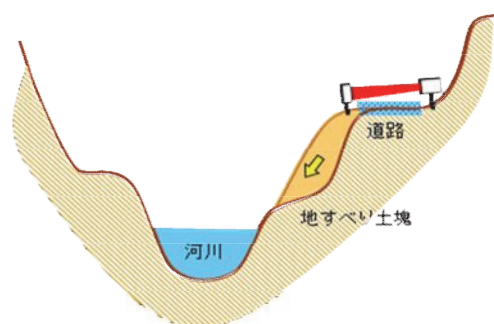
設置条件が広く、連続計測ができる

✗ ワイヤが交通の妨げになる

○ レーザーが遮られても大丈夫



地表変位計の場合

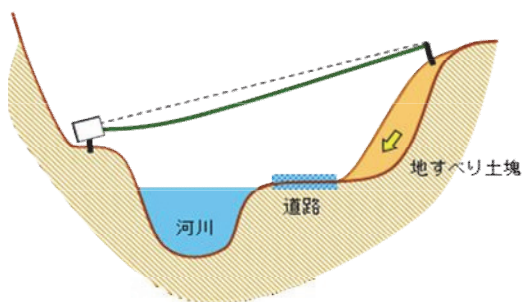


拡散レーザー変位計の場合

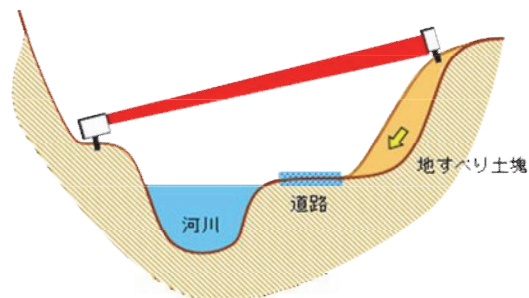
離れた場所から連続観測ができる

✗ 保護管が設置困難
遠すぎる(たわむ)

○ 保護管が不要
140mまでOK



地表変位計の場合



拡散レーザー変位計の場合

図-1 拡散レーザー変位計計測イメージ

2. 拡散レーザー変位計の概要

2.1 概要

レーザー距離計の計測原理は、光源から投光されたレーザー光線を反射板で反射し、レーザー光線の照射波と反射波の位相のずれから基線長(レーザー発振部と反射板の距離)を計測するものである。また、計測を連続的に繰り返すことにより、計測値の信頼性を向上させている。現在、測量に多く使用されている測距儀(光波距離計)はこの計測原理を用いたものである。

しかし、一般的なレーザー距離計(投光ビームの直径が 6 mm 程度)を野外で利用するには、雨や雪、雑草や木の葉などが障害物となってレーザー光線が遮光されて計測が不能となる問題や、霧や雨などの外的要因、レーザー距離計レンズの保護ウインドウや反射板の汚れによって受光光量が減少することで、安定した計測ができなくなる問題がある。これに対して、レーザー光線の出力を高めることで、上記の計測阻害要因に対する耐性を強化することが可能である。しかし、レーザー光線の出力を高めると人体、特に眼への影響が懸念されるため、実際の現場で採用することは難しく、それゆえ野外でのレーザー距離計による自動計測は困難であると考えられてきた。

そこで、我々は、既存のレーザー距離計の技術を応用し、投光ビームの直径や拡がり角を大きくし、受光光量を最適に制御することで、上記の計測阻害要因への耐性を強化し、レーザー光線の出力を高めることなく、野外における安定した計測を可能とした(図-1)。

2.2 計測原理

拡散レーザー変位計の計測原理のイメージを図-2,3 に、システムの外観を写真-3 に示す。

拡散レーザー変位計の計測原理は次のとおりである。

光源を駆動する電気信号を制御し、光源にて発光するレーザー光線の強さに周期的な強弱を付加する。発光したレーザー光線を、投光側の光学系においてコリメート^{※)}やビーム径およびビーム広がり角の調整などをおこなった後、反射板に向けて投光する。

投光したレーザー光線は反射板にあたって反射するが、この反射した光の一部が受光側の光学系に到達することで反射光を受光する。

受光側の光学系では、受光した反射光を検出器に集光する。集光した光は検出器によって電気信号に変換される。このとき、基線長や測定条件の違いによって受光側の電気信号の振幅の大きさは変化するが、その周期は変化しない。

次に、投光側と受光側の振幅の周期を比較し、その位相のずれ量を検出することで投光から受光までの時間差 Δt を測定する。大気中の光速を c とすれば、計器と反射板の間の距離 L は次式により算出できる¹⁾。

$$L = \frac{c \cdot \Delta t}{2}$$

なお、本計器では観測開始時の基線長を初期値として、初期値からの差分を求めることで変位量を求めている。

また、計測間隔は 1 分～24 時間に設定可能で、設定された基準値を超えた場合、計測間隔を変更し警報出力が可能である。

投光と受光の位相のずれから距離を計測

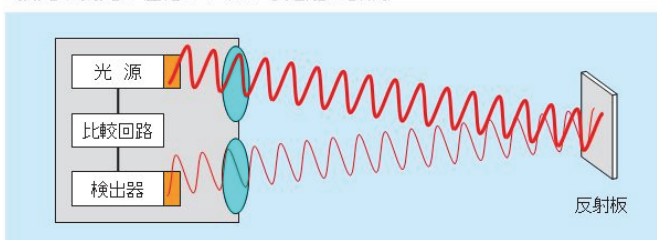


図-2 拡散レーザー変位計の計測原理概念図

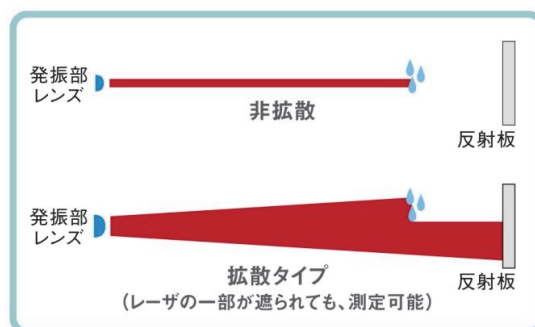


図-3 レーザ光線拡散概念図

※) コリメート：光源を中心として広がる光を平行状態にして真っ直ぐ進む光とすること。

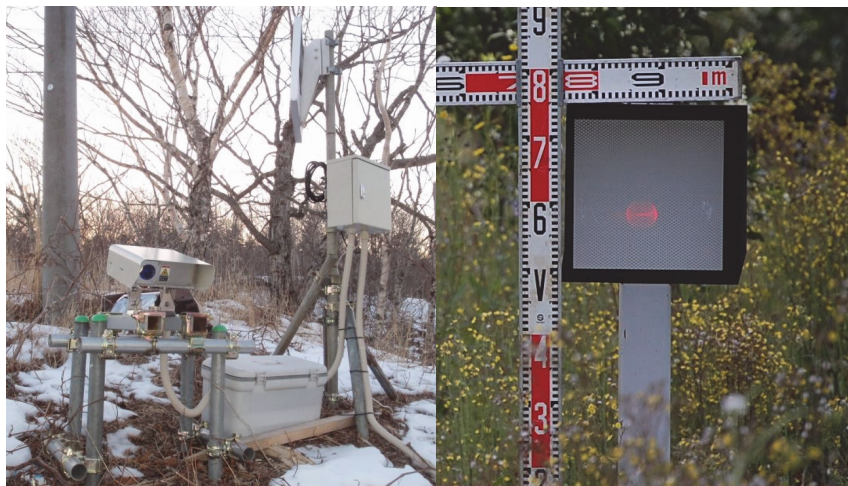


写真-3 拡散レーザ変位計システム外観と反射板

3. 拡散レーザ変位計の精度と安定性

拡散レーザ変位計の計器としての基本機能を確認するため、室内精度実験および野外での実際の使用条件を想定した計測安定性の実証実験をおこなった²⁾。

3.1 室内精度実験

3.1.1 実験方法

拡散レーザ変位計の計測精度を確認するため、室内実験をおこなった。実験の設置概要図を図-4に示す。

本実験では、計測分解能を 0.1 mm、1 回の計測時間を 1 秒以下として 4 回繰り返して計測し、その平均値で精度を評価した。基線長（レーザ発振部と反射板の距離）は約 10 m、約 20 m、約 50 m の 3 ケースとし、読み取り精度 0.1 mm のマイクロメーターを装備した精密スライダーにより反射板と初期位置から 1.0 mm、5.0 mm、10.0 mm と強制的に変位を与えて、各位置における計測値を評価した。

なお、本実験は理想状態における計測性能の評価を目的とし、実験環境は、常温および無風の室内で、照明も常夜灯 1 つのみの非常に暗い環境（ようやく周囲が見える程度）として、計測精度に悪影響を及ぼしそうな諸要因をなるべく排除した状態である。



図-4 室内精度実験における拡散レーザ変位計の計測システムの設置概要図

3.1.2 実験結果と考察

計測結果を表-1に示す。室内実験の結果、拡散レーザ変位計の計測値は基線長約 10 m、約 20 m、約 50 m の 3 ケースともに最大で強制変位の ± 0.2 mm の測定誤差となり、これは地表伸縮計よりも高い精度である。

実験前は基線長に比例して測定誤差も大きくなることも想定されたが、実験結果から、基線長 50 m 以内であれば、基線長に関係なく、計測精度は ± 0.2 mm である。

また、繰り返し計測は、4 回おこなえば、十分な精度を確保できることが示された。

表-1 拡散レーザ変位計の室内精度実験結果

基線長	測定回数 (回)	初期位置	強制変位 1.0mm		強制変位 5.0mm		強制変位 10.0mm	
		測定値(mm)	測定値(mm)	変位(mm)	測定値(mm)	変位(mm)	測定値(mm)	変位(mm)
約 10m	1	10,089.5	10,088.4		10,084.5		10,079.5	
	2	10,089.2	10,088.2		10,084.3		10,079.6	
	3	10,089.4	10,088.2		10,084.5		10,079.6	
	4	10,089.3	10,088.1		10,084.6		10,079.5	
	平均	10,089.4	10,088.2	1.2	10,084.5	4.9	10,079.6	9.8
約 20m	1	20,207.8	20,206.9		20,203.2		20,197.7	
	2	20,207.9	20,206.9		20,203.1		20,198.1	
	3	20,207.9	20,207.1		20,203.1		20,197.9	
	4	20,207.8	20,207.0		20,203.1		20,197.8	
	平均	20,207.9	20,207.0	0.9	20,203.1	4.8	20,197.9	10.0
約 50m	1	51,437.4	51,438.3		51,442.2		51,447.1	
	2	51,437.3	51,438.3		51,442.2		51,447.2	
	3	51,437.4	51,438.4		51,442.3		51,447.2	
	4	51,437.4	51,438.4		51,442.3		51,447.2	
	平均	51,437.4	51,438.4	1.0	51,442.3	4.9	51,447.2	9.8

3.2 降雨時における性能調査

3.2.1 実験の目的と方法

拡散レーザ変位計は、主に地すべりなどの斜面防災分野での使用を想定している。拡散レーザ変位計の特徴は投光ビームの直径や拡がり角を大きくしたことにより、計測障害要因への耐性を強化し、レーザ光線の出力を高めることなく野外における安定した計測を可能とした点にある。そこで、斜面災害の発生要因でかつレーザ距離計の計測障害要因である降雨時に投光ビームの直径や拡がり角を大きくした効果があることを実証する目的で、独立行政法人 防災科学技術研究所が所有する「大型移動降雨装置」において実証実験をおこなった³⁾。

実験手順は以下のである。

拡散レーザ変位計を三脚に固定し、設置する(図-5)。

基線長 30m において、設定降雨強度を最大の 200mm/hr から段階的に小さくし、安定した計測が可能な降雨強度を求める。

基線長 62.5m において、同じく設定降雨強度を 200mm/hr から段階的に小さくし、安定した計測が可能な降雨強度を求める。

反射板に取り付けた読み取り精度 0.01mm の精密スライダー(写真-4)によって強制変位(基準位置から 1,2,3,4,5,10,20,30,40,50mm 往復 3 回繰り返し)を与え、計測精度を求める。

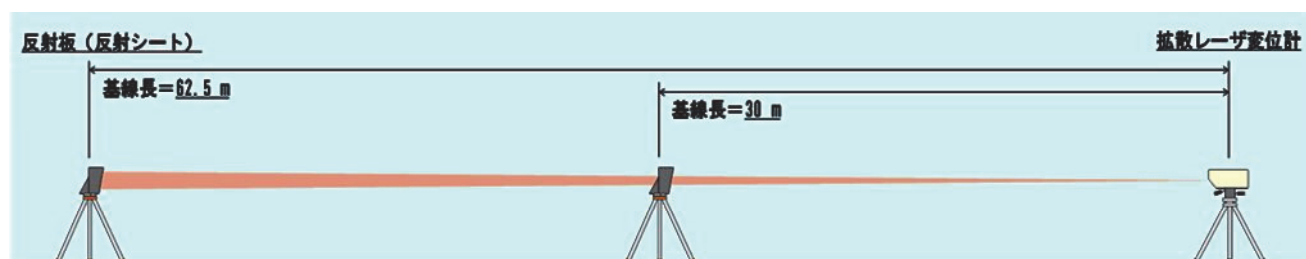


図-5 降雨実験 拡散レーザ変位計と反射板の設置状況概念図

3.2.2 実験結果と考察

各基線長において設定降雨強度を 200mm/hr から段階的に小さくし、計測限界降雨強度を求めた結果を図-6 に示す。

基線長 30m における拡散レーザ変位計の計測限界降雨強度は 200mm/hr(写真-5 左)であった。

基線長 62.5m における計測限界降雨強度は 120mm/hr(写真-5 右)であった。

次に、計測限界降雨強度における計測精度を求めるため、反射板に読み取り精度 0.01 mm の精密スライダーをとりつけ、強制変位(基準位置から 1,2,3,4,5,10,20,30,40,50mm 往復 3 回繰り返し)を与え実験をおこなった結果、基線長 62.5m、設定降雨強度 120mm/hr の条件では強制変位量と計測値の差の最大は 1.2mm、平均では 1.1mm であった。また、各計測回の計測値のばらつきは

0.0mm～0.1mm であった（図-7）。

次に、基線長 25m、設定降雨強度 200mm/hr の条件では、強制変位量と計測値の差の最大は 1.2mm、平均値は 1.0mm であった。また、各計測回の計測値のばらつきは 0.1mm～0.4mm であった（図-8）。

計測限界降雨強度における計測精度実験の結果、拡散レーザ変位計は設定降雨強度および基線長の違いによる計測精度の差はなく、誤差 1.2mm 以下の計測ができており、これは、投光ビームの直径や拡がり角を大きくしたことにより反射光の受光効率が高くなった効果と考えられる。

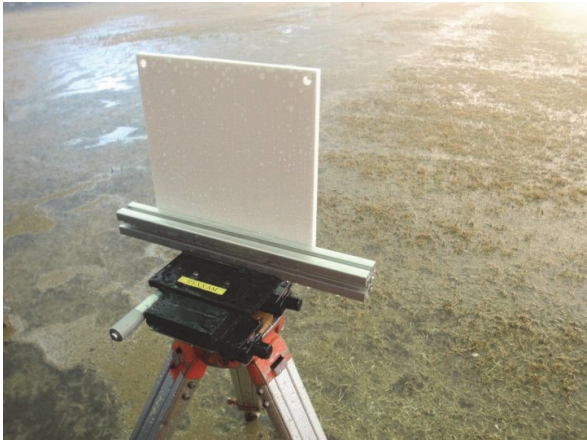


写真-4 精密スライダー（読み取り精度 0.01 mm）の反射板取り付け状況

降雨強度 [mm/hr]	
200	○
190	-
180	○
170	-
160	-
150	-
140	-
130	-
120	○
110	-
100	○
90	-
80	-
70	-
60	-
50	-
40	-
30	-
20	-
10	-
0	-
基線長 [m]	
30	○
62.5	○

○：計測可能（光量値1.0以上）
△：計測可能（光量値1.0未満）
×：計測不能

図-6 降雨条件下における拡散レーザ変位計の性能試験



写真-5 降雨実験状況（左：設定降雨量 200mm/hr、基線長 30m、右：設定降雨量 120mm/hr、基線長 62.5m）

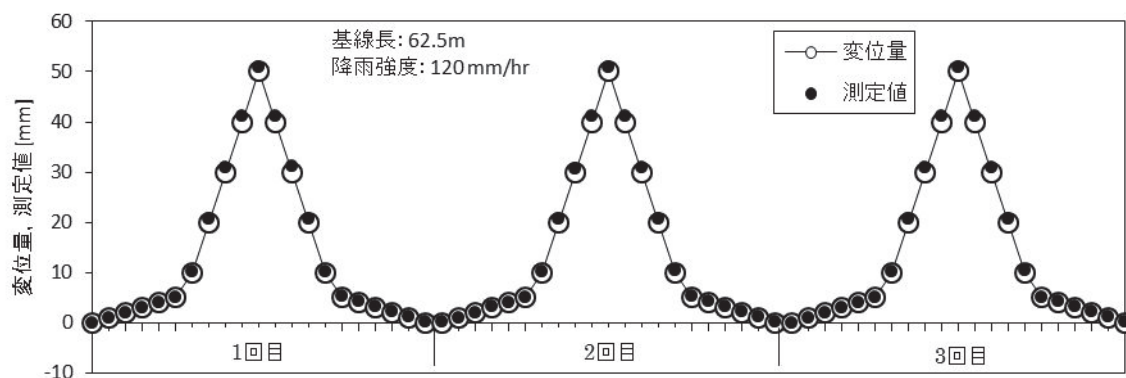


図-7 降雨条件下における強制変位実験（基線長 62.5 m，降雨強度 120 mm/hr）

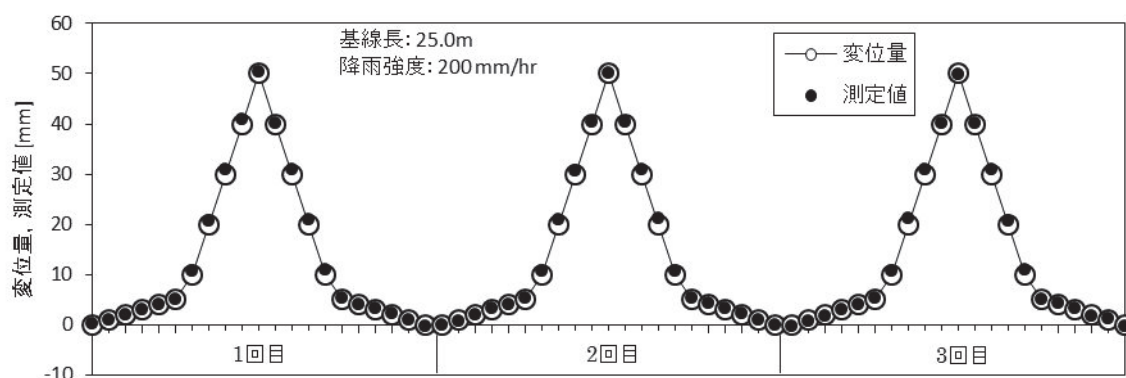


図-8 降雨条件下における強制変位実験（基線長 25.0 m，降雨強度 200 mm/hr）

4. 拡散レーザ変位計と他の計器との比較

拡散レーザ変位計と一般的なレーザ光線を使用した変位計（以下、「ノーマルレーザ変位計」と記す）および接点式計器の地表伸縮計との比較実験をおこなった²⁾。

4.1 地表伸縮計およびノーマルレーザ変位計との比較実験

4.1.1 実験方法

拡散レーザ変位計の安定性と精度について地表伸縮計およびノーマルレーザ変位計と比較するため、野外実験をおこなった。

野外実験では、地表伸縮計、ノーマルレーザ変位計（ビーム径：直径 6 mm）および拡散レーザ変位計の 3 種類の計器を併設し（図-9），同一の計測対象（図-9 の反射板）の変位を同時に測定した。基線長は約 50 m とし、測定間隔は全計器とも 1 分毎に計測をおこなった。反射板は 5～10 分間隔で精密スライダーにより強制変位を付加して各位置において計測した。なお、ノーマルレーザ変位計と拡散レーザ変位計の反射光を区別するため、ノーマルレーザ変位計は 1 分間の時間差で計測した。1 回当りの変位量は 20.0 mm とし、移動変位の方向は反射板が遠ざかる方向へ 4 回（計 80.0 mm）移動させた後、近づく方向にも変位させ、それを 1 サイクルとして連続的に実験をおこなった（サイクル A）。また、反射板の前に背の高い草をおき、意図的に見通しがやや悪い状態をつくって同様の実験をおこなった（サイクル B）。

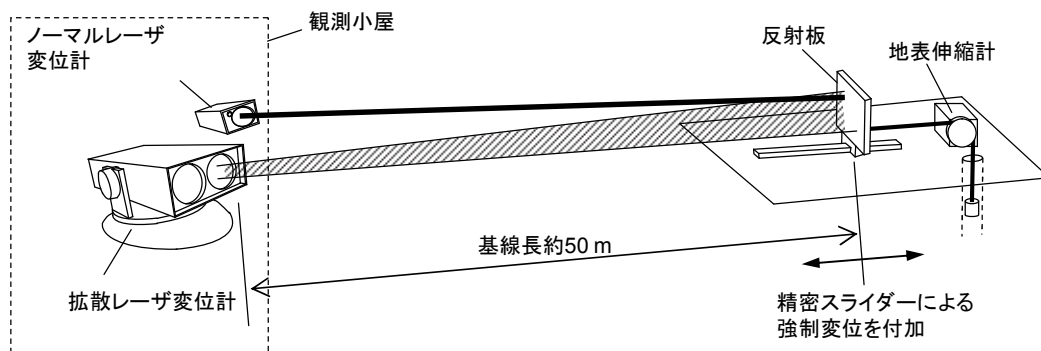


図-9 野外実験における拡散レーザー変位計とノーマルレーザー変位計との比較試験機器設置図

4.1.2 実験結果と考察

地表伸縮計、ノーマルレーザー変位計および拡散レーザー変位計による計測結果を図-10に示す。

サイクルAおよびサイクルBの計測値を見ると、拡散レーザー変位計と地表伸縮計の変位値の相違は1mm以下であり、同程度の計測精度であった。また、草により見通しを悪くしたサイクルBでは、ノーマルレーザー変位計はデータの欠測(値が0に戻る)が見られたが、拡散レーザー変位計は安定してデータを取得できた。

このことも、拡散レーザー変位計の投光ビームの直径や拡がり角を大きくしたことにより、反射光の受光効率が高くなった効果と考えられる。また、本実験の計測時間帯は、レーザー光線や反射板に太陽光が直接当る朝と夕であったが、その影響はないと考えられる。

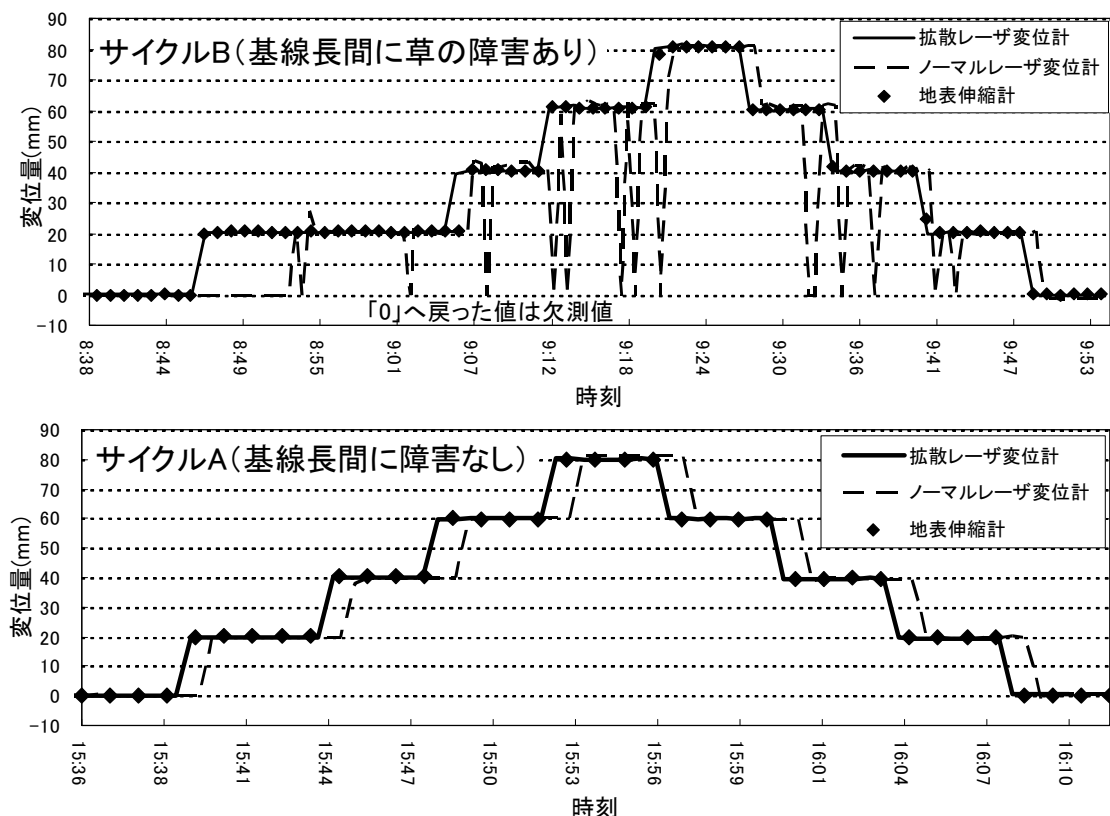


図-10 野外実験における地表伸縮計、拡散レーザー変位計およびノーマルレーザー変位計の計測結果

4.2 地表伸縮計との比較実験

4.2.1 実験方法

拡散レーザ変位計の精度について地表伸縮計と比較するため、野外実験をおこなった。

野外実験では、地表伸縮計と拡散レーザ変位計を併設し（図-11）、同一の計測対象（図-11の反射板）の変位を同時に測定した。基線長は約16 mとし、測定間隔は各計器とも1分毎に計測をおこなった。反射板は約3分間隔で精密スライダーにより強制的に変位を与えて各位置において計測をおこなった。変位量は遠ざかる方向へ+1.0 mm、+1.0 mm、+4.0 mm、+4.0 mmと計4回（計+10.0 mm）変位させた後、近づく方向へ-1.0 mm、-2.0 mm、-3.0 mm、-4.0 mmと計4回（計-10.0 mm）変位させた。

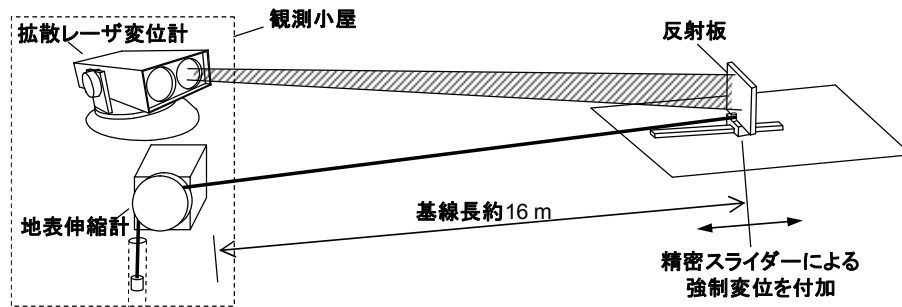


図-11 拡散レーザ変位計と地表伸縮計との比較実験機器設置図

4.2.2 実験結果と考察

各計測結果を整理したグラフを図-12に示す。図-12に示すように、反射板が遠ざかる（伸び）方向では地表伸縮計は強制変位量よりも0.2～0.3 mm短い値となっている。一方、拡散レーザ変位計は最大でも0.1 mmの誤差である。反射板が近づく（縮み）方向では地表伸縮計による計測結果は強制変位量よりも0.4～1.0 mm短い値となり、遠ざかる（伸び）方向よりも誤差が大きくなっている。一方、拡散レーザ変位計は0.1～0.3 mmの精度である。

地表伸縮計の計測値で誤差が大きくなったのは伸びや縮みに対するインバー線の追従性の影響と思われる。特に、縮む方向では、インバー線がたるむことにより、実際の変位に地表伸縮計が即時的に追従できなかったものと考えられる。一方、拡散レーザ変位計は、反射板の移動方向が遠ざかる方向、近づく方向ともに地表伸縮計と比較して高い精度であり、構造上、非接点式であることの優位性が示された。

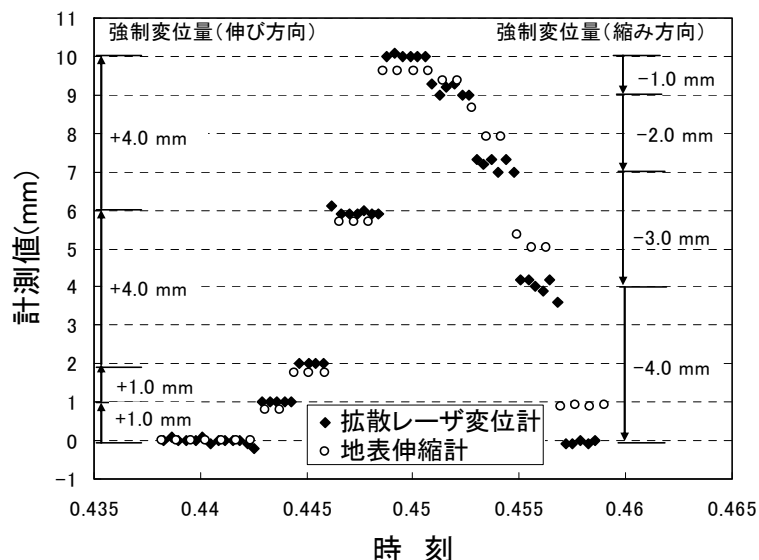


図-12 拡散レーザ変位計と地表伸縮計との比較実験結果

5. 拡散レーザ変位計による斜面監視事例

5.1 斜面変状監視の概要

拡散レーザ変位計による斜面変状の監視を行ったのは、北海道における道路法面の地すべり対策工施工現場である。この施工現場には現道に面する斜面に幅 18m，奥行き 22m，道路からの高さ 23m の規模で活動中の地すべりがあり（図-13），対策工として，地すべり末端部に応急の押さえ盛土を行い地すべりの安定性を確保した上で，斜面上部から地すべり土塊の除去および切土法面にアンカーの打設を順次行ったものである。

地すべり発生直後から対策工施工前までは，地表伸縮計を斜面に 2 基設置し，警報器により変状監視を行っていたが，これらは地すべり対策工施工時に障害となるため，撤去する必要がある。そこで，地表伸縮計に変わる斜面の変状監視手法として容易に設置，撤去ができる拡散レーザ変位計による計測を行ったものである。

本事例では，道路を挟んだ歩道横に本体を設置し，反射板は当初は斜面上部の地すべり土塊内に設置し，施工の進捗に従い切土法面小段部に移設した（写真-6,7）。

設置方法は本体および反射板ともに単管パイプを組み合わせて固定し，電源は，乗用車用 12V バッテリーを使用した。なお，設置に要した時間は，当初の本体+反射板の設置で約 3 時間，反射板の移設は 1 時間以内であった。

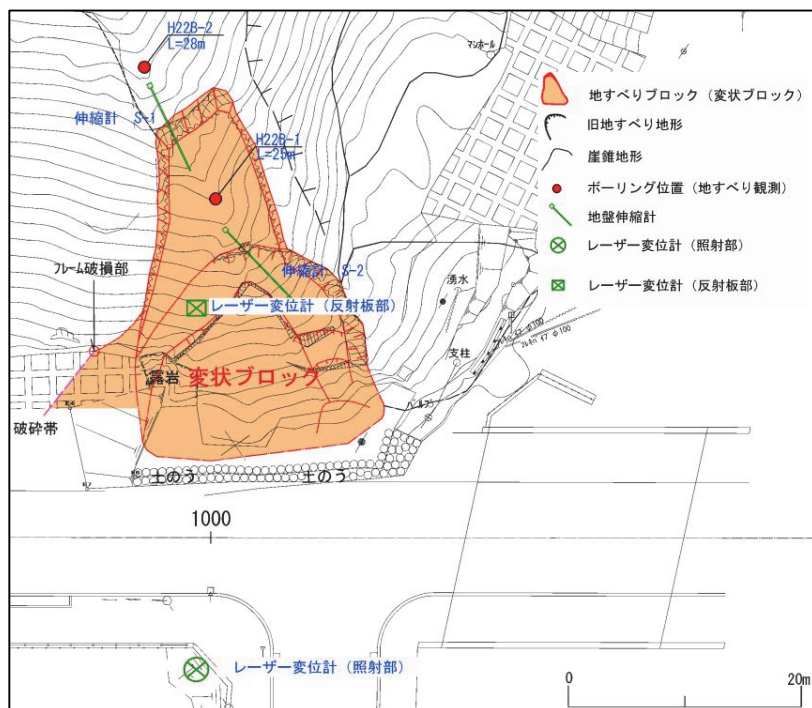


図-13 拡散レーザ変位計設置平面図



写真-6 拡散レーザ変位計設置状況



写真-7 拡散レーザ変位計計測斜面全景

5.2 計測結果

拡散レーザ変位計による斜面変動計測結果を図-14に示す。

計測の結果、地すべり対策工施工中の11月～1月の約2ヶ月の期間に約-23mmの変動が計測された。これは拡散レーザ変位計本体と反射板が近づく＝斜面が下方へ変動していることを表しており、特に、12月3日～4日の2日間では計43mmの降雨があったが、それに伴い観測期間で最大の4.2mmの変動があったことを捉えている。また、変動グラフから、地すべり対策工の施工に伴い、当初の2ヶ月は約10mm/月の変動があったものが、地すべり対策工の施工が進んだ1月以降は約3mm/月と緩やかになっている状況もわかる。

なお、今回の斜面変状監視にあたり、工事中止、通行止めの基準は4mm/hとしたが、施工期間中に基準値を超える変動は観測されなかった。さらに1月には写真-7に示すように150cmを超える積雪となり、気温は-15℃を下回ったが、欠測もなく計測ができた。

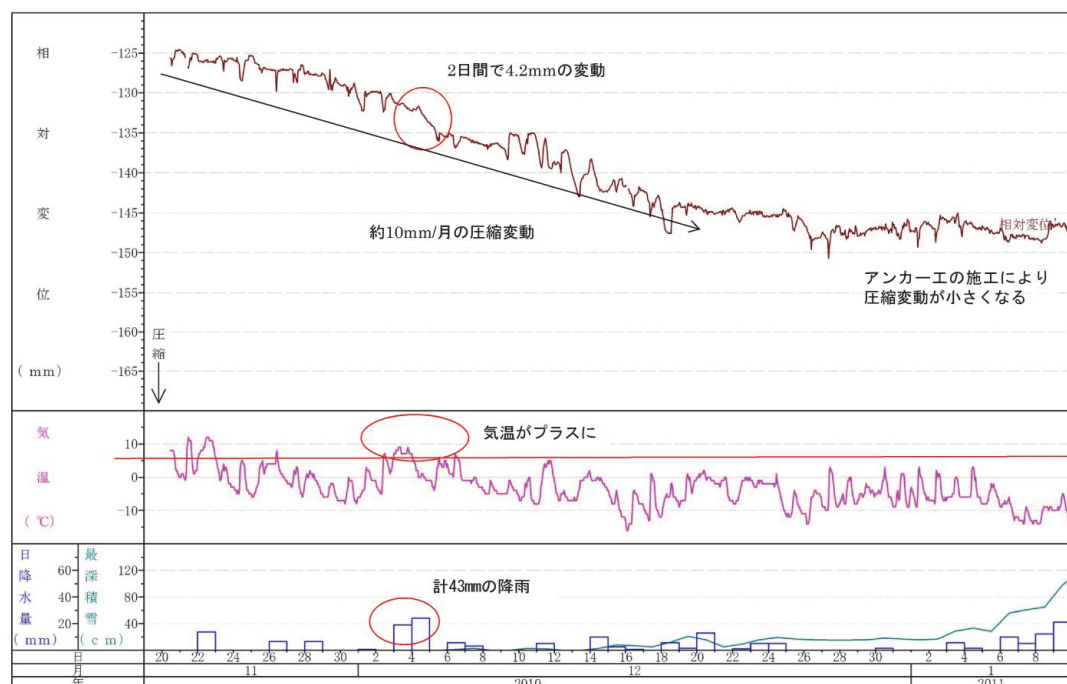


図-14 拡散レーザ変位計による斜面変動計測結果

6. Area net 傾斜計の概要

6.1 概要

我々は、道路法面や危険斜面、構造物の変位を高価なシステムをつけることなく観測・監視でき、専門家でなくても変位があったことが簡単にわかる手法として簡易傾斜監視装置 (Area net 傾斜計) を開発した⁴⁾。Area net 傾斜計は、本体内部に傾斜センサと方位センサがあり、どの方向に何度傾斜したのかがデータとして出力されるものである。計測データは、設置初期値からの相対的な傾斜、方角を計測するので、設置時に垂直に立てる必要やある面を北方向にあわせる必要はない。計測データは、特定小電力無線通信で回収可能で、危険な箇所や高所に行くことなく、データの取得確認ができる仕様となっている(図-15)。

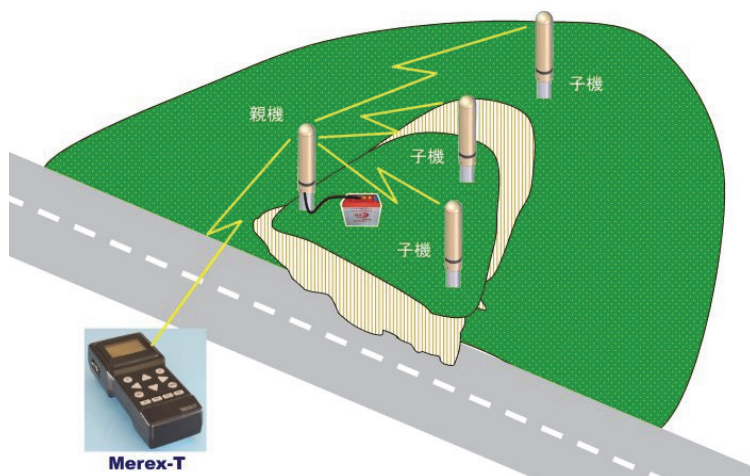


図-15 Area net 傾斜計計測イメージ
(無線通信でデータ回収)

構成は親機 1 基に対して、子機が最大 10 基接続可能で、子機は乾電池駆動のため、電源やデータ通信のための配線が不要で高い拡張性を持つ。設置方法は、基本的には単管パイプの上にアタッチメントで固定するものであり、設置、移設、撤去が容易に低コストで可能となっている。

6.2 計測原理

Area net 傾斜計の計測原理は、内部に 2 軸の加速度センサ (MEMS) を設置し(写真-8)、垂直設置時の重力加速度と傾斜時の重力加速度の値の差から傾斜角(測定分解能 0.025°)を算出するものである(図-16)。また内部には電子コンパスも内蔵しており(分解能 0.1°)、センサの方角も計測している。

センサの測定角度レンジは ± 30 度、測定誤差は ± 0.5 度、計測間隔は 1 分～24 時間に設定可能である。また、拡散レーザ変位計同様に設定された基準値を超えた場合、計測間隔を変更し、警報出力が可能である。

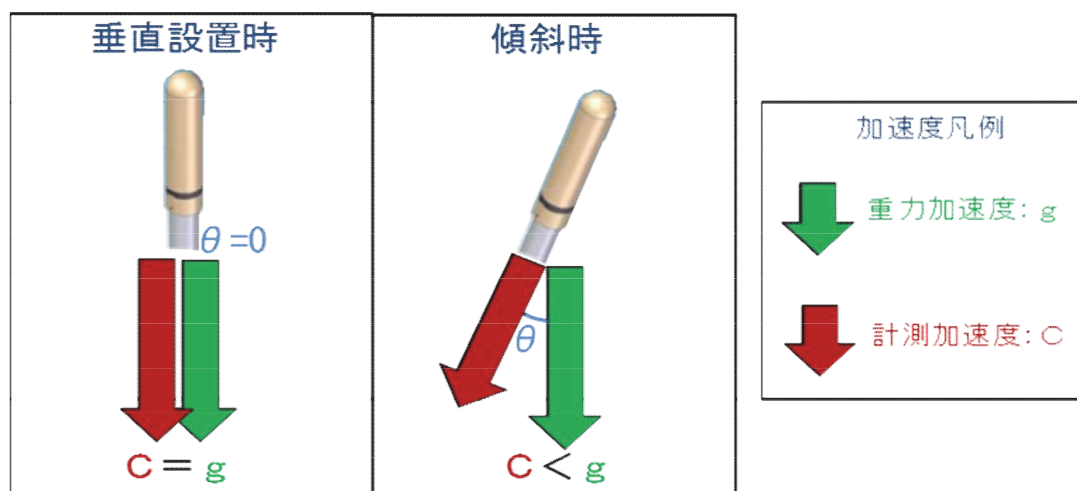


図-16 Area net 傾斜計 計測原理イメージ



写真-8 Area net 傾斜計 機器構造

7. Area net 傾斜計の精度

7.1 実験方法

Area net 傾斜計の基本性能を確認するため、室内精度実験をおこなった。実験状況を写真-9 に示す。

本実験では、Area net 傾斜計を読み取り精度 0.1 mm のマイクロメーターを装備した精密傾斜装置に設置し、0° ~ 5° までは 0.1° ピッチ、5° ~ 30° までは 5° ピッチで±30° の範囲で強制的に傾きを与えて、各位置における計測値を評価した。

なお、本実験は理想状態における計測性能の評価を目的とし、実験環境は、常温および無風の室内で計測精度に悪影響を及ぼしそうな諸要因をなるべく排除した状態である。

7.2 実験結果と考察

計測結果を図-17 に示す。強制変位実験の結果、Area net 傾斜計の計測値は最大で強制変位の±0.3° の測定誤差であった。

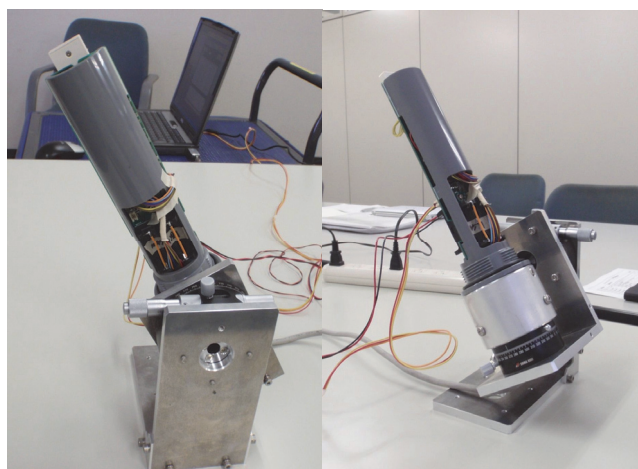


写真-9 Area net 傾斜計 精度実験状況

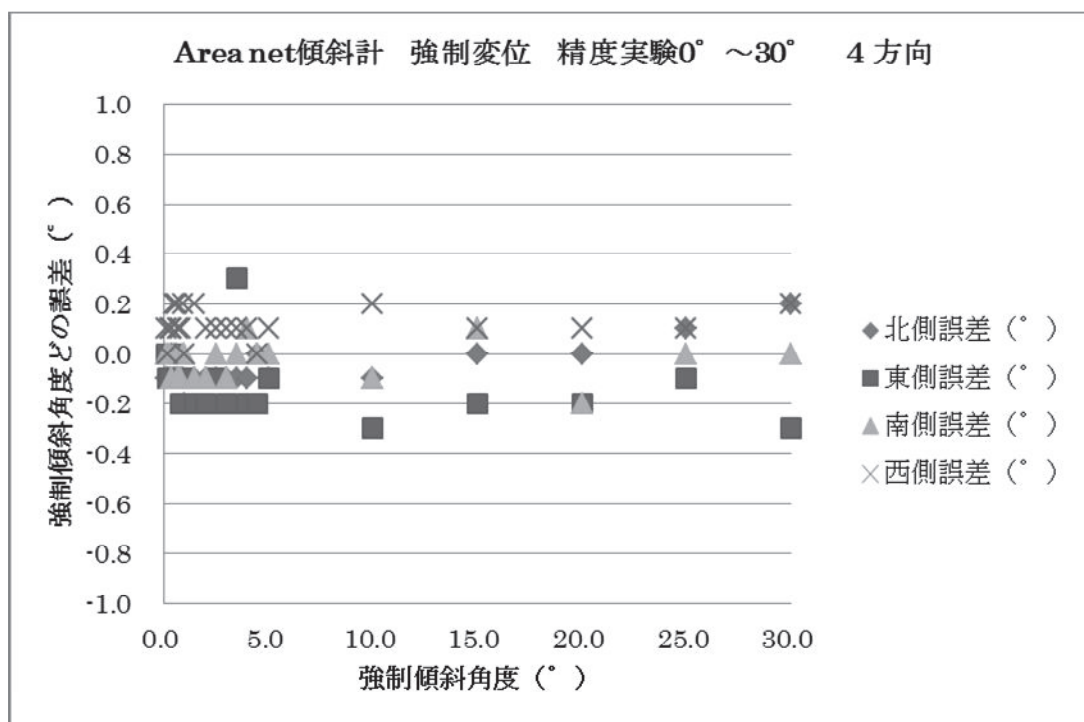


図-17 Area net 傾斜計強制変位実験結果

8. Area net 傾斜計による斜面監視事例

8.1 斜面変状監視の概要

Area net 傾斜計による斜面変状の監視を行ったのは、北海道における道路法面である。この法面では道路の拡幅に伴う掘削工事を施工していたが、その一部で地すべりが発生した。地すべりは図-18 に示すように切土面の法肩に沿って明瞭な亀裂が幅約 45mの範囲で確認され、切土面末端部には押し出し現象も確認されたものである（写真-11）。

地すべり発生後の切土法面の観測としては、調査ボーリング孔を利用したパイプ式歪計、孔内傾斜計の他、地表面の変状観測として抜き板や地表伸縮計を設置した。しかし、図-18 に示すように、切土法面上部斜面に分布する地すべりブロックの形状から推定される地すべりの活動方向と切土法面の向きがほぼ直交しているため、今回発生した地すべりがどの方向に活動しているのかを把握することが地すべりの安定解析や対策工を検討する上で重要であった。そこで、今回発生した地すべりの変動方向を把握する目的で、もっとも変状の大きい地すべり頭部(切土法面部)に Area net 傾斜計を設置した（写真-10）。

Area net 傾斜計の設置は、単管パイプを地面に打ち込み、その頭部にアタッチメントで固定する方法とした。電源は、親機はソーラー電源、子機は乾電池駆動とし、計測間隔は1時間とした。なお、設置に要した時間は、親機+子機の設置で約 1 時間以内であった(図-19 右)。



写真-10 Area net 傾斜計設置状況

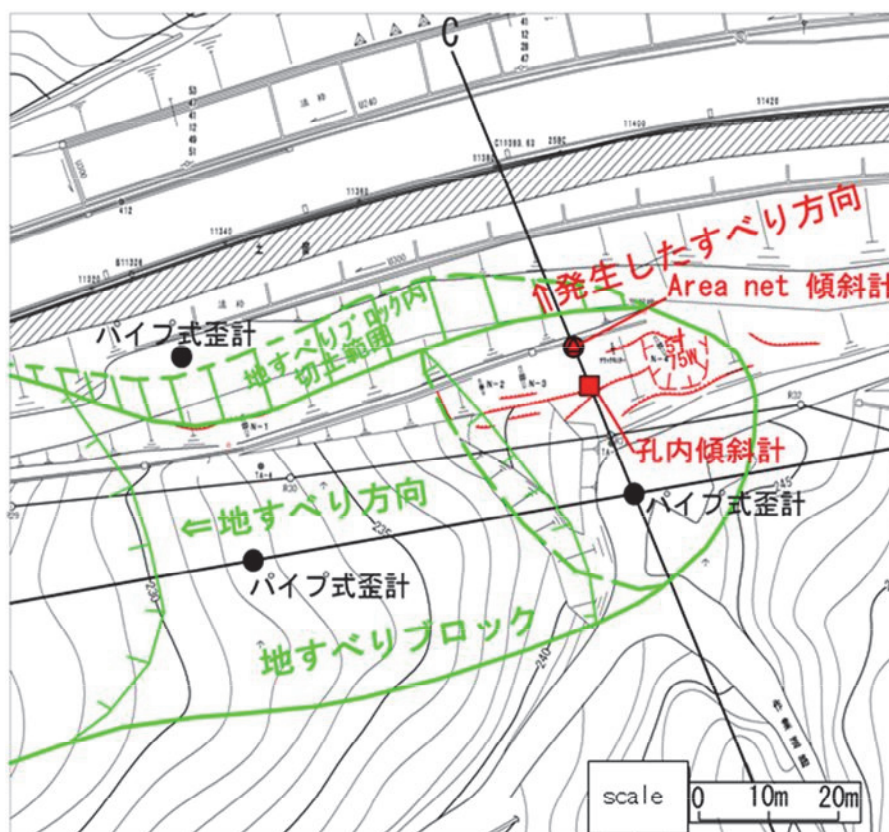


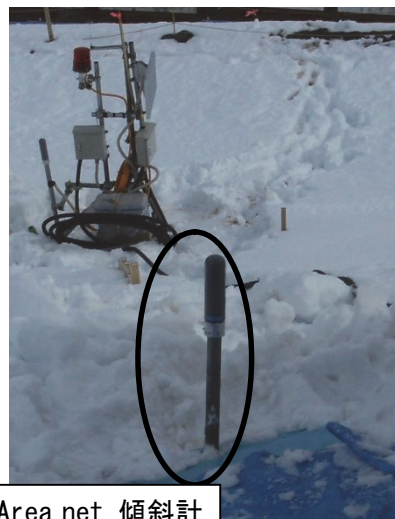
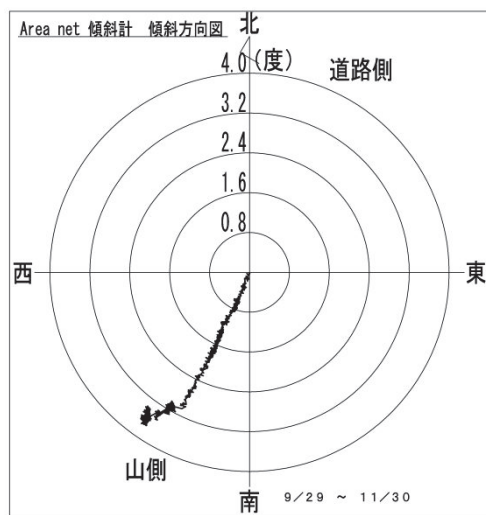
図-18 Area net 傾斜計設置平面図



写真-11 切土面の押し出し区間と亀裂位置（法面背後の地すべりのすべり面）

8.2 計測結果

地すべり観測の結果，明瞭な変動が確認された孔内傾斜計と Area net 傾斜計の観測グラフを図-19,20 に示す。孔内傾斜計では，GL-1.5m と GL-7.5m で明瞭な累積変動が確認され，すべり面の深度と地すべりの動きを捉えたものと判断した。また，降雨時に変動量が多くなる傾向も確認された(図-20)。一方，図-19 に示すように Area net 傾斜計は，切土の山側に向かって傾きが徐々に累積していることがわかる。これは，切土面が回転するような変動を起こしたため，Area net 傾斜計が山側に傾いたことによるものと判断した。また，Area net 傾斜計の変動が前述の孔内傾斜計よりも前に変動を開始していることから，切土の地表部が回転するように変動した後，切土の背後部が GL-7.5m をすべり面として動きだしたと判断できた (図-21)。



Area net 傾斜計

図-19 Area net 傾斜計グラフ (左：傾斜方向，右：設置状況写真)

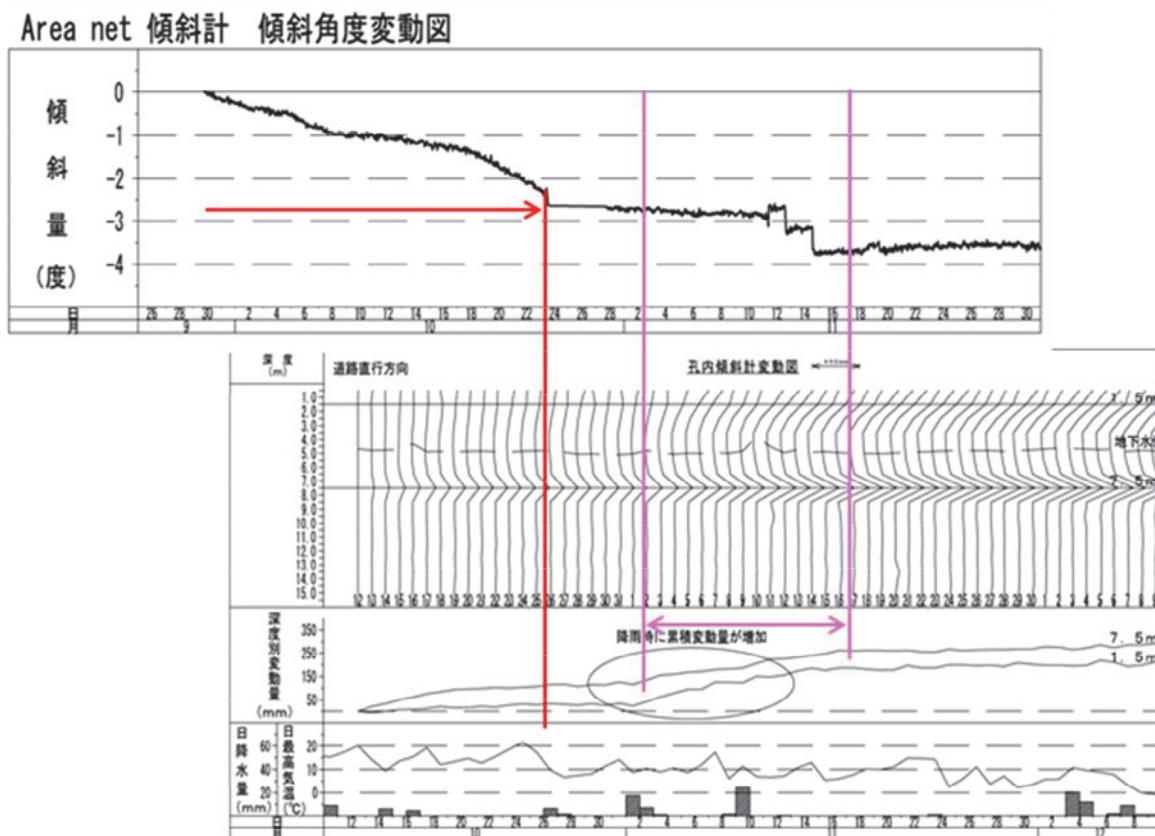


図-20 Area net 傾斜計計測値と孔内傾斜計計測値の時系列整理

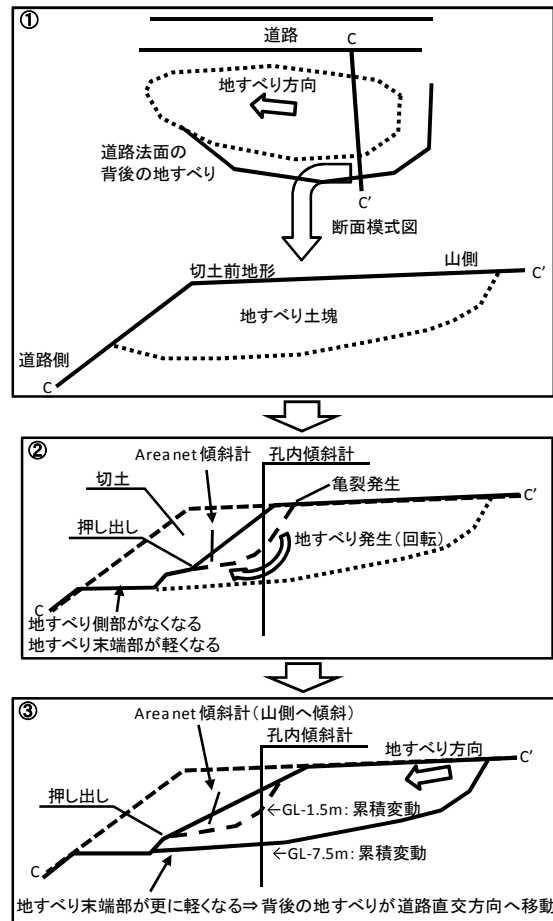


図-21 道路法面の切土工による地すべり発生機構

9. まとめ

拡散レーザ変位計は、室内における安定した環境下では、拡散レーザ変位計の計測値は基線長約 50 m の条件において、強制変位量の ± 0.2 mm の測定誤差であった。また、降雨実験の結果、基線長 30m における計測限界降雨強度は 200mm/hr、基線長 62.5m における計測限界降雨強度は 120mm/hr であった。計測限界降雨強度における計測精度実験の結果、拡散レーザ変位計は設定降雨強度および基線長の違いによる計測精度の差はなく、誤差 1.2mm 以下の計測ができた。さらに、他の計測器との比較実験の結果、拡散レーザ変位計はノーマルレーザ変位計や地表伸縮計とほぼ同等の計測精度を持ち、計測範囲も長いことがわかった。

Area net 傾斜計は、室内における安定した環境下では、 $\pm 0.3^\circ$ の測定誤差で計測ができることを確認した。

地すべり対策工施工時の安全管理手法として、拡散レーザ変位計および Area net 傾斜計による斜面の変状監視を行った結果、拡散レーザ変位計は斜面の変位量を適切にとらえ、安定した計測ができること、対策工の施工により計測器の移設が必要になった場合において容易に移設、再設置ができることが確認された。また、Area net 傾斜計も斜面の傾斜変動を適切にとらえ、冬期間でも安定した計測とデータ通信ができることを確認した。

拡散レーザ変位計および Area net 傾斜計は図-22 に示すように遠隔通信システムにも対応しており、「いままで計測や監視をしたかったが、良い方法がなかった」、「そもそも計測や監視をする概念がなかった」ところへ、これら機器を利用した計測、監視を取り入れることは、安全、安心の確保、コスト縮減、工程短縮、環境の保全につながる有効な手段となると考える。

離れた場所でのデータの確認，警報
メールの受信が可能

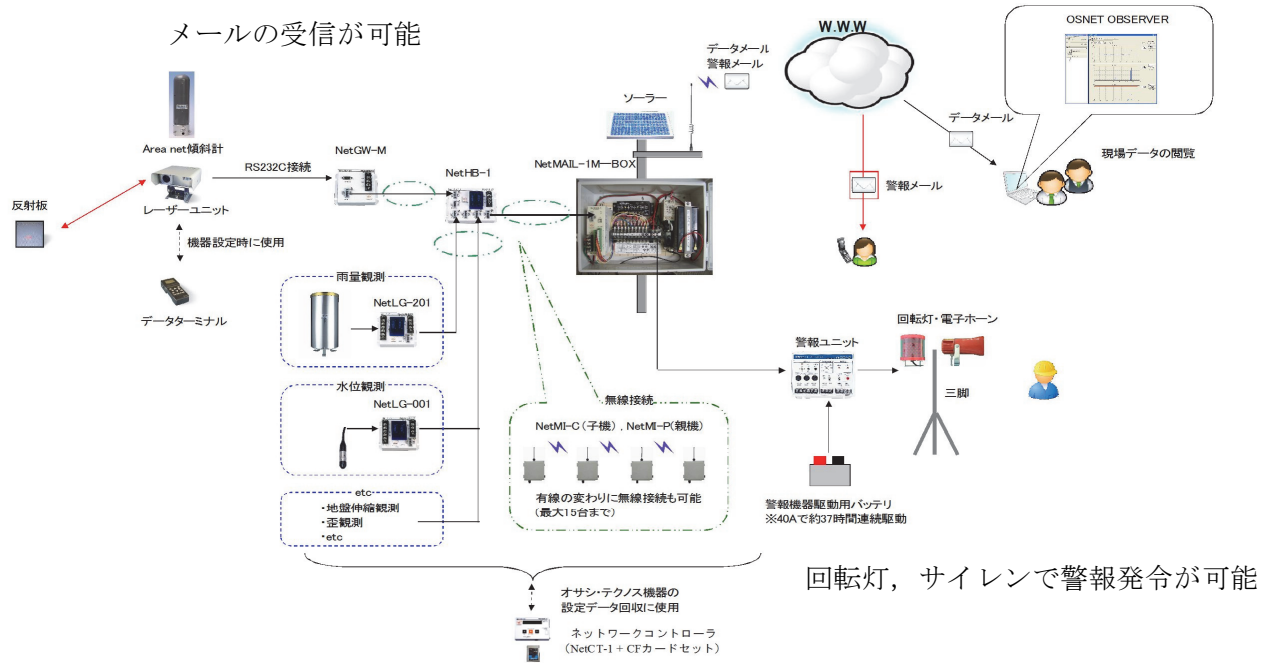


図-22 拡散レーザ変位計・Area net 傾斜計 遠隔通信システム

引用文献

- 1) 光応用計測技術調査研究委員会(1987):光計測のニーズとシーズ, (社)計量管理協会, pp.139-159.
- 2) 納谷 宏,溝上雅宏,浅利晋一郎,増成友宏,清水則一,前田寛之(2008):拡散レーザ変位計の開発とその実用性の検証,(社)日本地すべり学会誌,vol.44,No.6,pp.339-348.
- 3) 納谷 宏,久保徹也,滝口 潤,中島伸一郎,清水則一(2012):拡散レーザ変位計の改善と降雨時の計測性能調査,(社)日本地すべり学会誌,vol.49,No.6,pp.322-329.
- 4) 納谷 宏,鎌野浩之(2010):簡易傾斜監視装置の開発,第 49 回日本地すべり学会研究発表会講演集,pp.167-168.

切土掘削工事中の斜面崩壊による労働災害防止のための計測

(独) 労働安全衛生総合研究所

伊藤 和也

1 はじめに

一般的に土砂崩壊発生の誘因は豪雨や地震のような自然現象と建設工事等の人為的なものの2種類に分けることができる。後者の誘因により、建設工事に従事する労働者が被災する労働災害が毎年繰り返し発生し、土砂崩壊による労働災害の死亡者は、毎年10～20名前後で推移している¹⁾。そのうち約半数が道路建設工事や急傾斜地対策工事といった、斜面の切取りを伴う工事における斜面崩壊によるものである。これらの工事では、工事が完了すれば安定な構造となるものの、その施工過程において十分な対策が取られずに不安定な斜面の下で作業が行われていることがある。このような工事中に斜面崩壊が発生した労働災害（主に死亡災害）の調査・分析結果²⁾ ³⁾によると、地山・法面掘削中に被災するケースに加えて掘削後に切取った斜面の近くで行う作業中に被災するケースがそれ以上の件数発生している（図-1）。切取った斜面の近くで行う作業中の被災例としては、例えば、図-2の概念図に示すように擁壁と地山の間の狭い場所で行う型枠の組立・解体作業での災害がある。このような作業では斜面崩壊が発生すると逃げ場が無いために逃げ遅れて被災する事例が多く報告されている。

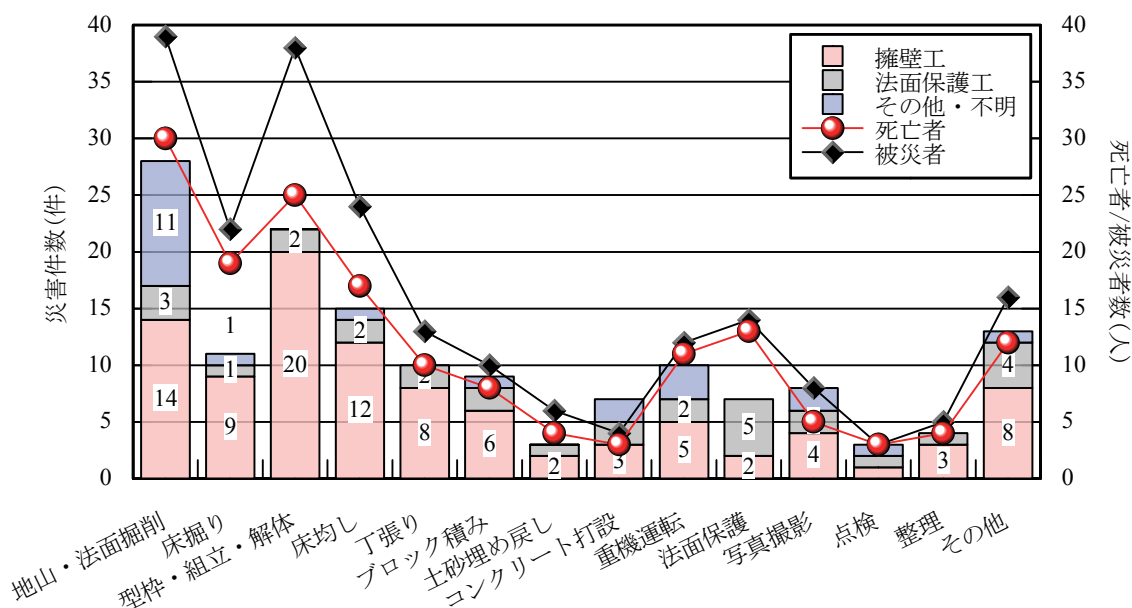


図-1 災害発生時に被災者が行っていた作業²⁾

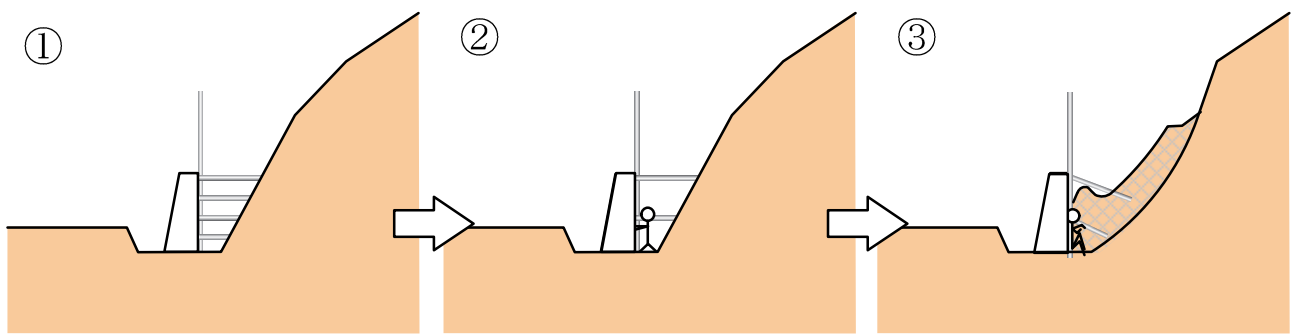


図-2 型枠の解体中の労働災害の概念図²⁾

切土掘削工事時の斜面崩壊による労働災害の背景には、急勾配に切土掘削したために不安定化している法面付近で作業をしなければならない施工方法の欠点が指摘できる⁴⁾。こうした災害を防止するためには作業者が被災することのないような安全な施工方法とすることが第一義的に重要である。安全な施工方法を策定するためには、切土掘削した斜面が安定か不安定かを工学的に判定する必要がある。しかしながら、安定な切取り斜面の高さや勾配、土留め工の設置位置・強度、長大斜面における土圧の算定法などの斜面安定問題は、現在の地盤工学・岩盤力学等の知見でもまだ完全には解明されたとは言い難い現状である。

人工的に作成される鋼やコンクリートと比べて、切土掘削工事の対象となる地盤は、地殻変動や浸食・堆積といった自然現象の履歴や、さらには盛土工事等の人工的な工事の履歴を受けてきたことが考えられ、通常的地盤調査などでは地質状態を十分には掌握しきれないこともある。また、そもそも道路建設工事等に付随するような中小規模の切土掘削工事では、「土・岩質」区分などで切土勾配が決定されることが多く、地盤状態は掌握できない。こうした地盤情報の不確実性や地盤情報の精度が悪い中でも、計測や観察によって地盤の挙動を見極めながら施工することの重要性が、地盤工学の分野では古くから指摘されてきた⁵⁾。Terzaghi and Peckによって提唱された観測施工 (Observational Procedure) は、軟弱地盤を対象として発達してきたが、設計理論・計測技術の高度化によって、動態観測や情報化施工として困難な土木・建築の大プロジェクト工事に利用されている⁶⁾。

土木・建築構造物における計測施工や常時計測を行う場合の計測機器(システム)のコストと精度の関係の概念図を図-3に示す。ここで、重要構造物とは、構造物が破損・損壊・倒壊すると社会的に重大な損失や甚大な被害を生じうる構造物を指す。従来の計測施工は、このような重要構造物での大規模な崩壊を対象とするものが主であり計測実績も多い。一方、本研究で対象とする領域は、経費に余裕のない中小規模工事でも現場の判断で採用できる程度のコストでなるべく高精度となる計測システムである。この領域における計測システムの研究・開発は従前よりは認知されてきたが、まだまだ十分とは言えない現状である。

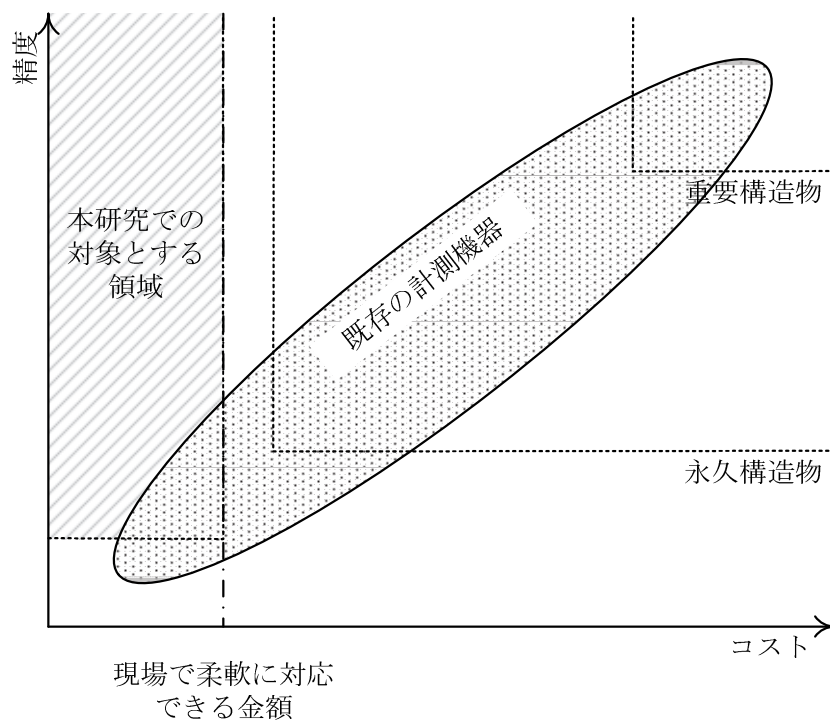


図-3 土木・建築構造物における計測施工でのコストと精度の概念図

一般に、小規模な崩壊であっても、斜面崩壊が発生する前には、地盤内部のバランスが徐々に崩れ、それに伴って変形が発生する。崩壊前に斜面上の小石などがパラパラと落ちてきたり、地中の植物の根が切れる音が聞こえたりするなど崩壊の前兆として知られているこれらの現象も崩壊前に地盤が徐々に変形していることを示すものである。このような地盤変形やそれに伴う応力の発生を捉える方法としては、様々な計測手法があり、状況に応じて単体で使用したり、複数台の計測器を用いて、全体系のシステムとして使用したりしているのが現状であろう。

本報告では、まず、斜面崩壊による労働災害防止対策の変遷および最新の動向を紹介する。次に、(独)労働安全衛生総合研究所にて研究している切土掘削工事中の斜面崩壊による労働災害を防止するための計測として、(1)法尻部の切取り作業による実物大斜面崩壊実験と、(2)実際の治山堰堤築造工事に伴う裾部切取り工事現場への設置・計測事例について紹介する。

2 斜面崩壊による労働災害の防止対策の変遷

2.1 検討の経緯

切土掘削工事の労働災害防止対策は、1970年代から現在に至るまで断続的に検討が行われている。例えば、旧労働省産業安全研究所（現独立行政法人労働安全衛生総合研究所）は、1972年～1976年に発生した切取り工事の労働災害について詳細な調査分析を実施している⁷⁾。また、建設業労働災害防止協会は、1976年から「土砂崩壊防止対策委員会」を設け、その中で1979年に切取工事に対する安全施工の指針として「切取工事の安全」を公表した⁸⁾。また、旧社団法人土質工学会（現公

益社団法人地盤工学会）は、1983 年から 3 年間にわたって旧労働省からの委託により「掘削工事の安全技術に関する調査研究会」を設置し、主として崩壊の事前予測、災害の予防等の技術解明に焦点を当てた検討を行った⁹⁾。その後も様々な機関で幾度となく検討する機会が設けられていたが、具体的な労働災害防止対策を打ち出すには至っていなかった。

このような状況下において、独立行政法人労働安全衛生総合研究所は、2009 年 3 月に「斜面崩壊による労働災害の防止対策に関する調査研究会」を設立し、有効な斜面崩壊による労働災害防止対策の強化を図るため、斜面崩壊による労働災害の防止措置の現状、斜面崩壊防止工法の普及状況及び問題点等を調査し、実態の分析と同種災害防止対策に関する所要の検討を行い、2010 年 3 月に「斜面崩壊による労働災害の防止対策に関する調査研究会」報告書をまとめた¹⁰⁾。この報告書の詳細は（独）労働安全衛生総合研究所のホームページよりダウンロードできるので参考にしたい。ここでは要点について紹介する。

2.2 「斜面崩壊による労働災害の防止対策に関する調査研究会」報告書（要点）

この報告書では、発注者、調査・設計者、及び施工者の三者が斜面崩壊の危険性について情報を共有し、施工途上で判明した新たな地盤リスクに対応するための手段として、調査・計画・設計から施工終了までの全ての工程において掘削地山の情報を共有する点検表（図-4）が提案された。また、この点検表内の項目で該当する事象が発生した場合には、発注者等へ連絡して「安全性の検討（図-5）」を行うことにしており、斜面崩壊の危険要因の芽を早期に摘みとることで、労働者の安全を確保することとしている。なお、「安全性の検討」は、複数の経験者の意見を聞いて対応を判断することとしている。地盤や地質の専門家による的確な判断が必要となる。

この報告書の考え方は、一律に設備対策を講じることで労働災害を減少させてきた溝掘削工事における労働災害防止対策（土止め先行工法）とは根本的に考え方が異なる。それは、斜面の切土掘削工事が溝掘削工事と比べても、その規模、工程及び作業形態が多様であるために、一律的な設備対策だけでは費用対効果を考えると対策が困難なためである。

これまでの各機関の検討では、施工現場や施工業者だけで対処できる対策法を念頭に置いて検討していたため、その規模、工程及び作業形態が多様な斜面の切土掘削工事に対する具体的な対策を統一化することが難しかった。そのため、調査研究会では、斜面崩壊による労働災害が頻発している切土斜面高さ 10m までの中小規模掘削（図-6）を対象を限定して、中小規模の掘削工事の現状（事前の調査が十分に行われていないことや構造物を築造するための工事に付随して切土掘削工事が行われることなど）や労働災害事例の傾向を踏まえて適用可能な対策について検討している。また、施工現場だけではなく、計画・調査・設計の段階から施工段階毎に的確に地盤リスクを判断して必要な対策を適切に講じることで地盤リスクを低減することを目指している点でも従来の労働災害防止対策とは大きく異なる。

この点検表は、掘削する地山の露頭（①設計、②施工計画）、表面（③丁張り）、内部（④掘削工事中 ⑤完了時）と地山の状況が確認できる状態ごとに特に注意の必要な切土部の調査項目をチェックするためのものである。1項目でも有があれば安全性の検討を行い、安全な掘削勾配とするなど、施工の安全を確保してから次の段階に進む。

工事箇所名		有無未に○印をつける：有＝現象が有る 無＝現象が無い 未＝未確認（確認出来ない）						
位置	要因	項目	現象（確認内容）	①設計	②施工計画	③丁張	掘削	
							④工事中	⑤完了時
残斜面	地形	地すべり地	亀裂、段差、等高線の乱れ等がある	有無未	有無未	有無未	有無	有無
		浮石転石	不安定な状況にある	有無未	有無未	有無未	有無	有無
		オーバーハング	新鮮な崩落が認められる	有無未	有無未	有無未	有無	有無
切土部斜面	地質 （土・岩質）	崩積土・強風化斜面	不均一で軟弱な土質である	有無未	有無未	有無未	有無	有無
		砂質土等	特に浸食に弱い土質である	有無未	有無未	有無未	有無	有無
		風化が速い岩	表層から土砂化する岩である	有無未	有無未	有無未	有無	有無
		割れ目の多い岩	亀裂が多く、もろい岩である	有無未	有無未	有無未	有無	有無
湧水	凍結	流れ盤	流れ盤亀裂で簡単に剥離する	有無未	有無未	有無未	有無	有無
		破砕帯など	すべる可能性がある弱層がある	有無未	有無未	有無未	有無	有無
災害記録 掘削勾配	地下水	多量で濁りがある	凍結・融解が著しく起こる	有無未	有無未	有無未	有無	有無
	凍結融解	近傍工事箇所で崩壊履歴がある	自立性	掘削作業で仕様の勾配が確保できない	有無未	有無未	有無	有無
	斜面崩壊							
		月/日 点検者サイン		/	/	/	/	/
施工の安全性の確保が出来ている		月/日 確認者サイン		/	/	/	/	/

図-4 設計・施工段階別点検表 10)を加筆修正

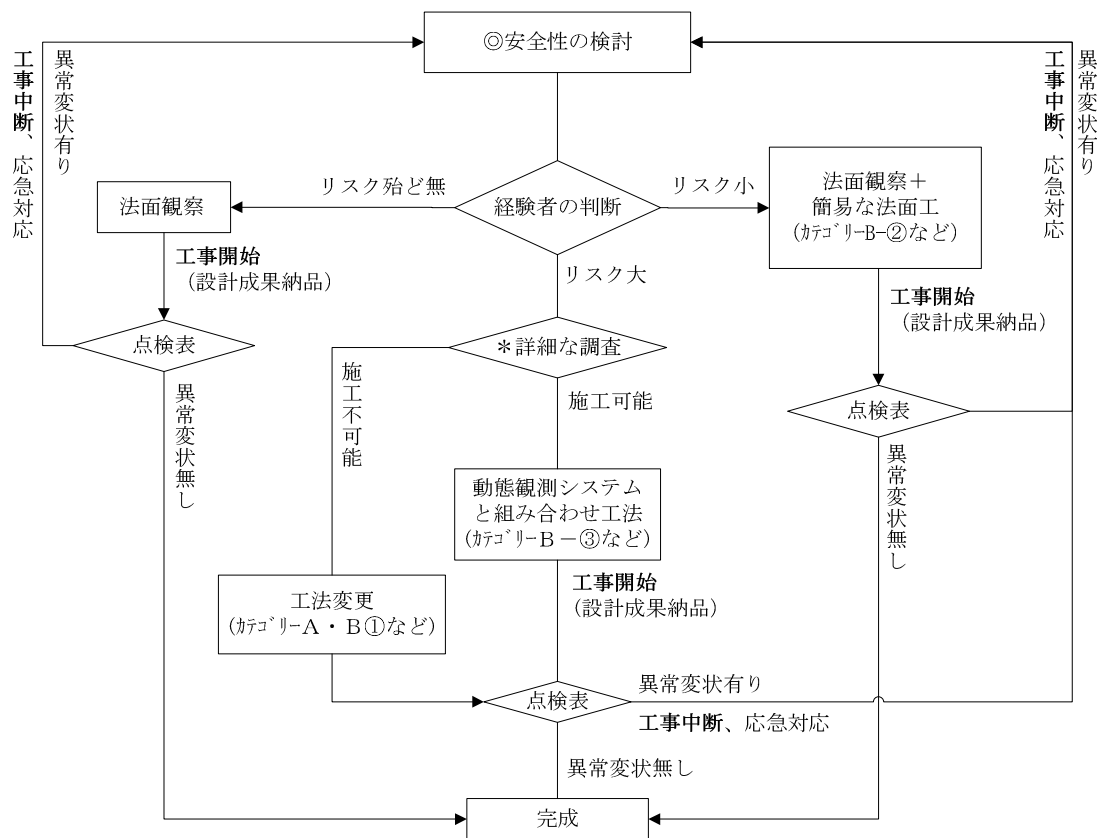


図-5 工事における安全性の検討に関するフローチャート 10)

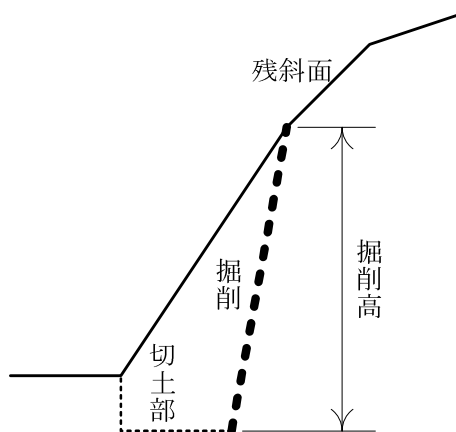


図-6 報告書で対象とする範囲 10)

2.3 今後の動向

この報告書を受け、建設業労働災害防止協会では、発注者、調査・設計者、施工者のそれぞれの立場の誰もが効果的に使えるように、調査研究会が提案した点検表について、点検表の使い方、点検項目の判断方法、点検結果に基づく措置などの点検表の実用化に向けた具体的な検討を行っている。この点検表は、施工現場だけではなく、計画・調査・設計

段階から施工段階ごとに的確に地盤リスクを判断することで、斜面崩壊による労働者の被災という危険の芽を早期に摘み取るような、ハードとソフトを含めた包括的で新しい労働災害防止対策の動きが始まったと考えられ、今後の発展・展開が期待される。

3 切土掘削工事中の斜面崩壊による労働災害防止のための計測（実施事例）

切土掘削工事中の斜面崩壊による労働災害を防止するために（独）労働安全衛生総合研究所にて研究を進めている 2 つの事例を紹介する。なお、これらの情報について、3.1 は文献^{11)~12)}に、3.2 は文献^{13)~14)}にそれぞれ詳しい。また、今回紹介する計測システムとは別の検討事例^{15)~16)}もあり参考にして頂きたい。

3.1 法尻部の切取り作業による実物大斜面崩壊実験^{11)~12)}

(1) 施工概要

大型宅地造成地域内（図-7）において、高さ 5m、幅 14m、斜面角度 50° に切り取った地山（関東ローム）を本体構造とし（図-8）、腹付盛土形式で、高さ 5m、勾配 45° の試験盛土を作製した。使用した試料は、現地発生土である関東ロームと成田砂である。試験盛土は、1 層あたり撒きだし厚さ 0.6m、敷き均し厚さ 0.5m として試料を投入し（図-9）、初期勾配 1:1.5（約 33°）となるように盛土を築造した。ここで、締め固めに使用した転圧機械は、湿地用ブルドーザー（重量約 7ton、接地圧 25.5kPa、図-10）である。密な地盤を作製する際には転圧回数を 5 回、緩い地盤を作製する際には転圧を実施しなかった。本実験では 2 種類の盛土材料を 2 種類の硬さにて築造しており、それぞれの幅は 3.5m である。その後、試験盛土の斜面勾配を 45° となるように切取り、斜面高さ 5m、勾配 45° となる試験盛土を完成させた（図-11）。

(2) 実験方法と計測項目

築造した試験盛土を崩壊させるために、実験では法尻部を掘削することで斜面を不安定化させた。これは、斜面崩壊による労働災害が、道路拡張工事や急傾斜地対策工事におい



図-7 実物大実験現場（実験前）



図-8 地山の切土掘削完了後



図-9 試料の投入・均し



図-10 転圧に利用した湿地用ブルドーザー



図-11 完成した試験盛土

て、重力壁などの対策工の施工中に法面を急勾配に掘削することや、床付け作業による法尻部の掘削中に多く発生していることから、これらを簡単にモデル化したものである（図-2のような作業）。斜面の切取りは、バックホーを用いて行った。掘削方法は、1回の切取り高さを約0.5m毎とし、1回の掘削終了後、約5分間放置し、これを崩壊するまで最大で7回（高さ約3.5m、設置されている計測器の都合による）行った（図-12）。なお、掘削幅は各ケース3.5mの幅を有しているが、隣の斜面への影響を考慮して2.5mのみを掘削することとした。

計測機器の配置状況を図-13～14に示す。傾斜計を斜面上に2箇所、法肩部に3箇所設置した。この傾斜計は、自動車の車両制御システムに利用される半導体型加速度センサー¹³⁾を傾斜計として利用しており、分解能は1/100度の傾斜計である¹⁴⁾。なお、この傾斜計



図-12 斜面の切取り（7段階まで段階的に掘削）

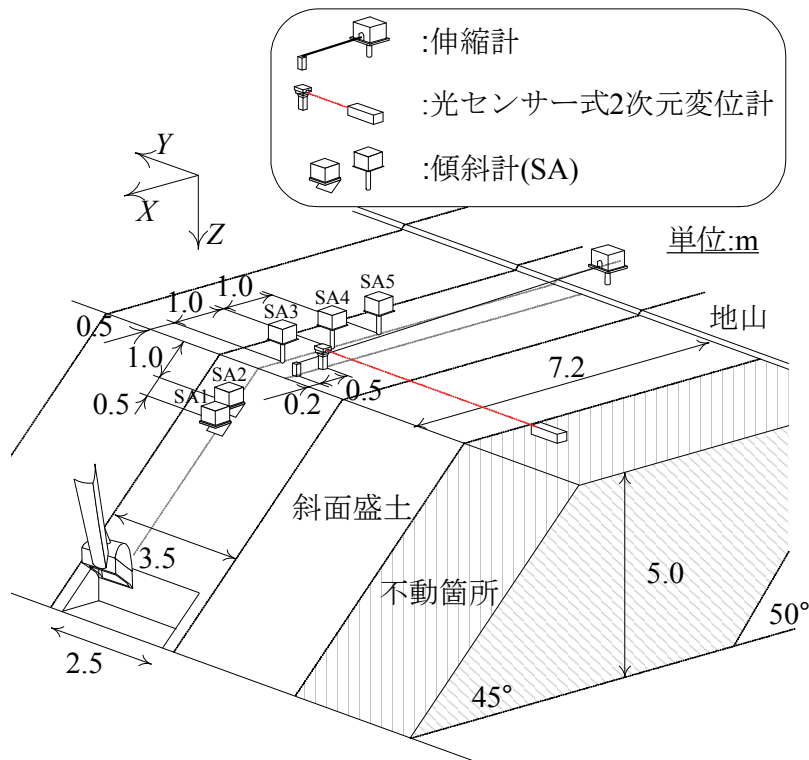
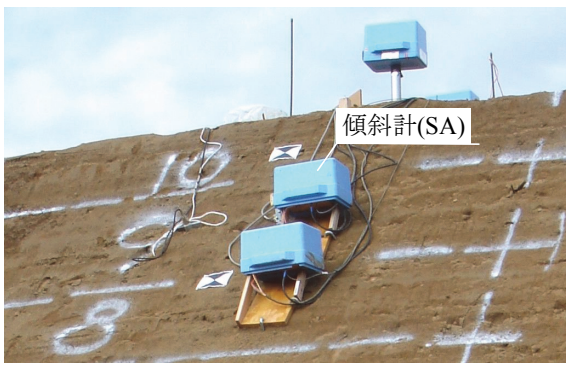


図-13 計測器設置位置

は3.2にて紹介しているIT傾斜計の前バージョンである。また、法肩部には、ワイヤー式伸縮計（以下、伸縮計）と光センサー式2次元変位計¹¹⁾も設置しており、掘削による微小変形を計測することが可能となっている。これらの計測機器は、建設工事中に発生した斜面崩壊による労働災害事例での崩壊形状から、掘削箇所の近傍に設置することが、早期の変形把握や的確な崩壊予測につながり、労働者を避難する警報用計測機器として利用できると考えて設置した。以降の計測器の座標系については、図-13に示した座標系に従って記述する。なお、本報では紙面の都合上、成田砂地盤の結果について以下に示す。



(a) 法面



(b) 法肩

図-14 計測器設置位置

(3) 実物大斜面崩壊実験結果

伸縮計と光センサー式2次元変位計の変位 (X, Z 方向) および, X・Y 方向の傾斜角度の計測結果ならびに崩壊状況について, 以下にそれぞれ示す.

① 成田砂地盤 (緩)

成田砂地盤 (緩) の伸縮計および光センサー式2次元変位計の変位および, X・Y 方向の傾斜角度の計測結果を図-15 に示す. また, 各崩壊時の挙動を図-16 に示す. 設置された各種計測機器は, 切取り高さ 2.5m 掘削中から徐々に変形の徴候を捕らえていた. 1 回目の崩壊は, 伸縮計と光センサー式2次元変位計の Z 方向成分が約 2.0mm 移動した掘削終了直後に, 斜面内にて小規模な部分崩壊として発生した (図-16(a)). その後, 切取り高さ 3.0m まで掘削を行ったところ, X 方向成分も変位し, 掘削途中で右側の側面を一部含んだ崩壊が発生した (図-16(b)). そこで, 掘削を一時中断して観察していたところ, 3 回目の崩壊が発生した (図-16(c)). 傾斜計の全体的な傾向として, X 方向がプラス方向, Y 方向がマイナ

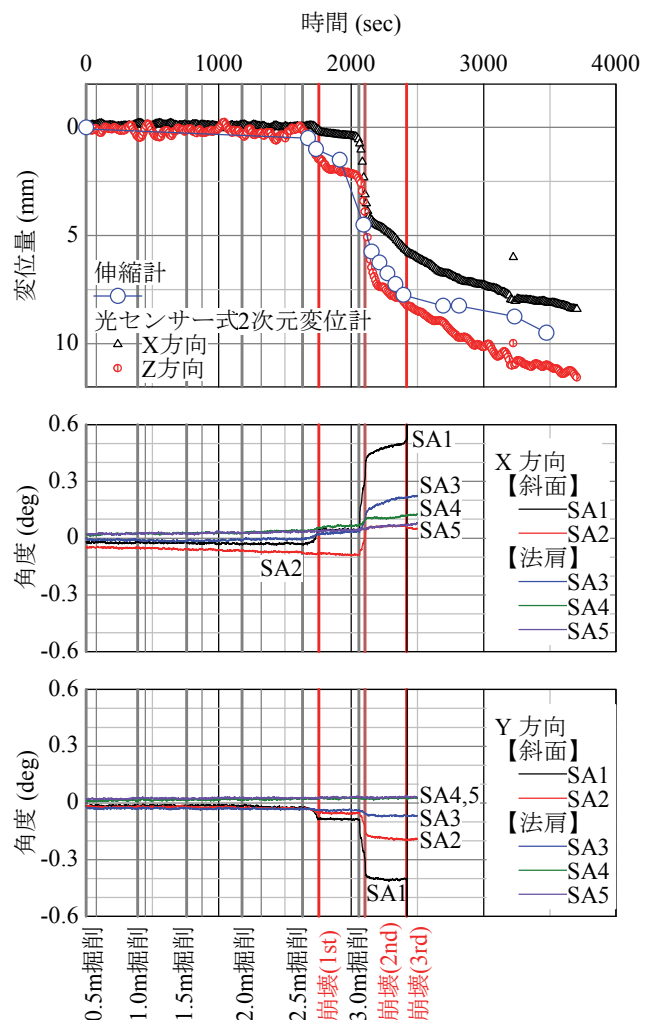


図-15 成田砂地盤 (緩) の各種計測器の時刻歴変化

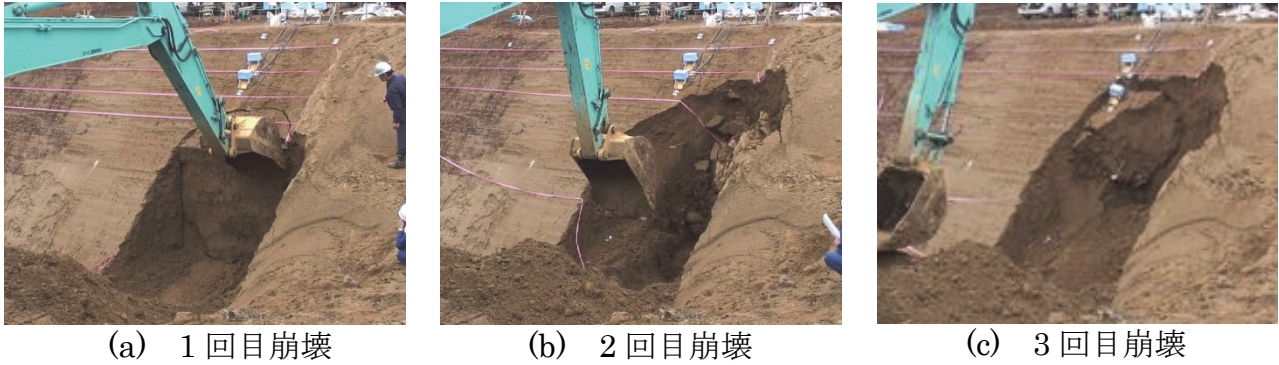


図-16 成田砂地盤（緩）の崩壊状況

ス方向となった。これは、X 方向は、傾斜計が前側に倒れこむ状況を、Y 方向は、傾斜計が斜面右側に倒れる挙動を示しており、斜面右側が先に崩壊している各崩壊状況(図-16)と一致する。崩壊前には傾きが増加傾向となっているが、設置場所によっては変動が見られない場合もあった。特に、斜面内にて部分的に崩壊した 1 回目の崩壊では、反応は SA1 のみであり、局所的な崩壊での崩壊予測の困難さを示していると言える。

② 成田砂地盤（密）

成田砂地盤（密）の伸縮計と光センサー式 2 次元変位計の変位および、X・Y 方向の傾斜角度の計測結果を図-17 に示す。また、各崩壊時の挙動を図-18 に示す。切取り高さ 2.5m 掘削中に全ての計測器が変動し、放置期間時間中に法面内から部分的な崩壊に至った(図-18(a))。このとき、変位計は掘削中に約 3.0mm の変形が生じ、放置時間中にさらに 1.0mm～2.0mm 変形した。傾斜計では、掘削中に SA1, SA3, SA4 が加速度的な増加傾向を示し、放置時間中に SA1 と SA3 が増加し続け、SA4 は一定勾配となった。なお、部分的な崩壊の際、SA1 の固定ピンが崩壊面に含まれてしまい、約 0.2 度急激に増加した。掘削をさらに

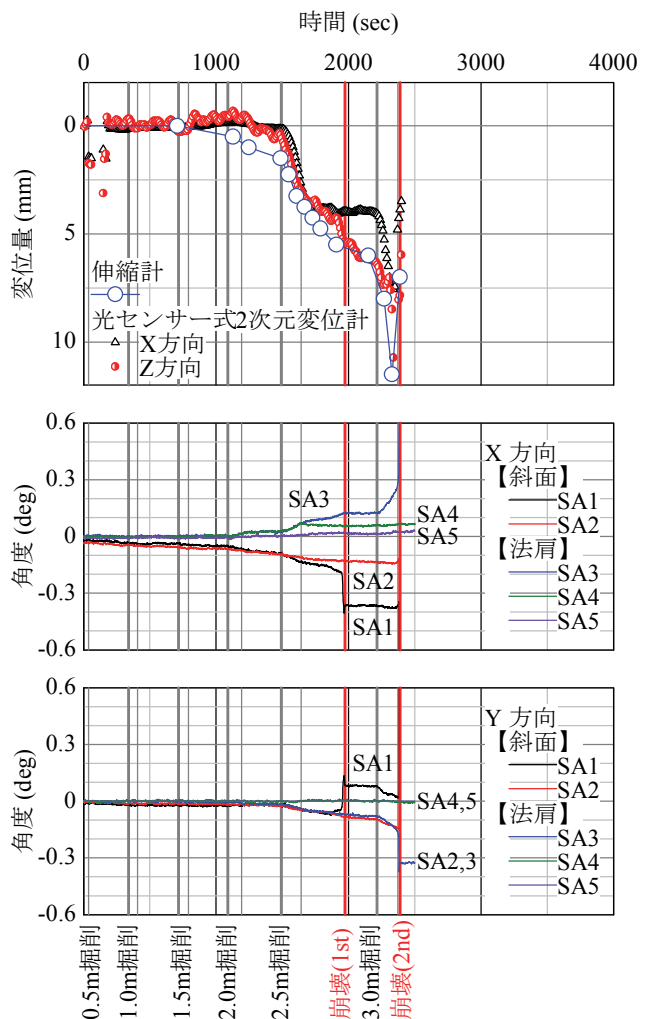


図-17 成田砂地盤（密）の各種計測器の時刻歴変化

掘削をさらに



(a) 1 回目崩壊



(b) 2 回目崩壊（連続的に法肩まで崩壊）

図-18 成田砂地盤（密）の崩壊状況

切取り高さ 3.0m まで行ったところ、掘削終了直後に天端を含めた大規模な崩壊が発生した（図-18(b)）。成田砂地盤（密）の X 方向の傾斜角度は、成田砂地盤（緩）とは異なり、斜面上に設置した 2 つの傾斜計はマイナス方向、法肩上に設置した 3 つの傾斜計はプラス方向に変動した。2 回目の崩壊（図-18(b)）では、法肩に設置されている SA3 が加速度的な増加傾向を示して崩壊に至った。この SA3 は崩壊土塊との境界近傍に設置されており、崩壊面近傍に設置することで崩壊を予測することが出来ることが分かる。一方、斜面上に設置された傾斜計 SA2 では緩慢な角度増加が見られたが、崩壊直前の徴候を把握できなかった。成田砂地盤（密）のように土塊となって崩壊するタイプの地盤では、傾斜計を崩壊土塊上に設置すると崩壊直前の前兆現象を把握しづらいと言える。



(a) 上部斜面の崩壊状況



(b) 満砂になった治山堰堤

図-19 治山堰堤築造工事（工事前）

3.2 治山堰堤築造工事に伴う裾部切取り工事現場への設置・計測事例^{13)~14)}

(1) 計測箇所の概要

今回計測を行った箇所は、高知県早明浦地区小北川復旧治山工事（翌償）現場の治山堰堤築造工事に伴う袖部切土掘削箇所の上部斜面である。当該箇所は、平成 19 年頃の台風により治山堰堤上部の斜面が崩壊したもので、平成 20 年に、その崩壊土砂によって堰堤の上流側が満砂となったこと

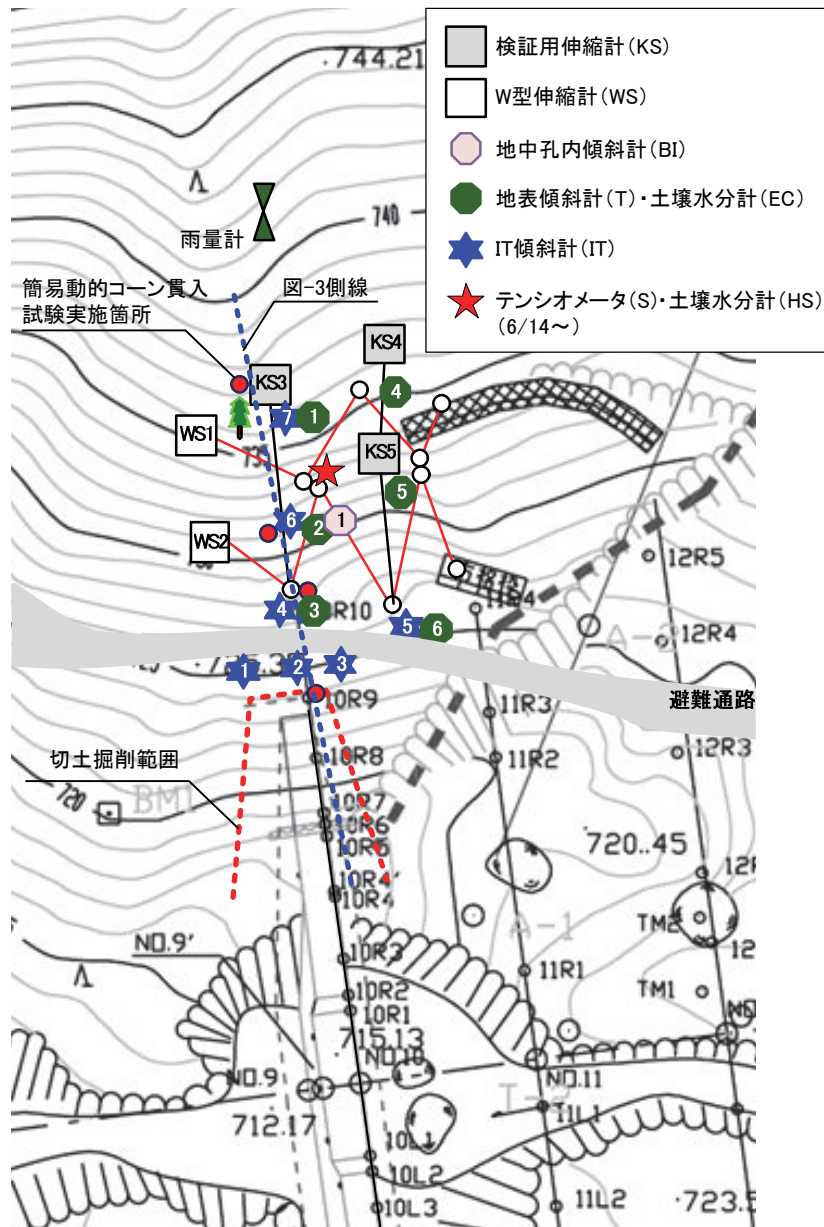


図-20 計測機器の配置図

が確認されている（図-19）。当該工事は、治山堰堤の機能を回復するための堰堤の嵩上げ工事として林野庁四国森林管理局が発注したものである。工事箇所の平面図を図 20 に示す。工事前に堰堤の測線方向（図 20 の青点線）について、簡易動的コーン貫入試験を実施して表層厚さを把握した。計測結果を図 21 に示す。斜面上部では 1.5m 程度、切土掘削箇所周辺では 0.5m 程度の表層地盤があることが分かった。

今回設置した計測機器の配置図を図 20 に示す。堰堤袖部の切土掘削範囲の上部斜面に 6 種類の計測機器を設置した。そのうち、雨量計（オサシ・テクノス製 転倒ます型雨量発信器 RS-1）、伸縮計（オサシ・テクノス製 グラフ付伸縮計 SLG-30）は地すべり観測などによって従前から斜面上に設置されているタイプの計測機器であり、伸縮計については、

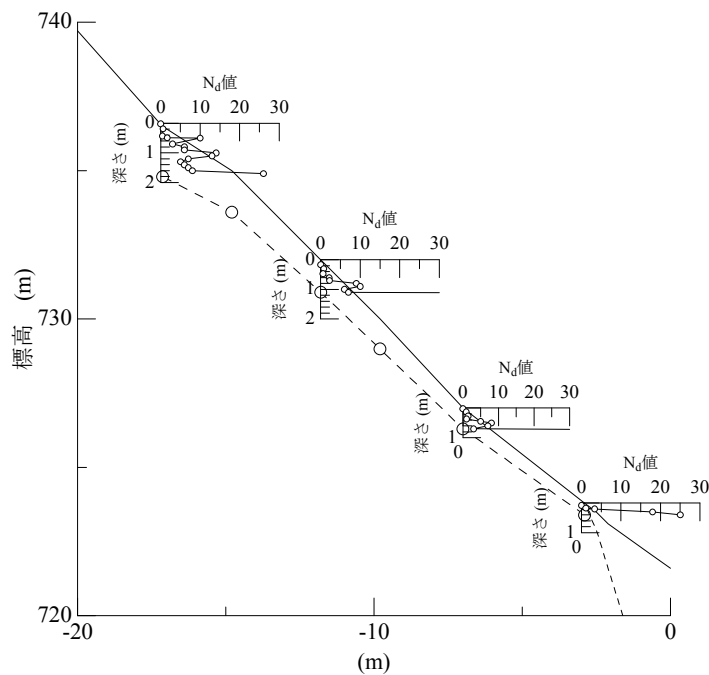


図-21 測線部の動的コーン貫入試験結果

他の計測機器の検証用として3箇所を設置した。その他、切土掘削工事中の斜面変動検知用の計測機器として設置した4種類の計測機器の詳細について以下に示す。

① IT 傾斜計 (図-22)

半導体加速度センサーを使用した傾斜計で、地中に埋設設置することにより1/100度の分解能で計測が可能である。0.5m程度打ち込んだ単管パイプにセンサーをセットして上から土のう袋を載せて設置する(図-22(c))。センサーは7ユニットを図-20の位置に設置した。ユニットは数珠つなぎで接続することができるCAN通信によりデータロガーへ保存される。また今回の計測では、計測精度を確保するために省電力化については検討せずソーラーパネル(図-22(d))を設置して常時電源供給を行った。

② W型伸縮計(図-23)

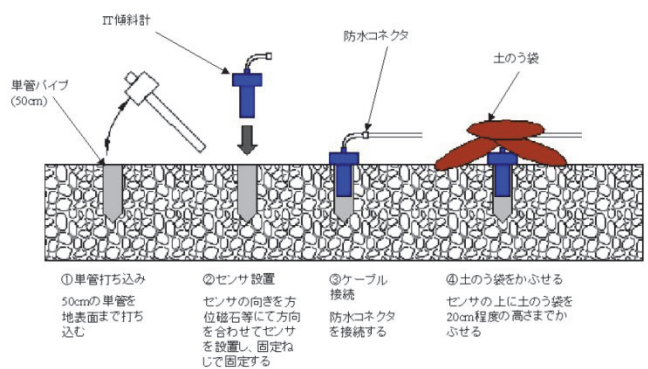
通常の伸縮計はインバー線設置区間のみの線データとなり、設置箇所以外が変形した場合に検知できない。規模が小さな切土掘削工事現場では局所的な崩壊が発生することが懸念される、面的な変動をまず把握することが労働災害防止につながる。W型伸縮計は、1台の伸縮計で複数の移動杭に滑車を介して一筆書きで連結することで、どこが動いたか特定は出来ないが、少数の伸縮計で面的監視を可能とするものである(図-23)。この概念は加藤らによって検討がされており、光ファイバー計測による斜面変状監視¹⁹⁾や伸縮計による擁壁の微小変位計測²⁰⁾が行われている。本現場では、オサシ・テクノス社製伸縮データ収録装置(NetLG-501)を使用し、張力を標準の1.8kgとした装置(WS-1)と3.0kgとした装置(WS-2)をそれぞれ設置した。なお、今回の現場では保護管による保護を行わなかった。



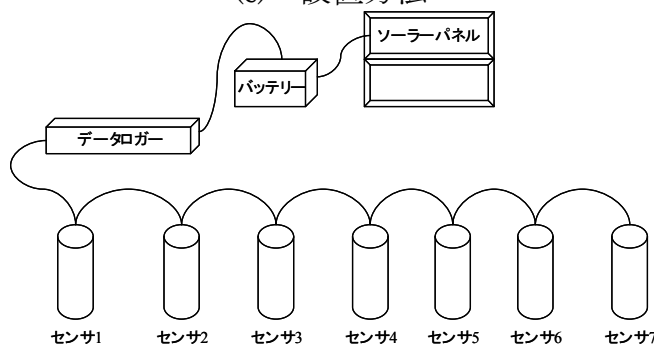
(a) IT 傾斜計 (左) と
打込パイプ (右)



(b) データロガーと
ロガーBOX

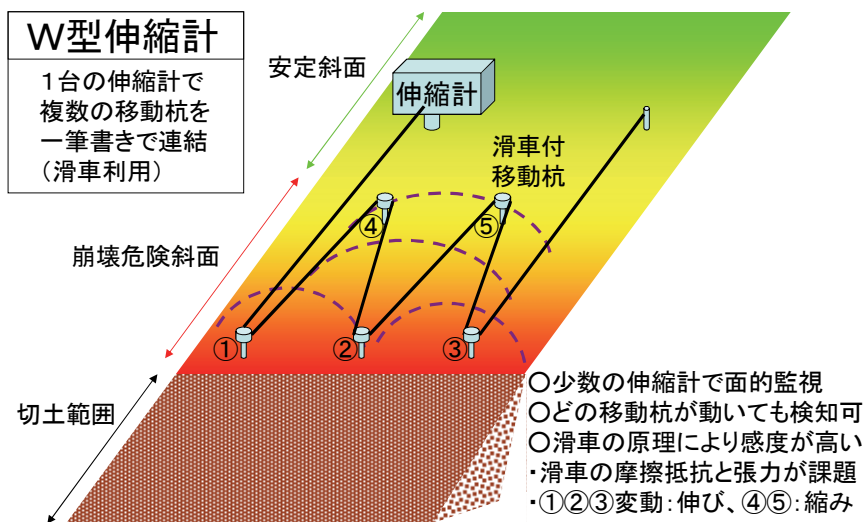


(c) 設置方法



(d) 計測器配線方法

図-22 IT 傾斜計



伸縮データ集録装置 NetLG-501



滑車付き移動杭

図-23 W 型伸縮計

③ 地表・地中孔内傾斜計 (図-24～25)

地表傾斜計は 2 軸 MEMS 技術を用いた傾斜センサーを使用し、ワイヤレス通信が可能な廉価な簡易崩壊検知センサーである。オプションで土壤水分計 (Decagon Devices 製 EC-5) も接続する事ができ、今回の現場では土壤水分計も設置した (図-24)。なお、No.1

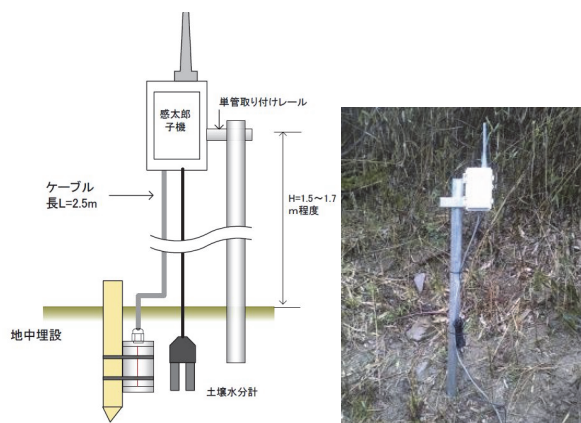


図-24 地表傾斜計 21)

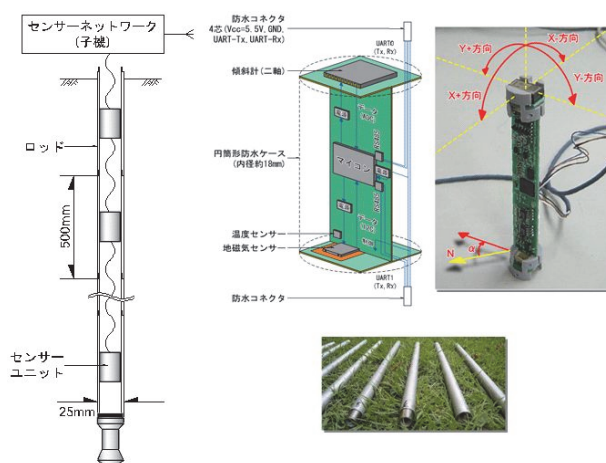


図-25 地中孔内傾斜計 22)

～3 の傾斜計は地中に埋設され親機へ配線されるタイプであり，No.4～6 は地表部に取り付けられた親機に傾斜センサーが内蔵されているタイプである．地中孔内傾斜計（図-25）は，動的コーン貫入試験と同じ要領で打ち込むだけで多段の傾斜を計測出来るシステムである．なお，これらのシステムの詳細については，話題提供（1）の資料や，文献 21)～22) が詳しい．

今回の計測箇所は，切土掘削範囲の上部斜面に避難通路が設けられていることと，作業の都合から切土掘削範囲周辺では計測機器の地上突出を避ける必要があった．そのため，切土掘削範囲近傍には，埋設型の IT 傾斜計 IT-1～3 のみを設置し，他の計測機器については，避難通路より上側斜面に設置した．

(2) 切土掘削作業中および降雨時の斜面変状

計測機器設置後，切土掘削作業は 2011 年 5 月 6 日，7 日，9 日の 3 日間において実施された．図-26 は切土掘削作業前後の様子を示したものである．当該箇所の切土掘削は 5 月 7 日に大部分が終了している．図-27～29 に各計測機器から得られた切土掘削作業前後（5 月 1 日～15 日）の挙動を示す．ここで，図-27，図-29 の全てに従来型の計測機器である雨量計と伸縮計の結果を示した．切土掘削作業期間には，5 月 7 日 0:00～7:00 にかけて時間雨量 0.5mm 程度の弱雨が降っている．また，切土掘削後 5 月 10 日～13 日にかけて最大 6.5mm/h の雨が観測されている．伸縮計（KS3～KS5）のデータをみると，切土掘削作業期間には，KS3 が微小ではあるが変化している．なお，5 月 9 日に生じた KS3 と KS4 の変化は，計測機器のメンテナンスのために構内に立ち入った際に接触したためである．以下，切土掘削作業の前後に変化が見られた IT 傾斜計と W 型伸縮計の計測結果について示す．



掘削前 (5/6 8:00)



掘削中 (5/7 8:00)



掘削後 (5/9 9:00)

図-26 切土前後の写真

① IT 傾斜計による計測結果

図-27 は IT 傾斜計の挙動を示したものである。避難通路より下側に設置した IT-1～3 は、5 月 7 日 11:00 前後と 17:00 前後に最大 0.1 度程度の角度変化が計測された。計測箇所と傾斜計の x, y 軸の変化から切土掘削作業時の斜面変動を計測する事が出来たと思われる。その後は平衡状態を保ち切土掘削作業は終了した。図-28 は反応が見られた IT-1～3 の切土掘削期間前後の挙動を XY にて図示したものである。ここで、灰色点は切土掘削作業前後を、黒色箇所は切土掘削作業を実施した 5 月 6 日 8:00～5 月 9 日 17:00 までの傾斜計の変化をそれぞれ図示している。

掘削作業開始により IT-1 と IT-2 が斜面に向かって左方向である下流側に傾き、その後切土範囲側へ倒れるような挙動を示していることが分かる。これは、治山堰堤や砂防堰堤のように河川岸の斜面を切り取る際には、切土掘削の方向だけではなく従来からの地盤の堆積過程を踏まえて下流側への移動が起こることを示しているものと思われる。また、IT-3 については、微小な角度変化ではあるが、切土掘削範囲側へ倒れるような挙動を示している。

切土掘削範囲に対して避難通路より上側に設置した計測機器については、切土掘削作業中の有意な変化は計測されなかった。今回の切土掘削範囲は切取り高さは約 12m と比較的高いが幅は約 3m と狭いため、切土掘削による変状範囲が局所的であったことが一因として考えられる。なお、切土掘削作業終了後の 5 月 10 日 6:00 前後から IT-1～3 と IT-6 が変化している。これは、降雨による表層の変化を計測したものと思われる。

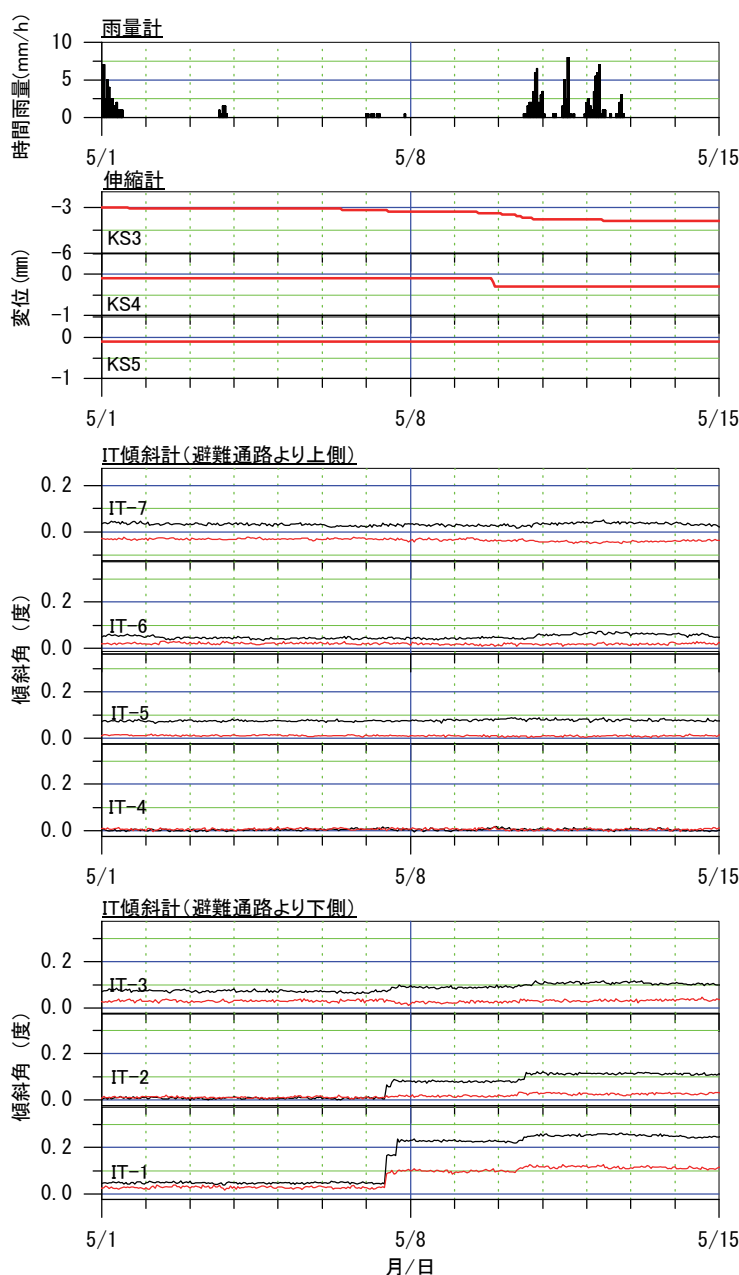


図-27 切土掘削作業前後（5/1～15）の挙動
（雨量計，伸縮計，IT 傾斜計）

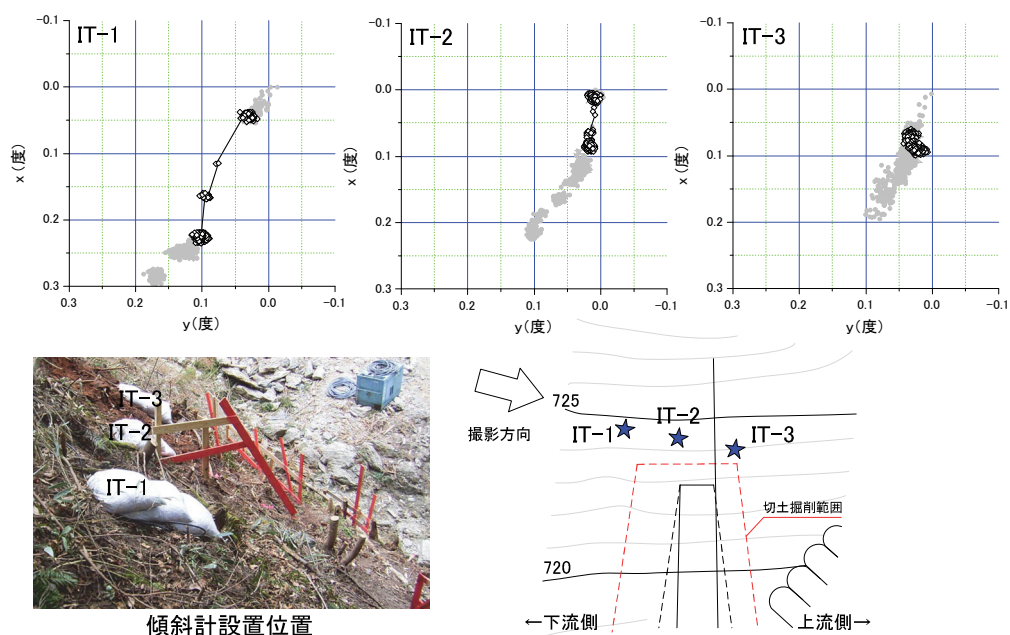


図-28 IT-1～3 の切土掘削期間前後の XY 挙動

② W 型伸縮計による計測結果

図-29 は W 型伸縮計の挙動を示したものである。W 型伸縮計では、切土掘削作業中の有意な変化は計測されなかった。これは、上述にも記載したが切取り幅が 3m と狭いため、切土掘削の影響範囲が局所的であり、W 型伸縮計を設置した避難通路より上側の斜面には切土掘削による影響が及ばなかったことを示している。また、5 月 9 日の WS2 の変化は前述したように計測機器のメンテナンスのために構内に立ち入った影響であるが、5 月 10 日の WS2 の変化は降雨による影響だと考えられる。

4 まとめ

本報告では、斜面崩壊による労働災害防止対策の変遷と動向を紹介した。そして切土掘削工事中の斜面崩壊による労働災害を防止するために実施している研究として、

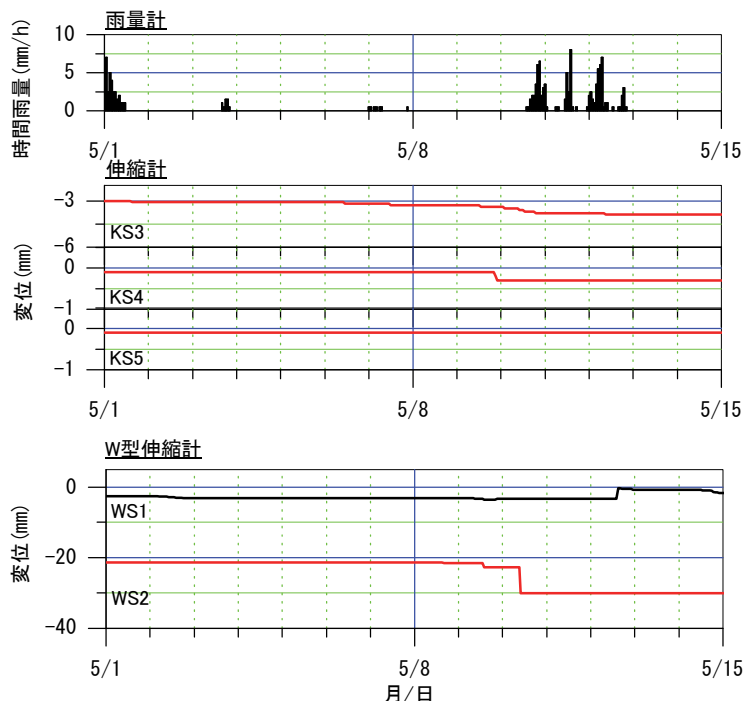


図-29 切土掘削作業前後（5/1～15）の挙動（雨量計，伸縮計，W 型伸縮計）

(1) 法尻部の切取り作業による実物大斜面崩壊実験と、(2) 実際の治山堰堤築造工事に伴う裾部切取り工事現場への設置・計測事例について紹介した。

(独) 労働安全衛生総合研究所がまとめた報告書にて提案された点検表は、施工現場だけではなく、設計・調査・計画段階から施工段階毎に的確に地盤リスクを判断することで、斜面崩壊による労働者の被災という危険の芽を早期に摘み取るようなハードとソフトを含めた包括的で新しい労働災害防止対策の動きであり、今後の発展・展開が期待される。また、点検表に基づき問題が発生した場合の対応方法やそもそも問題が顕在化しない為にも切土掘削工事現場での斜面の計測は重要となるものと言える。一方、労働災害が発生している現場が中小規模工事であることから、安価なセンサー開発はその普及にも影響をあたえられ、今後の発展が期待されるものである。

5 謝辞

本報の 3.1 では、東急建設(株) 近藤哲也氏、重村将氏、ジオデザイン(株) 中村和之氏、橋爪秀夫氏に多大なる御協力を頂きました。また、3.2 の現場設置・計測では、林野庁四国森林管理局嶺北森林管理署早明浦治山事業所並びに岡村組(有) の御協力のもと円滑に実施されました。ここに記して謝意を表します。また、本報 3.1 は大成基礎設計(株) (現、(株) アサノ大成基礎エンジニアリング)、曙ブレーキ工業(株)、3.2 は高知大学、曙ブレーキ工業(株)、国土防災技術(株)、東京大学、中央開発(株)、(株) オサシ・テクノスとの共同研究にて実施された成果であり、関係した皆様に感謝の意を表します。

6 参考文献

- 1) 例えば、建設業災害防止協会：平成 24 年度版建設業安全衛生年鑑，建設業災害防止協会，205p，2012.
- 2) 伊藤ら：建設工事中の斜面崩壊による労働災害の調査・分析，日本地すべり学会誌，Vol. 41, No. 6, pp. 17-26, 2005.
- 3) 伊藤ら：2. 切土掘削工事現場における斜面崩壊による労働災害の調査・分析，労働安全衛生総合研究所特別研究報告，JNIOSSH-SRR-No. 35, pp. 7- 18, 2007.
<http://www.jniosh.go.jp/publication/SRR/pdf/SRR-No35-02.pdf>
- 4) Terzaghi, K. and Peck, R. B. : Soil Mechanics in Engineering Practice, John Willy & Sons, Inc., 1969.
- 5) 切土法面の調査・設計から施工まで編集委員会編：地盤工学・実務シリーズ 5 切土法面の調査・設計から施工まで，476p，1998.
- 6) 地盤技術者のための情報化設計・施工入門編集委員会編：入門シリーズ 26 地盤技術者のための情報化設計・施工入門，162p，2000.

- 7) 前ら：切取り工事における土砂岩石崩壊による死亡災害の分析，産業安全研究所（現，労働安全衛生総合研究所） 技術資料，RIIS-TN-78-1，19p，1978
<http://www.jniosh.go.jp/publication/TN/pdf/TN-78-1.pdf>
- 8) 建設業労働災害防止協会：切取工事の安全，191p，1979.
- 9) （社）土質工学会（現，公益社団法人地盤工学会）：掘削工事の安全技術に関する調査研究報告書（労働省委託），1986.
- 10) （独）労働安全衛生総合研究所 斜面崩壊による労働災害の防止対策に関する調査研究会（2010）：「斜面崩壊による労働災害の防止対策に関する調査研究会」報告書，
http://www.jniosh.go.jp/results/2010/0407/pdf/report_slope_201004_2.pdf
- 11) 伊藤ら：レーザーと光センサーを利用した 2 次元変位計測システムの開発と切土斜面の動態観測への適用，土木学会論文集 C，Vol. 63，No. 2，pp. 502-515，2007.
- 12) 伊藤，豊澤：斜面下部の掘削切取りによる斜面不安定性に関する実物大斜面崩壊実験，土木学会論文集 C，Vol. 65，No. 1，pp. 254-265，2009.
- 13) 伊藤ら：施工中の斜面崩壊による労働災害防止のためのモニタリングに関する実地観測，第 61 回（平成 24 年度）砂防学会研究発表会概要集，pp.472-473，2012.
- 14) 伊藤ら：施工中の斜面崩壊による労働災害防止のためのモニタリングに関する実地観測，労働安全衛生総合研究所特別研究報告 JNIOSSH-SRR-NO.42，pp.35-40，2012.
<http://www.jniosh.go.jp/publication/SRR/pdf/No42/SRR-No42-1-4.pdf>
- 15) 玉手ら：表層ひずみ計測による施工時斜面の崩壊監視に関する実験的研究，土木学会論文集 C，Vol. 65，No. 1，pp. 1-18，2009.
- 16) 玉手ら：斜面の浅い部分のせん断ひずみ計測による崩壊監視の提案，労働安全衛生総合研究所特別研究報告 JNIOSSH-SRR-NO.42，pp.25-33，2012.
<http://www.jniosh.go.jp/publication/SRR/pdf/No42/SRR-No42-1-3.pdf>
- 17) 国見ら：車両運動制御用高性能加速度センサの開発，自動車技術，Vol.55，No.10，pp. 48-53，2001.
- 18) 豊澤ら：半導体加速度センサーを利用した高精度傾斜計による斜面崩壊予知の検討，労働安全衛生研究，Vol. 1，No. 2，pp. 103-110，2008.
- 19) 加藤ら：滑車機構を用いた斜面の多点変状計測技術の開発，第 64 回土木学会年次学術講演会講演概要集，（社）土木学会，2009.9
- 20) 加藤ら：滑車機構を用いた変状計測技術の開発，第 65 回土木学会年次学術講演会講演概要集，（社）土木学会，2009.9
- 21) 瀬古ら：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，第 58 回（平成 21 年度）砂防学会研究発表会概要集，O4-09，2009
- 22) 王ら：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，第 59 回（平成 22 年度）砂防学会研究発表会概要集，O2-13，2010

《話題提供》

地上設置型合成開口レーダによる斜面変動監視

応用地質株式会社 水野 敏実

1 はじめに

平成16年中越地震や平成23年台風12号と15号による紀伊山地における大規模災害により、多数の地すべりおよび斜面崩壊が発生し、天然ダムを形成した。また、2008年6月14日に発生した平成20年岩手・宮城内陸地震では荒砥沢で大規模な地すべりが発生した。これらの危険性の高い崩壊後の斜面や天然ダムの観測は重要な課題¹⁾となった。

大規模深層崩壊や地すべりは二次災害のリスクが高く、崩壊箇所の変動観測は安全な場所から広範囲に精度の高い観測が望まれる。地上設置型合成開口レーダ（以下GBInSAR）は、マイクロ波を掃射する能動センサを使用し、その観測距離は2km以上であり、1mm以下の高精度で、24時間の観測が可能である。崩壊箇所や危険箇所にセンサなどの取付けを必要とせず、安全な場所から崩壊エリア全体を高精度で24時間観測が可能なGBInSARは、“安価なセンサ”であると言える。また、各ポイントに配置された傾斜計や伸縮計が捉えきれない微小な変形から崩壊に至る斜面全体の変動を観測することで、斜面変動メカニズムの解明や崩壊基準に関する検討を進展させるものと考えている。

2 GBInSAR の概要

ここで紹介する GBInSAR(Ground Based Interferometry Synthetic Aperture Radar)は、EC(European Commission)のイタリア・イスプラにある総合研究所(Joint Research Centre The Institute for the Protection and Security of the Citizen; JRC-IPSC)で開発された LiSA²⁾ (Linear SAR) をベースに、JRC スピンオフカンパニーの LiSALab が開発したシステムである。このほかに類似のシステムが国内外で使用されている³⁾。



写真-2.1 地上設置型合成開口レーダ

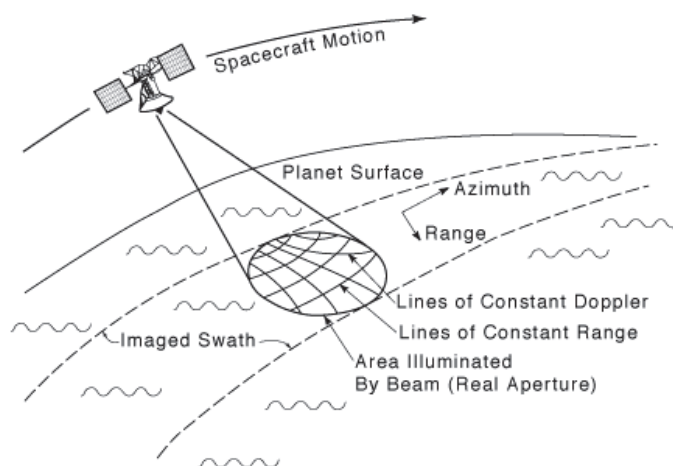
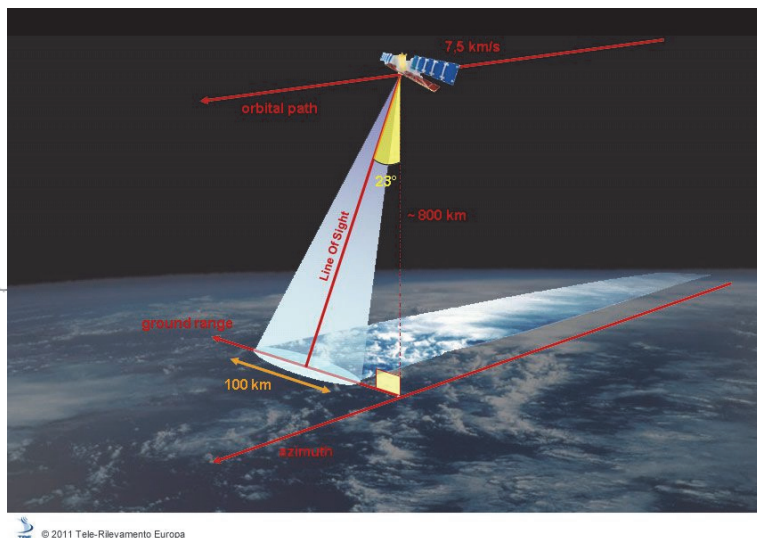
a)合成開口レーダの画像取得特性⁴⁾b)ENNVI SAT の幾何学特性⁵⁾

図-2.1 合成開口レーダの動作原理

2. 1 計測原理

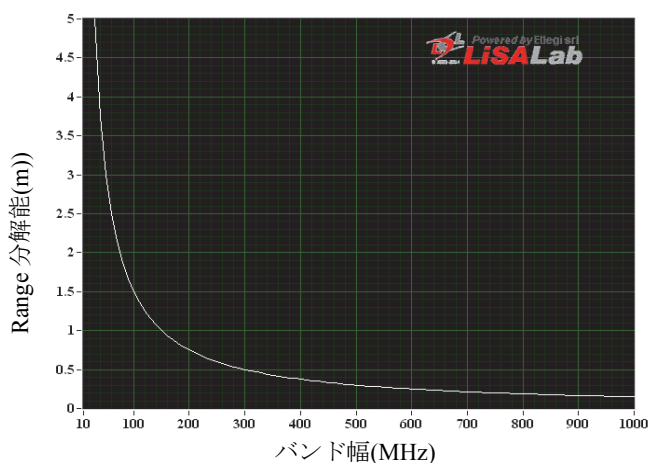
(1) 合成開口レーダ(Synthetic Aperture Radar; SAR)

合成開口レーダの技術は、アポロ計画時代から開発され、1978年には、米国で SEASAT が打ち上げられ、民間利用可能な情報を提供し、SAR 画像の信号処理技術が発展した。

合成開口レーダは、宇宙空間で高速移動する人工衛星から電波を発信し、反射を移動した位置で受信することにより、衛星軌道方向(Azimuth direction)の仮想の合成開口長を大きくすることで地上解像度を向上させることができる。レンジ方向では、バンド幅や送信するパルス波の頻度を上げることで、解像度をコントロールできる。

地上設置型合成開口レーダでは、写真-2.1 に示すように人工衛星の軌道に当たる部分をリニアポジショナ（開口長）上を移動させることにより実現している。観測ヘッド上に送受信アンテナを装備し、電波の送受信を繰り返しながら移動することで、観測対象範囲の画像を取得するシステムである。

GBInSAR の Range 方向の分解能は図-2.2⁶⁾に示すようにバンド幅が広がれば細くなる。Azimuth 方向の分解能は、このポジショナ長さと電波の周波数によって選択が可能である。図

図-2.2 Range 解像度と周波数帯⁶⁾

-2.3⁶⁾は Azimuth 方向の解像度に関する周波数帯との関係を示している。Azimuth 方向の解像度は開口長（ポジショナ長さ）と周波数帯に依存する。

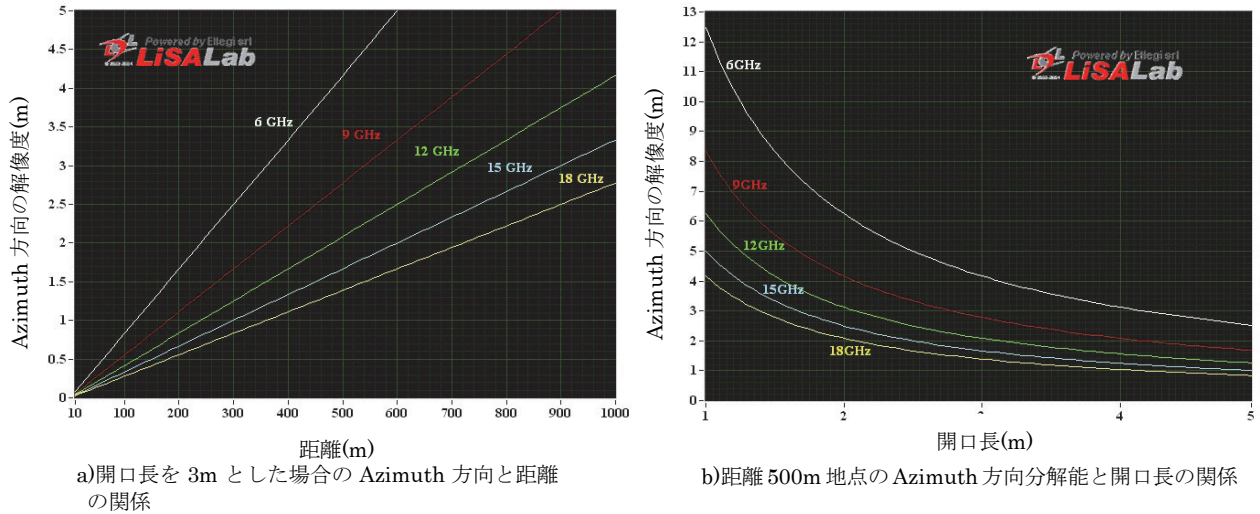


図-2.3 周波数帯ごとの Azimuth 方向の解像度⁶⁾

下記に、標準的な LiSA の測定諸言を示す。観測可能な理論的なセル数は、 $1,001 \times 1,001$ セルである。

- 中心周波数: 17,05 GHz

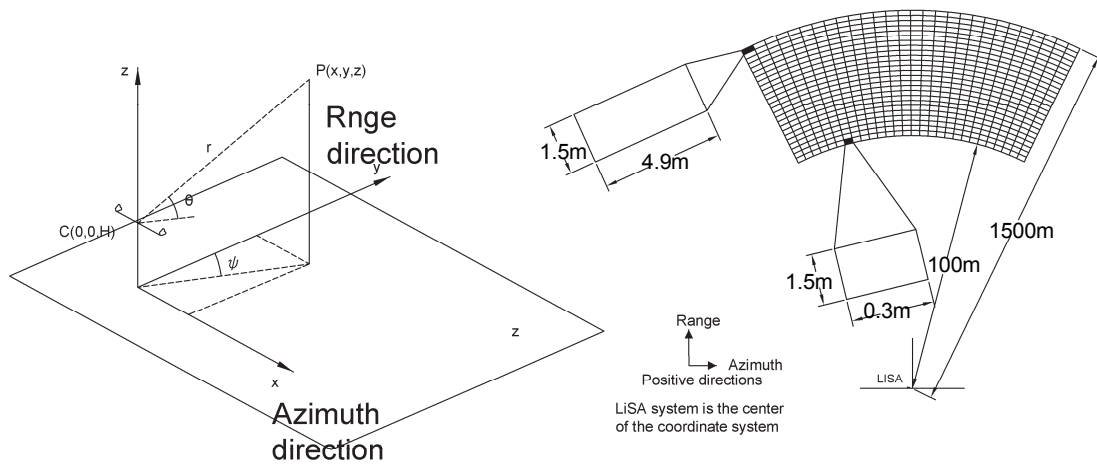


図-2.4 LiSA 測定解像度設定例⁶⁾

- バンド幅: 100 MHz
- 開口長（ポジショナ長さ）: 2.7m
- 最小測定距離: 100m
- 最大測定距離: 1500m
- Range 方向理論解像度（一定）: ~ 1.5m
- Azimuth 方向理論解像度(100m 地点): ~ 0.3m
- Azimuth 方向理論解像度(800m 地点): ~ 2.6m
- Azimuth 方向理論解像度(1500m 地点): ~ 4.9m

（２）干渉 SAR(Interferometry SAR)

同一地点において、多くの異なった時期に SAR データが観測されていると、これらを活用することで長期間の多点の情報が得られ、広域・高密度・高精度の地盤変動履歴の推定が可能となる。人工衛星の画像を使用して、セルごとの残留位相を求める手法を Permanent scatterers in SAR interferometry (PSInSARTM)という⁷⁾。これは 20 回以上同一地点で観測されたデータが存在する地点において、異なった時期に観測されたすべての SAR 画像に対して、画像上のすべてのセルのデータを使用するのではなく、反射の強度(Amplitude)と正弦波の相関性(Coherence)の良いセルのデータのみを使用する手法である。

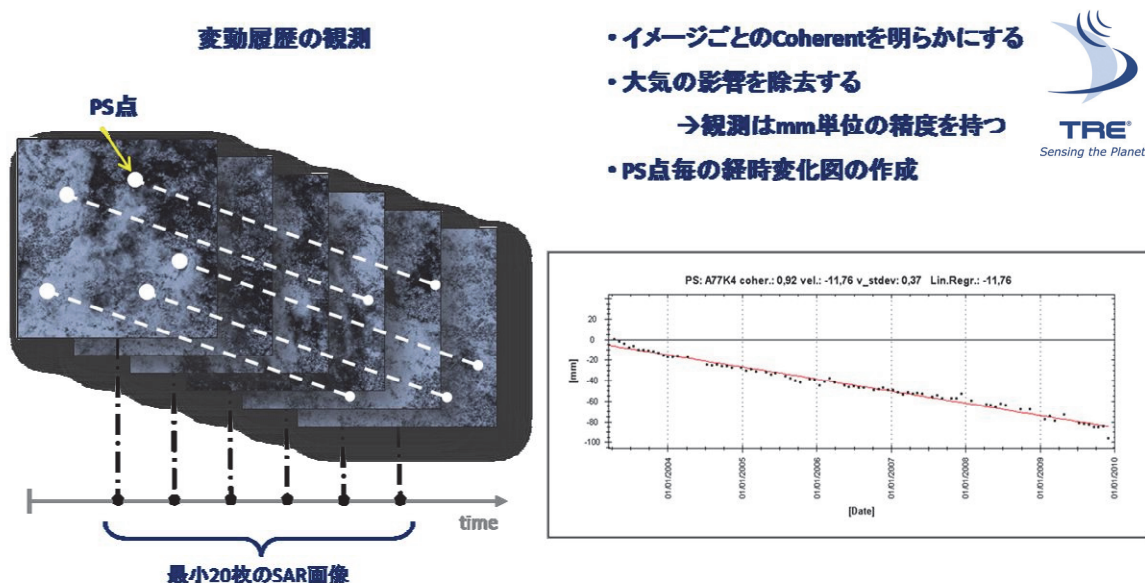


図-2.5 PSInSARTM のデータ集積処理イメージ⁸⁾

常に良好な反射をする場所は、GBInSAR の場合、人口構造物や植生の少ない露頭などであり、使用する全ての画像で良好な反射を生み出す点であることから恒久散乱点(Permanent Scatterers)と呼ばれる。この PS のわずかな位相差を求めることにより、mm 単位の精度を有する地表面変動の推定が可能となる。

一般に、干渉 SAR の画像間の位相には地形、大気、ノイズなどの位相が含まれ、画像ごとに条件が異なる。ある画像の位相は下式⁹⁾で示される。

$$\Delta \phi = \Delta \phi_{flat} + \Delta \phi_{topo} + \Delta \phi_{dis} + \Delta \phi_{atm} + \Delta \phi_{noise}$$

ここに、

$\Delta \phi$: 干渉 SAR による位相差

$\Delta \phi_{flat}$: 軌道による誤差

$\Delta \phi_{topo}$; 地形による反射の時間差による誤差

$\Delta \phi_{dis}$; 観測対象域の地表面変動による位相差

$\Delta \phi_{noise}$: 大気中のノイズ(Turbulence)による誤差

である。

GBInSAR では、正確な軌道上(Baseline Zero)で取得された画像であるため、ベースラインや地形に関する誤差は除去される。大気圏などのようなノイズがないことを考慮知れば、残留位相は、地表面変動と大気による位相誤差で構成される。

大気の影響を補正するフィルター(Atmospheric Phase Screen; APS)は、SAR 衛星により取得された画像の補正方法として確立された概念および補正手法である (図-2.6)。

GBInSAR における APS は各社が開発を進めており、そのシステムに応じて性能は異なる。LiSA では JRC における基礎実験や SAR 画像の補正アルゴリズムなどにより開発された APS を、多くの観測の経験を踏まえて独自に開発している。GBInSAR における干渉 SAR は、初期値と任意の時点の画像を使用して、大気補正を行った上で、変動量が算出される (図-2.7)。

特に 3km 以上の長距離観測では APS は重要な補正項目である。

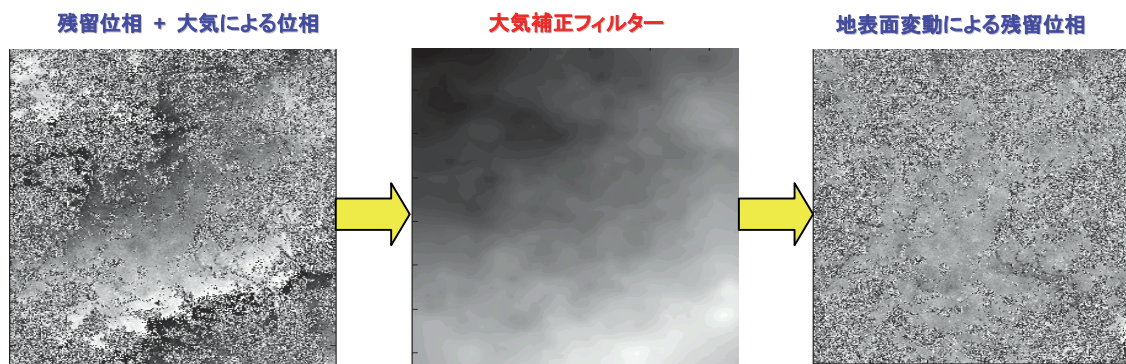


図-2.6 大気補正の影響を除去するモデル概念図 ¹⁰⁾

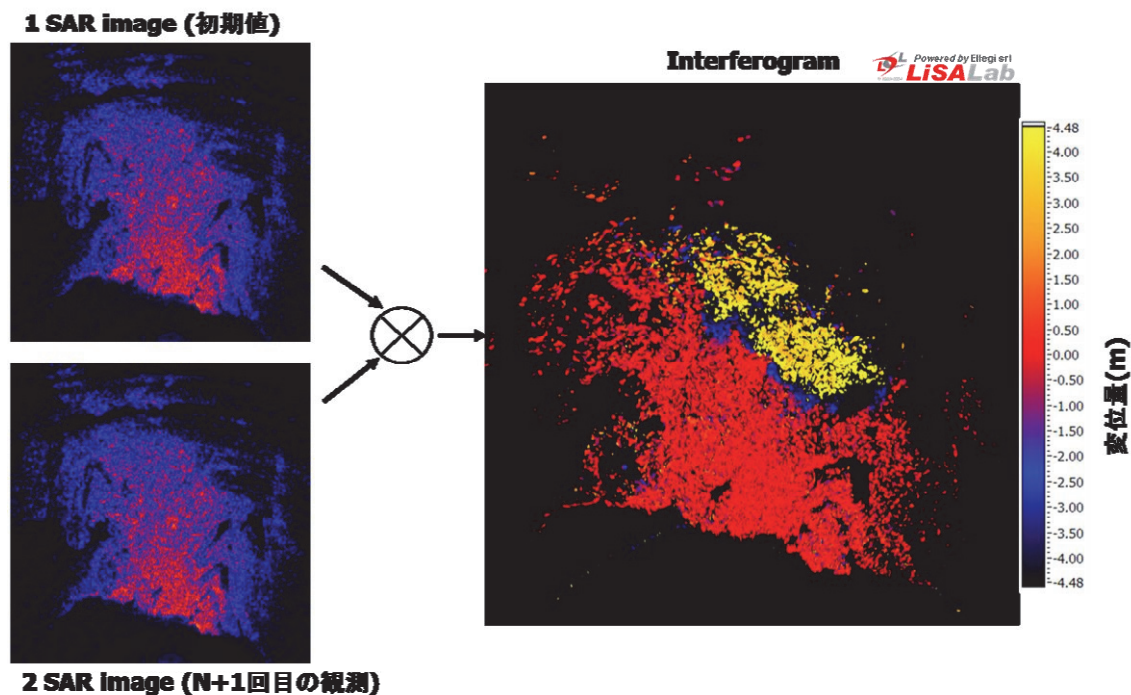


図-2.7 異なる時間取得された SAR 画像の干渉処理概念図 ⁶⁾
(左 ; パワー画像、右 ; 干渉 SAR 結果)

2. 2 GBInSAR (LiSA)システム

(1) 電波掃射(Line Of Sight; LOS)方向の変動観測

マイクロ波を送信・受信することで、一回目に受信されたマイクロ波の波形を取得する。

二回目の観測で、対象に変動が生じた場合、

図-2.8 に示すように、掃射したマイクロ波

(正弦波) のピークが ΔR だけずれて到達

する。このわずかな差(残留位相差)を検

出することで、変動量を求める。約 2cm の

波形(X バンド相当)の場合、 40° の位相差で

約 1mm の変動量に相当する。これにより

GBInSAR の観測は 0.3~0.7mm の高精度を

実現している。この位相は LOS 方向で求

められるものである。残留位相と変位の関係を下記に示す。

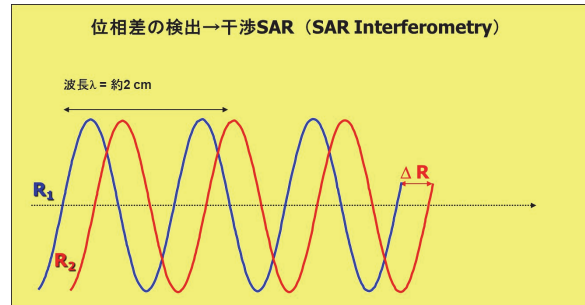


図-2.8 干渉 SAR の変動抽出概念図

$$\Delta \phi_s = 4\pi \Delta R / \lambda$$

ここに、 $\Delta \phi_s$; 残留位相差、 λ ; マイクロ波波長(GBInSAR は 17GHz 帯、Ku バンド使用(波長 8.86mm))、 ΔR ; 変位量である。

(2) 連続干渉解析

1 回の観測は、約 8 分であり、この間に、あるいは任意の画像を選定した場合に、Ku バンドの波長を超える変動が生じた場合、それを干渉 SAR の解析のみでは感知できない。通常は phase wraps といわれる方法で観測は可能であるが、変位速度の速い観測の場合、phase unwrapping(重畳されている位相を展開する)を必要とする場合がある。右図は、phase unwrapping 実施した例である。変動表示を Ku バンドの波長に合わせることで、干渉解析時の位相の読取りの容易にしている。

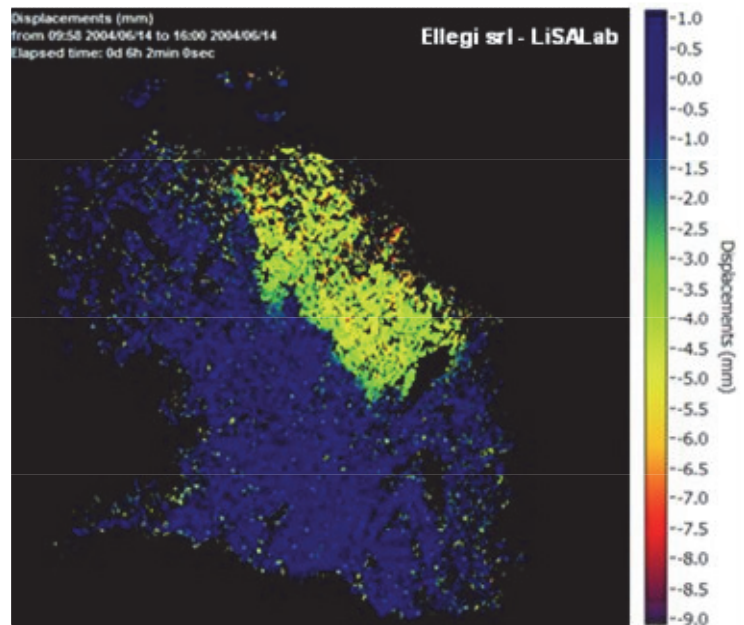


図-2.9 アンラッピングによる変動量解析事例⁶⁾

LiSA は、8 分間隔で位相処理までを行うシステムである、したがって、時間約 67mm の変動までは観測が可能である。累積変位量がどの程度かによるが、崩壊予測時間の判定には十分な観測能力であると考ええる。

(3) GBInSAR システム

現在の最新のシステム LiSAmobile09 は、ヘッド部とデータ記憶装置及び電源、並びにポジショナというシンプルな組合せで、Interfergram 処理までをデータ蓄積し、記憶装置に接続された LAN ケーブルにより、データ収集および遠隔操作が可能で、図-2.10 に示すような経時変化図や 3D イメージのデータ処理を任意の場所で行実施できる。

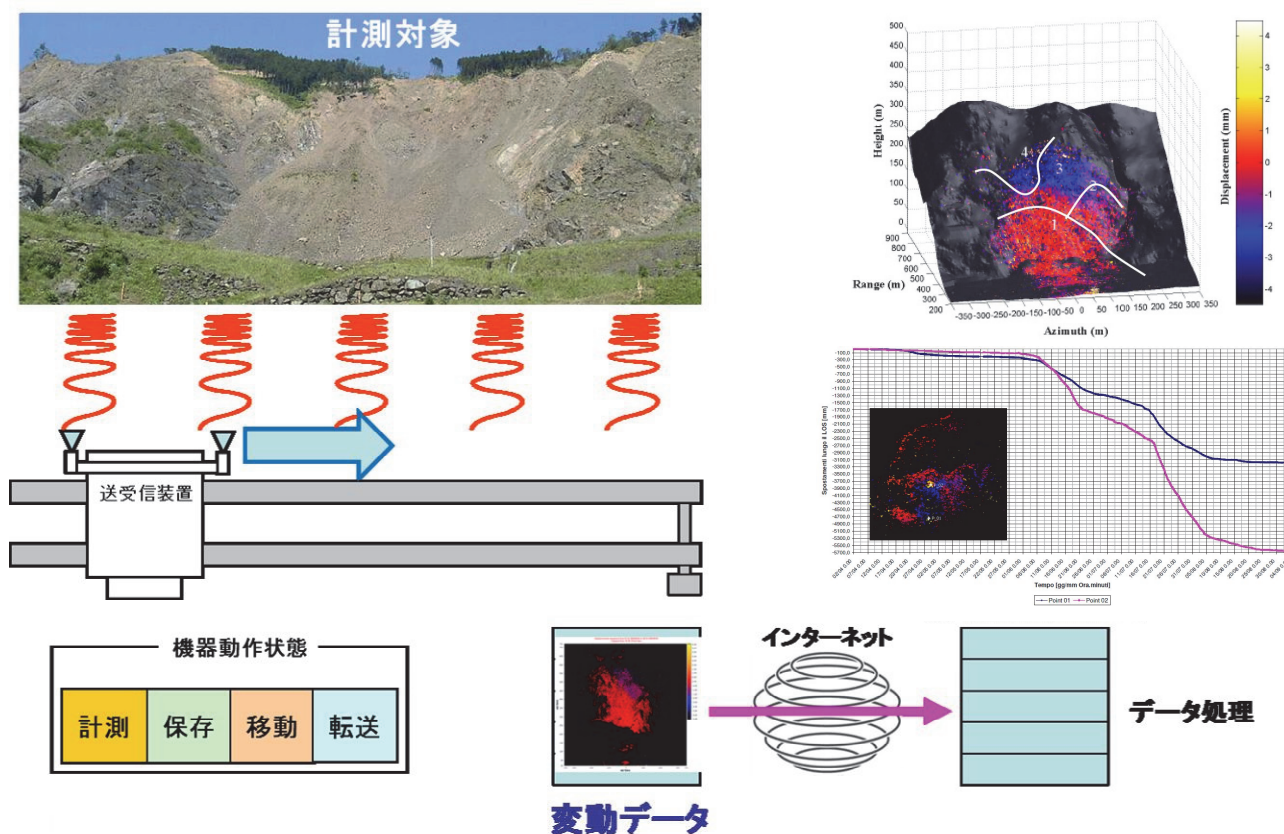


図-2.10 観測とデータ処理概要

機材の詳細な仕様を下記に示す。仮設として、現地に電話回線と家庭用電源が準備できれば、観測は可能である。

■ 機器仕様：

機器サイズと重量

電源ユニット：

600 x 300 x 400 mm

約30 Kg

観測ヘッド：

600 x 250 x 250 mm

約15 Kg

リニャポジショナ：

3500 x 300 x 300 mm

約43 Kg

三脚（オプション）：

1000 x 200 x 200 mm/1脚

約15 Kg/1脚

消費電力

最大 480W、通常120W

設置時間

約15分

環境条件（保管時）

－ 25 ～ ＋ 85℃

（動作時）

－ 10 ～ ＋ 60℃

3 観測事例

3. 1 鳥取県市瀬地区

(1) 概要¹¹⁾

平成16年9月29日午後8時36分頃台風21号の接近による豪雨の中、智頭町市瀬地区で地すべりによる大規模な土砂崩落が発生した。

崩落土量は約33万 m^3 と推定され、そのうち約4万3千 m^3 の土砂が高さ9mの護岸擁壁を破壊し、一級河川千代川に流入、天然ダムを形成した。

天然ダムによる千代川水位の上昇により、上流の市瀬集落では12戸の家屋や公民館、田畑が浸水したほか近接するJR 因美線も浸水、不通となるなど甚大な被害を受けた。

崩落した山は、旧久本採石場の跡地であり、平成14年1月25日に崩壊し、県がその対策工事を平成16年3月に完成させたばかりであった。まさに悪夢の出来事であった。（参考文献10 pp.1「第1章 土砂崩落の発生 1 平成16年9月29日の悪夢」より）

(2) GBInSAR による観測結果¹²⁾

a)観測状況

地すべり観測は、GBInSAR を地すべり斜面の対岸の下方、河川の護岸壁上部に設置し、斜め上方の地すべりへマイクロ波を掃射した。GBInSAR 設置位置は地すべり中央部に正対し、地すべり方向と GBInSAR の LOS がほぼ一致しており、地すべりの移動方向に対して良好な観測位置である。GBInSAR 設置箇所からの地すべり観測対象領域の距離は 200m～700m であった（写真-3.1）。



写真-3.1 LiSA の設置位置とサイト全景

斜面は過去に大規模な崩壊(平成14年1月25日)が発生し、岩盤が露出している。赤外線による連続撮影から、温度変化を測定し、図-3.1に示した。植生や露岩部、湧水点は温度変化が小さく、表層に崩壊堆積物が分布する地点では温度変化が大きい。地質は砂質片岩を主体とし、石英脈を挟む。過去の崩壊は石英脈とへき開を境界として崩壊が発生している。

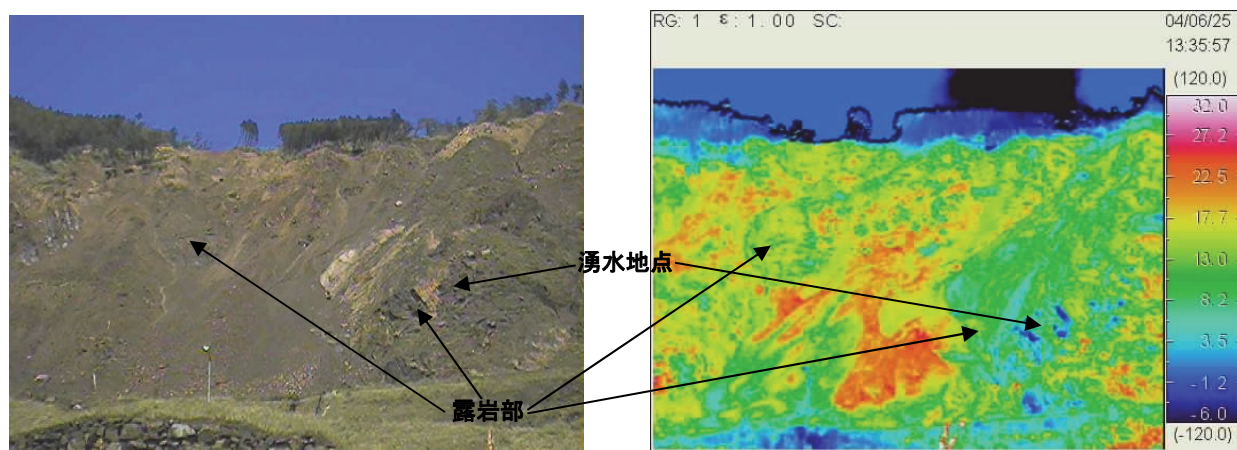


図-3.1 斜面の状況と赤外線画像

GBInSAR による観測は、2004 年 6 月に 3 週間実施した。まず無線局免許取得のための試験に引き続き、SAR パワー画像を用いて観測可能領域を確定した（図-3.2）。この結果、植生や前面の岩塊の死角となる箇所以外の GBInSAR 観測可能領域が明確になった。また、GBInSAR での観測は図-3.3 に示す解像度のピクセルを設定し、観測を行った。

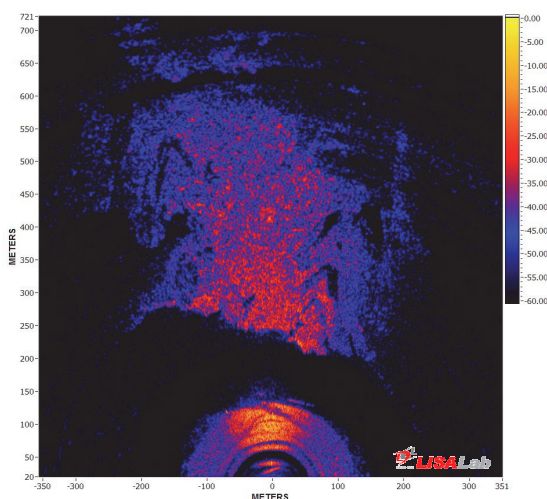


図-3.2 レーダーパワーイメージ

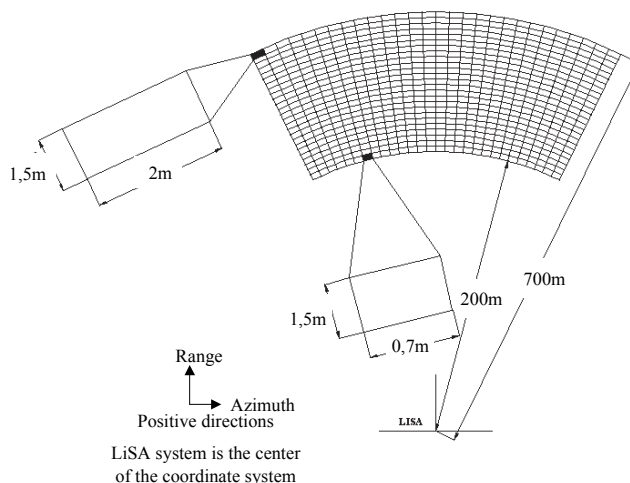


図-3.3 計測解像度設定

b)観測結果

計測は、電波送受信装置が軌道上を移動する 9 分間隔で実施し、48 時間連続計測 2 回を含めて約 2 週間行った。この間、濃霧や小雨等の気象条件もあったが、夜間を含めて計測を実施することができた。GBInSAR は高精度長距離測定の特徴の他、多少の気象条件や昼夜を問わず計測できるという連続観測を可能にする大きな特徴がある（写真-3.2 観測時の天候）。ちなみに写真中の霧や小雨の際にはレーザープロファイラーの測定はできなかった。

連続計測結果の一例を図-3.4 に示した。1 時間毎に、活動性の高い部分が変動していることが解る。この凡例は長さ 9mm で赤いゾーンから寒色系へ移行し、黄色の凡例上部に移って、更に赤に移行し、その変動量が 9mm となる。48 時間連続測定の結果、観測範囲内の特定の箇所に 48 時間で 40mm 程度の変動が生じている領域が明確になった（図-3.5）。



07th June 2004



08th June 2004



09th June 2004



10th June 2004



11th June 2004



12th June 2004



13th June 2004



14th June 2004



15th June 2004

写真-3.2 観測時の天候

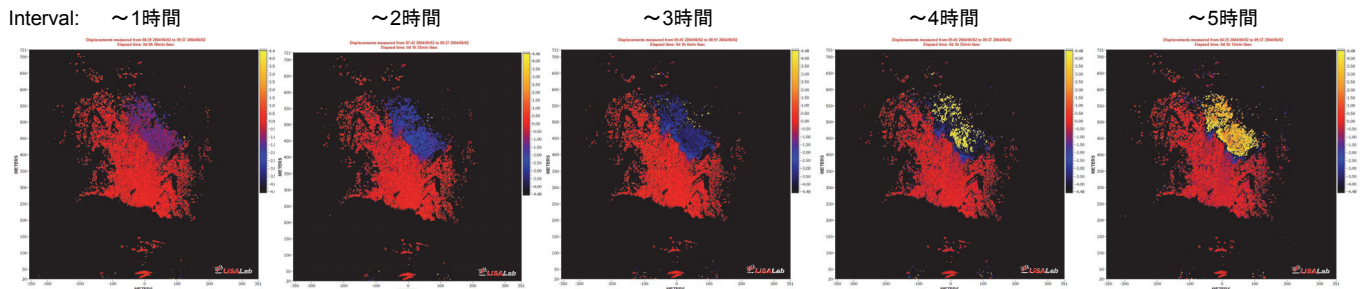


図-3.4 連続観測1時間毎の変動



図-3.5 地すべり変動領域区分

図-3.5 の高速移動領域内に側線を設定し、経時変化を取得した結果が図-3.6¹³⁾である。側線上部のレンジ距離 400m～475m が高速で移動している。この高速移動範囲の三次元分布を図-3.7 に示した。

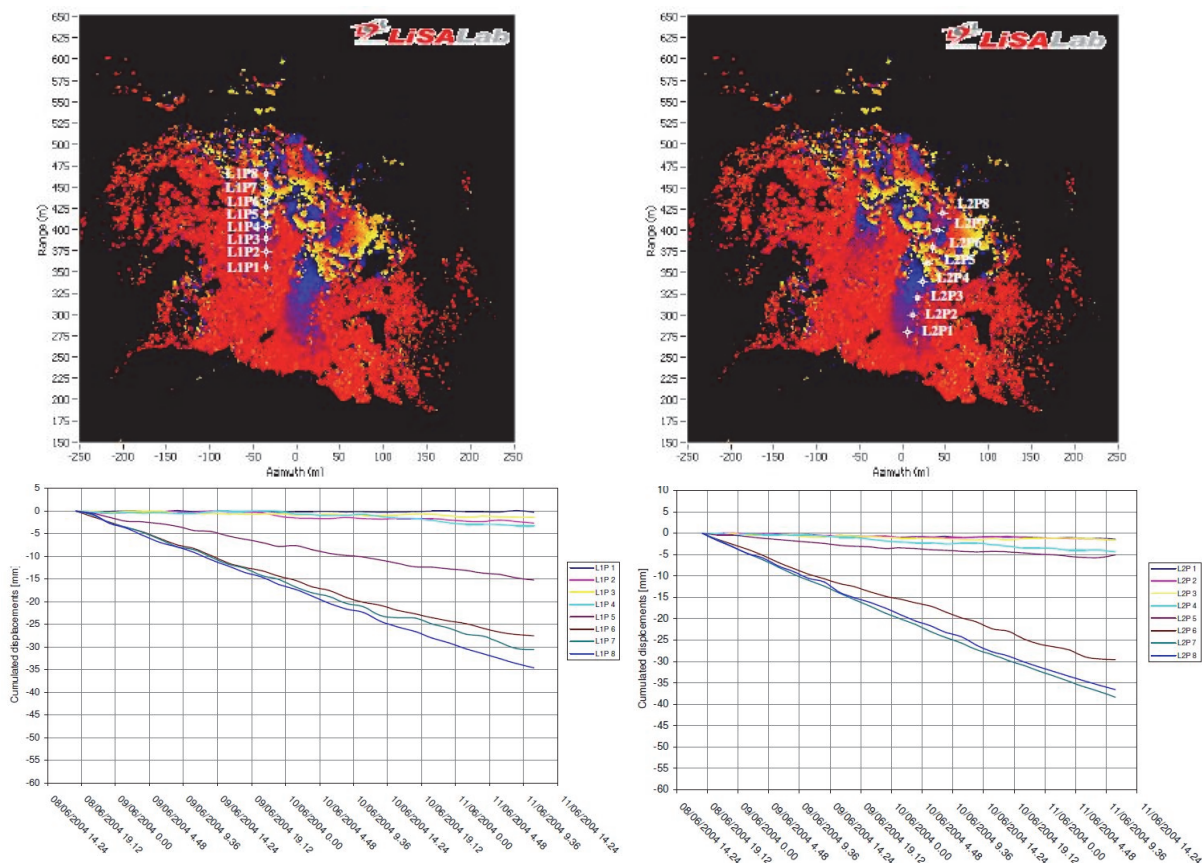


図-3.6 高速移動領域の経時変化図

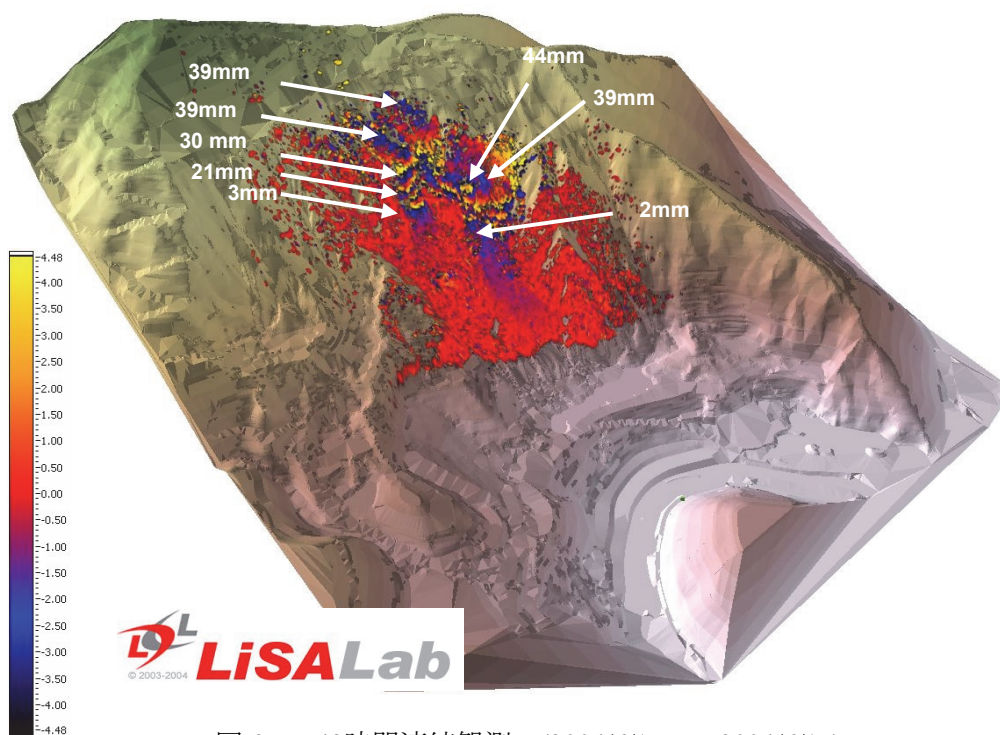


図-3.7 48時間連続観測 (2004/6/15 ~ 2004/6/17)

観測から約 3 か月後、台風 21 号の豪雨により観測対象範囲の斜面は崩壊した。2 週間で 40mm 程度の変位は時間換算で 0.1mm 程度であり、崩壊を予測することは困難であるが、写真-3.3 に示すように、BGInSAR により観測された高速移動領域は、崩壊した斜面とほぼ一致している。

写真-3.3 高速移動範囲¹²⁾と2004/9/29の崩壊¹¹⁾

3. 2 怒田地すべり（国土交通省四国山地砂防事務所管内）

(1) 観測状況

2006 年 3 月 4 日～2006 年 7 月 7 日の期間、四国山地砂防事務所管内の地すべり地域において、GBInSAR の長距離観測および長期・無人観測実験を行った。

観測対象は写真-3.4 に示すように、延長 2km、幅 2km のエリアであり、水田などの耕作地が多いが、反射強度は十分に得られている。観測範囲内には、家屋や石垣、水路などのコンクリート構造物があるためと考えられる。観測のセル設定を図-3.8 に示す。装置の開口長は 2.7m、移動時間は 13 分 5 秒で設定した。

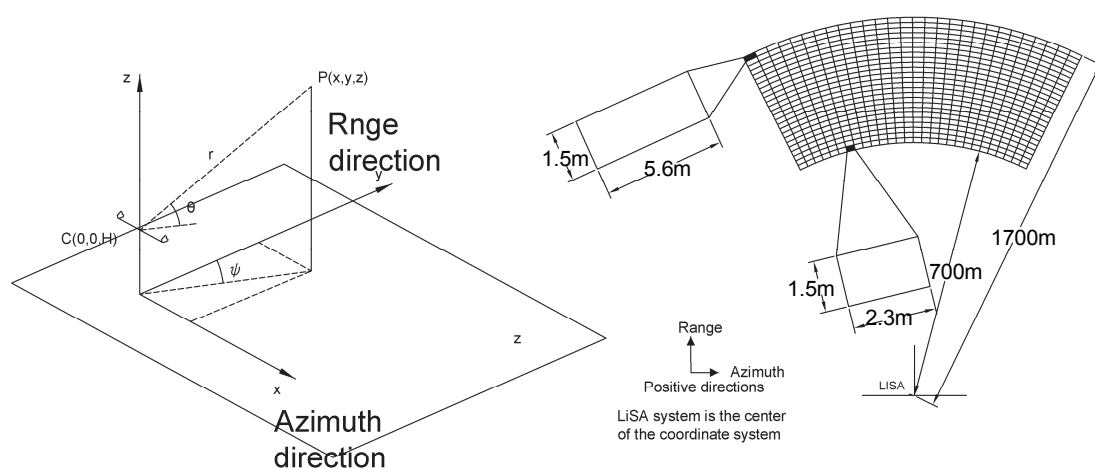


図-3.8 怒田地区における測定パラメータ設定

当該エリアには、GBInSAR 設置位置に高速電話回線が確保できなかったために、衛星電話回線を用いて LAN 接続を行った（写真-3.5）。これに伴い、無停電電源装置なども整備して観測を行った。このような仮設を整備すれば、電源に発電機を用いることで、全国のど

のような場所でも観測が可能である。

観測中、2回の被雷によるものと考えられる停電および装置の電源に不具合が生じた。観測装置を CCD カメラで撮影することにより、ヘッドの移動の状況を確認して、保守を行った。最新型の LiSAmobile09 にはヘッド中心に GPS が装備されており、稼働状況を専用ソフトで管理することが可能である。

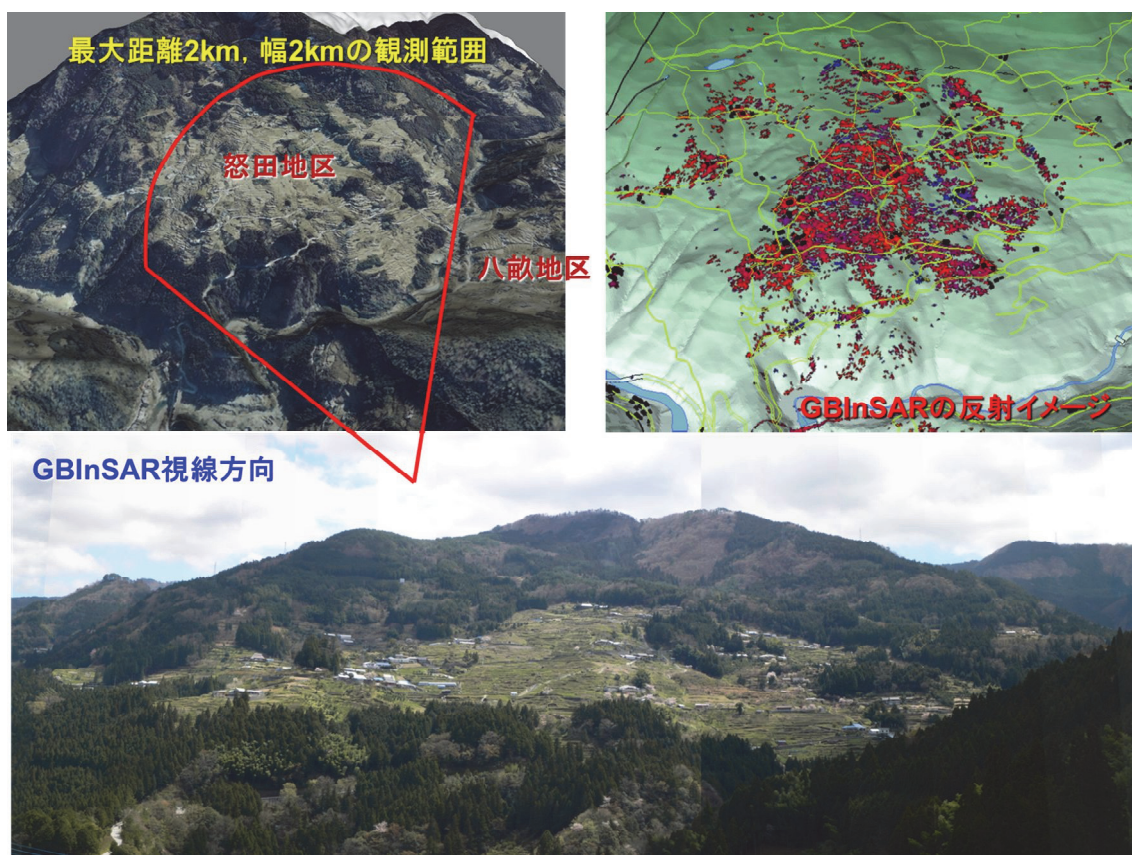


写真-3.4 観測エリアと反射イメージ



写真-3.5 衛星回線のルーターとパラボラアンテナ

(2) 観測結果

a) 総変動量

通常の変動量の管理は、図-3.9 に示すように、実画像とは異なり、極座標のイメージで行

った。当該域での約 4 ヶ月間の累積変動量観測結果を図-3.10 に示す。観測期間で最大 -20.5mm、GBInSAR に近づく方向に変動が現れた。しかし、全域は 1mm 程度の変動にとどまり、優位性を判断できる変動量ではなかった。

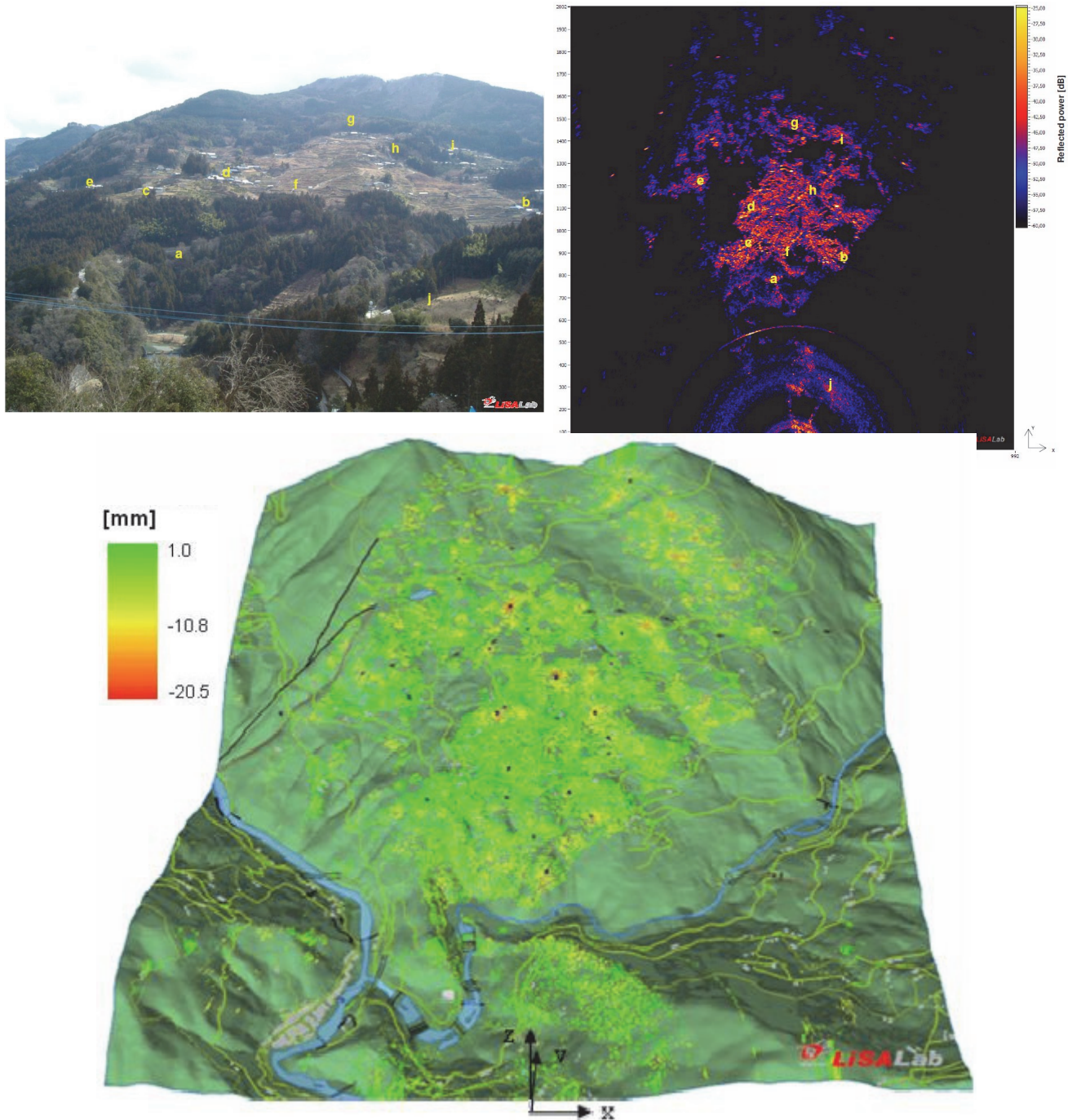


図-3.10 計測期間中の総変動量 (LOS 方向) mm

b)任意に選定された位置の経時変化

任意の位置に選定した地点の経時変化図を取得した。特に明瞭な変動が確認された地点について、経時変化図を示す。

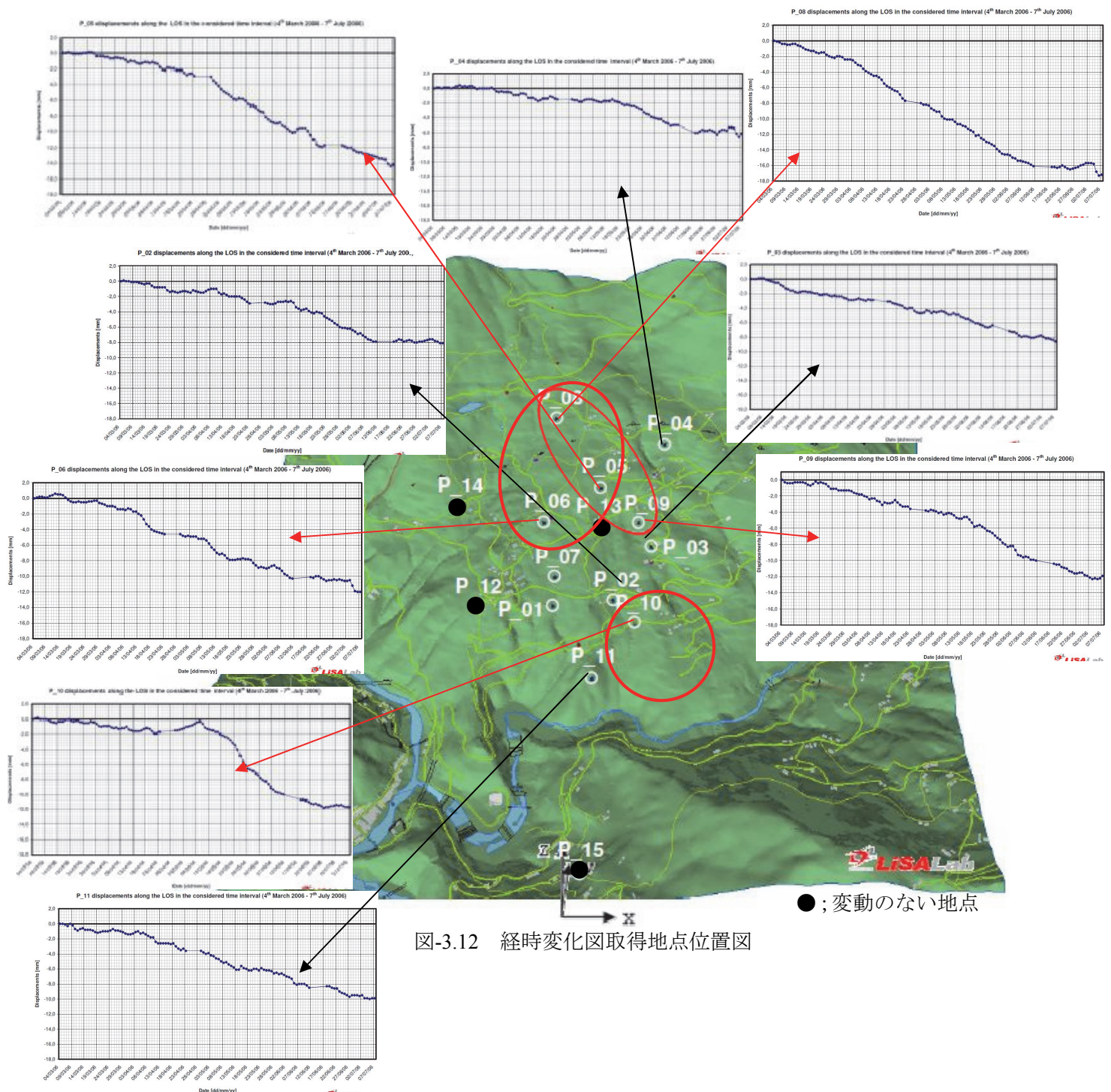


図-3.12 経時変化図取得地点位置図

総変動量では、地すべりのブロック区分を明確にするには至らなかった。観測エリア内には、変動しない点（●）と明瞭な変動を示す点がある。図-3.12 には、その活動性の高いエリアを赤線の楕円で示した。これが、ブロック区分とどのような関係にあるかは、核にしていない。

b) 既往の GPS 設置地点の観測結果

GPS の観測データを入手できたの No.7、No.9 では、GBInSAR の測定結果はよく一致している。No.16 は、その地点の斜面の形状により最大変動方向が GBInSAR の LOS 方向とは一

致しないために、やや整合性を欠く。

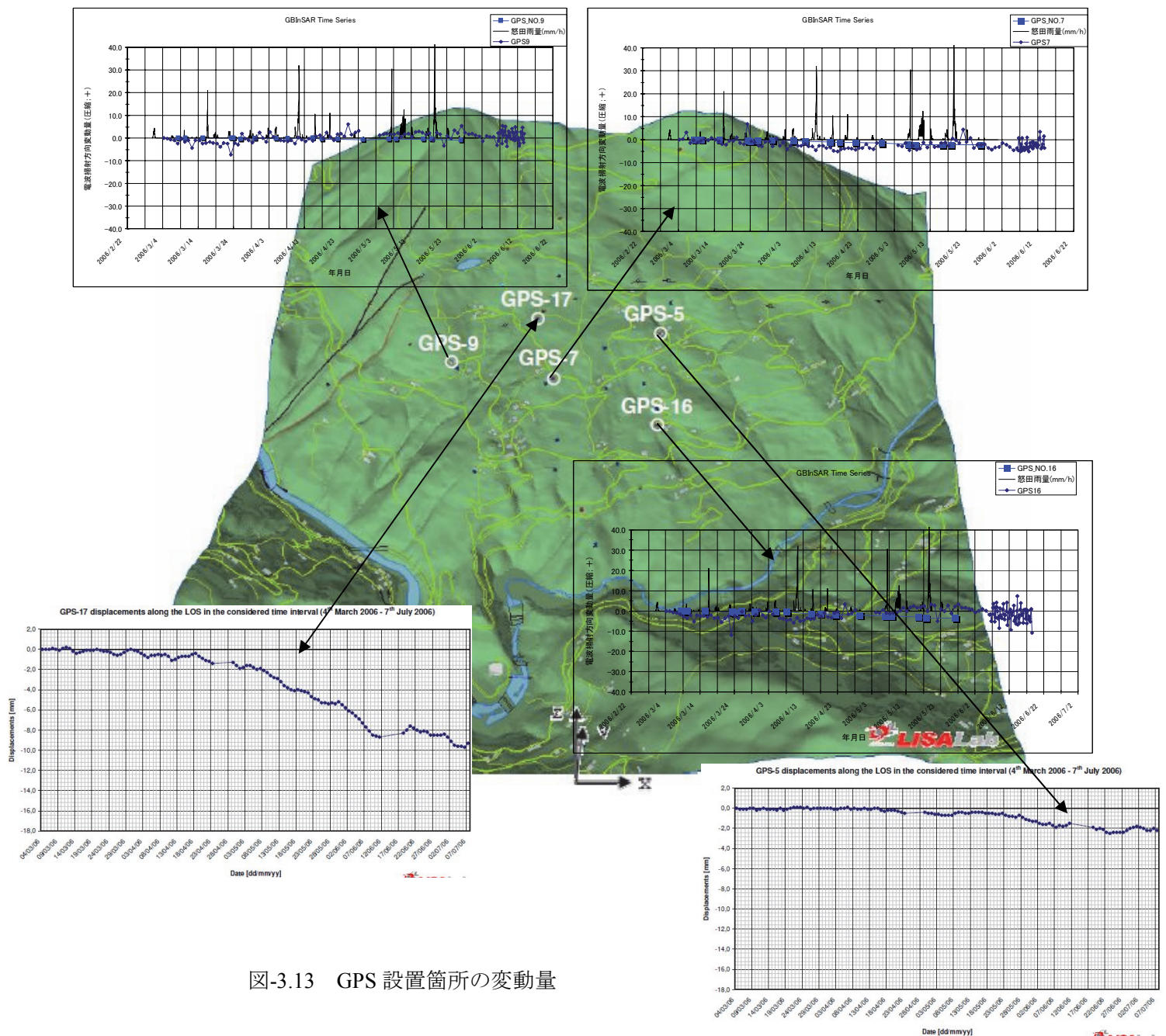


図-3.13 GPS 設置箇所の変動量

4 今後の展望

GBInSAR のシステムおよび測定原理について整理し、そのデータの特性や高精度・高密度の観測を提供できることを、国内実験を基礎に述べた。

海外では、GBInSAR はエトナやストロンボリなどの活火山の観測において、人工衛星の観測では死角になる領域の観測に活用され、日本国内でも適用される観測対象は多く、実用性の高い観測手法として適用される可能性は高いと考えている。

また、地すべりにおける崩壊発生時刻の予測は、変動速度により行うことが、現時点で

は合理的である。この変動速度¹⁴⁾を地すべりのどの部分で観測することが、もっとも的確なのかを検討することは、伸縮計¹⁵⁾や傾斜計による限られた点の変動量に頼らず、斜面全体を観測できる手法により実現できる。

LiSA では、任意地点の経時変化の表示や、閾値の設定によるアラーム機能も装備している。こうしたソフト面での充実も、今後の高精度・高密度の連続観測による斜面変動観測をより効率的にするものとする。



図-4.1 現場の PC で表示される面的変動量図と指定地点の経時変化図例

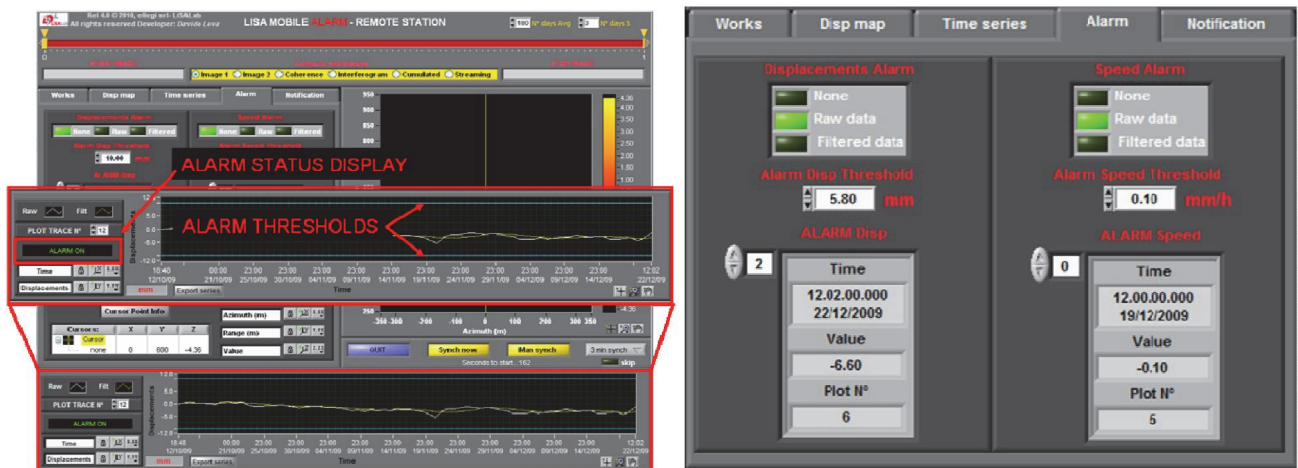


図-4.2 アラーム機能

5 おわりに

GBInSAR は、国内では観測が実験的に行われる段階に至ったばかりである。海外では2011年には100件を超える観測が実施されている。

総務省における17GHz帯の実験により、国際的な標準として17GHz帯が防災利用のための周波数帯として割り当てられる法律が近く整備され、国内における観測環境はよりGBInSARの活用を推し進める状況になっている。

GBInSARによる合理的で効率的な観測が、新たな斜面崩壊のメカニズムに関する研究や崩壊予測に関する手法などの提案を生み、斜面防災技術の発展に寄与することを願って止まない。

参 考 文 献

- 1) 独立行政法人土木研究所 他；地すべり末端部の崩落範囲の予測技術の開発共同研究報告書，平成24年9月
- 2) D. Leva, G. Nico, D. Tarchi, J. Fortuny-Guasch, and A. J. Sieber: "Temporal Analysis of a Landslide by Means of a Ground-Based SAR Interferometer", IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 41, NO. 4, APRIL 2003 pages: 745-752
- 3) 17GHz帯地上設置型合成開口レーダーの周波数有効利用技術に関する調査検討会；17GHz帯地上設置型合成開口レーダーの周波数有効利用技術に関する調査検討報告書，pp.6，平成25年3月
- 4) Reprinted from Engineering & Science, Spring 1991, v. LIV, no. 3, p. 16
- 5) <http://treuropa.com/technique/sar-imagery/>
- 6) LisaLab; Technical Relation; The LiSALab technology, January 12th, 2009
- 7) Alessandro Ferretti, Claudio Prati, and Fabio Rocca. Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1):8–20, January 2001.
- 8) Alessandro Ferretti; InSAR applications: a look at the future based on present scenarios, 東京大学人工物工学研究センター主催第22回人工物工学コロキウム, 2012年10月26日
- 9) H.rott & T. Nagler, F.Rocca & C.Prati, A.Mazzoti, H.Keusen & S. Liener, D.Tarchi; InSAR techniques and applications for landslides and subsidence, Geoinformation for European-wide, Integration, Bens (ed.), ©Millpress, Rotterdam, ISBN 90-77017-17-2
- 10) Fabio Rocca ; The Permanent Scatterers Technique to measure Earth Motion from space, Special Lecture of EO conference, Canadian Embassy Japan, January 29, 2003
- 11) 鳥取県土整備部；智頭町市瀬地区土砂災害復旧の記録，平成21年3月
- 12) 水野敏実、山根誠 他：地上設置型合成開口レーダーLiSA©を用いた地すべり観測事例，（社）土木学会第32回岩盤力学シンポジウム講演論文集, 2005年.
- 13) D. Leva, C. Rivolta, I. B. Rossetti, T. Mizuno; Using a ground based interferometric synthetic aperture radar (GBInSAR) sensor to monitor a landslide in Japan, IGARSS 2005, 25-29 July Coex, Seoul, Korea
- 14) Fukuzono, T.; "A new method for predicting the failure time of a slope." Proc. 4th Int. Conf. & Field Workshop on Landslides, Tokyo, pp. 145-150, 1985.
- 15) Saito, M.; "Forecasting time of slope failure by tertiary creep." Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. 2, pp. 677-683, 1969.

(公社)日本地すべり学会関西支部協賛会員名簿

平成25年4月10日現在 26社

(口数・五十音順)

(会 社 名)	(電話番号)	(口数)
有限会社 太田ジオリサーチ	078-907-3120.....	3
中央復建コンサルタンツ株式会社 情報マネジメント室 ...	06-6160-1121.....	3
日本工営株式会社 大阪支店	06-7177-9500	3
アジア航測株式会社 西日本コンサルタント部.....	06-4801-2250.....	2
株式会社 荒谷建設コンサルタント 総合技術部	082-292-5481.....	2
株式会社 宇部建設コンサルタント	0836-72-0392.....	2
株式会社 エイト日本技術開発	086-252-8917.....	2
応用地質株式会社 四国支社	089-925-9516.....	2
川崎地質株式会社 西日本支社	06-6768-1166.....	2
株式会社 クボタ	06-6648-2322.....	2
国土防災技術株式会社 大阪支店	06-6136-9911.....	2
国土防災技術株式会社 高知営業所	088-882-7110.....	2
株式会社 コスモ建設コンサルタント	0853-72-1171.....	2
株式会社 四国トライ	088-883-5908.....	2
株式会社 四国ボーリング工業	0883-52-1621.....	2
島建コンサルタント株式会社	0853-53-3251.....	2
株式会社 相愛	088-846-6700.....	2
株式会社 ダイヤコンサルタント 関西支社.....	06-6339-9141.....	2
株式会社 地盤総合コンサルタント 四国支店.....	0897-33-3123.....	2
中央開発株式会社 関西支社	06-6386-3691.....	2
株式会社 東建ジオテック	089-945-3328.....	2
株式会社 ナイバ	0878-62-5121.....	2
日本工営株式会社 四国支店	087-811-2660.....	2
三菱マテリアルテクノ株式会社	079-679-4511.....	2
明治コンサルタント株式会社 大阪支店.....	072-751-1659.....	2
株式会社 四電技術コンサルタント	087-845-8881.....	2