

平成 28 年度  
公益社団法人日本地すべり学会関東支部  
創立 10 周年記念シンポジウム

「変わりゆく豪雨災害」  
概要集



期日：平成 28 年 5 月 12 日  
場所：東京大学武田先端知ホール



平成28年度 公益社団法人日本地すべり学会関東支部  
創立10周年記念シンポジウム「変わりゆく豪雨災害」

期日：平成28年5月12日（木）12:45～17:00（総会終了後）

場所：東京大学武田先端知ホール（東京大学工学部）  
東京都文京区弥生2-11-16 武田先端知ビル5F  
東京地下鉄南北線「東大前」駅下車 徒歩8分、千代田線「根津」駅下車 徒歩5分

会費：支部会員・一般 2,000円  
学生 1,000円（高校生以下無料）

次第：

1. 開会・支部長挨拶 12:45～12:50

2. 記念講演 12:50～13:35（45分、質疑応答を含む）

「土砂移動現象把握のための陸域観測技術衛星データの利用」  
静岡大学（日本地すべり学会会長）土屋 智

1

3. 休憩 13:35～13:45（10分）

4. シンポジウム「変わりゆく豪雨災害」

－近年の豪雨災害－

講演 13:45～14:30（45分、質疑応答を含む）

「平成25年台風26号による伊豆大島豪雨災害（仮題）」  
山梨大学（日本地すべり学会副会長）後藤 聰

講演 14:30～15:00（30分、質疑応答を含む）

「平成27年9月関東・東北豪雨における災害」 日本地すべり学会関東支部災害調査団  
群馬大学 若井明彦

－対応技術－

講演 15:00～15:45（45分、質疑応答を含む）

「雨量観測は新時代へ—先端的気象レーダーによる降雨観測—」  
防災科学技術研究所 岩波 越

21

講演 15:45～16:30（45分、質疑応答を含む）

「茨城県大会で実施した崩壊実験の報告」 関東支部斜面モニタリング研究会

27

○防災科学技術研究所 酒井直樹

○アジア航測(株) 小野田 敏

明治コンサルタント株式会社 納谷 宏

株式会社オサシ・テクノス 大川内 正樹

応用地質株式会社 小林 剛

○：発表者

5. 総合討論 16:30～17:00（コーディネータ：落合博貴）

6. 閉会 17:00

## 著者略歴

**土屋 智 (つちや さとし)** 静岡大学農学研究科 教授 (日本地すべり学会 会長)

1978年 静岡大学農学研究科林学専攻修了 国土防災技術（株）入社

1985–1987年 建設省土木研究所地すべり研究室 部外研究員

1988年 静岡大学農学部助手

1993年 同上 助教授

1996年 同上 教授

**後藤 聰 (ごとう さとし)** 山梨大学 大学院 総合研究部 准教授  
(日本地すべり学会 副会長)

1987年4月 大成建設（株）技術研究所研究員

1998年4月 山梨大学工学部助教授

2007年4月 山梨大学大学院医学工学総合研究部准教授

**若井 明彦 (わかい あきひこ)** 群馬大学大学院理工学府 環境創生部門 教授

1997年4月 群馬大学工学部 助手

1998年8月 中国清華大学 客員研究員

2008年4月 英国 Imperial College 客員研究員

2011年4月 群馬大学大学院 教授

**岩波 越 (いわなみ こゆる)** 防災科学技術研究所 気象災害軽減イノベーションセンター 副センター長

1991年4月 科学技術庁 防災科学技術研究所 長岡雪氷防災実験研究所 研究官

2013年3月 独立行政法人 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究ユニット長

2016年4月 現職

**酒井直樹 (さかい なおき)** 防災科学技術研究所 先端的研究施設利活用センター準備室長

1995年 千葉大学大学院理学研究科 地学専攻修了、明治コンサルタント入社

2003年 長岡技術科学大学大学院工学研究科 博士後期課程修了 博士(工学)

2005年 土木研究所火山・土石流チーム任期付研究員

2007年 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究ユニット 主任研究員

2016年 現職

**小野田 敏 (おのだ さとし)** アジア航測株式会社 コンサルタント事業部 副事業部長 (理事・フェロー)

1983年3月 新潟大学理学部地質鉱物学科卒業

1983年4月 株式会社北日本技術コンサルタント（現株式会社キタック）入社

1990年4月 アジア航測 株式会社入社 現在に至る

**納谷 宏 (なや ひろし)** 明治コンサルタント（株）計測技術開発センター センター長

1988年3月 秋田大学鉱山学部鉱山地質学科卒業

1988年4月 明治コンサルタント株式会社入社

2014年4月 同計測技術開発センター 現職

**大川内 正樹 (おおかわうち まさき)** (株)オサシ・テクノス 開発課 係長

2003年3月 高知工科大学 工学部 電子・光システム工学科卒業

2003年4月 株式会社オサシ・テクノス入社 開発課 現職

**小林 剛 (こばやし つよし)** 応用地質株式会社 計測システム事業部 グループリーダー

1992年 富山大学大学院 理学研究科 地球科学専攻修了

1992年 応用地質株式会社 探査工学研究所 入社

2011年 同 計測システム事業部 現職

# 土砂移動現象把握のための陸域観測技術衛星データの利用

静岡大学農学研究科 土屋 智、西口尚希

## 1. はじめに

地震や豪雨時には、地すべり、斜面崩壊が丘陵域から山岳地帯で広範囲に発生し甚大な土砂災害を引き起こす場合も少なくない。このような災害時には航空機からの写真撮影やレーザプロファイラ（LP）による災害情報の取得が必要で、日本の多くの災害地で有用な情報が迅速に提供されてきた。しかしながら、グローバルにみると航空機が活用できる地域は限られるし、まして LP 計測データの入手はほとんど期待できない国も数多くある。このような地域で災害情報を取得するには、対象域内を広域にしかも継続的に取得できる人工衛星から供給されるリモートセンシングデータの利用が有用で手っ取り早い。過去にわたりデータ蓄積のある陸域観測技術衛星「だいち」と後継機で現在稼働中の「だいち 2 号」が供給するデータは、地表変動を含む災害情報の取得に欠かせないものである。

精密な軌道情報を持つ陸域観測技術衛星「だいち」（ALOS）は、2006 年に JAXA により打ち上げられた。地上 2.5m、10m の高精度の光学センサー（PRISM、AVNIR-2）と L バンド合成開口レーダー（PALSAR）を有し、新潟県中越沖地震や四川大地震等の災害被害観測では多くの有益な情報を提供したが、目標寿命 3 年を超えて運用され 2011 年 4 月に運用停止となった。その継機である「だいち 2 号」は 2014 年に打ち上げられ、観測データの配布が同年 11 月末から開始されている。この衛星は、光学センサーを有しないが、分解能 1m × 3m を有する高精度な「L バンド合成開口レーダ（PALSAR-2）」を搭載し、先の PALSAR の分解能 10m に比べるとその精度は大きく向上している（JAXA, 2015a）。

これら地球観測衛星に通常搭載されている光学センサーは、太陽光のない夜間や雲が存在していると地上を観測することはできない。合成開口レーダ（SAR）は分解能の高いマイクロ波レーダを用い、光よりも長い波長を有するため、夜間や雲霧の中でも地表面を感知できる。また、地表の反射物からのレーダ反射波の強度に加え、反射波の位相情報を得ることが可能である。干渉 SAR とは、このレーダ観測を地表の同一地点に対して 2 回以上実施し、それらの位相差をとることによって観測期間に発生した衛星視線方向の地表変動量を面的に計測するリモートセンシング技術で、数値標高モデル（DEM）を作成することも可能である。

ここでは、このような地表状態を詳細に観測することが可能な陸域観測技術衛星のデータについて、土砂移動現象の詳細把握にどのように応用するか、またそこから得られる成果はどの程度であろうか、といった観点で幾例かの適用事例とともにその結果を紹介したい。先ずは、だいち 1 号の光学センサーの適用事例、次いで同衛星の 10m 精度を有する PALSAR の適用事例を紹介し、最後にだいち 2 号の高詳細な PALSAR-2 の適用結果を述べる。

## 2. だいち 1 号（ALOS-1）による土砂移動現象の把握

### 2-1 光学センサーによる画像データの利用

#### （1）大光包岩盤地すべりの概要

2008年5月12日四川省の西縁部に位置する龍門山断層帶上で四川大地震（Mv=7.9, USGS）が発生した。ここでは、この地震により、地震起因の土砂移動現象としては最大規模の「大光包岩盤すべり」（四川省安県高川郷団子坪）が起こった。その規模は、長さ約4km, 幅約2km, 崩壊土量約7億m<sup>3</sup>で世界的に見ても類を見ないものである（山田ら、2010）。この地すべりは、大光包山（3047m）を含み、その背後を頭部に西北斜面の山体が約1500m崩れ落ちた。崩壊土砂は、そのまま対岸に乗り上げ、直下の渓谷に厚く堆積するとともにその一部は流動化し下流側の尾根を乗り越えた。この崩壊により、高川郷団子坪集落の39名が犠牲になった（山田ら、2010）。ここでは、この大規模地すべりを対象に ALOS の「パンクロマチック立体視センサー（PRISM）」センサーにより得られた画像を用いて、DEM を抽出し崩壊前後の標高データから崩壊深さ、崩壊土量を推定したので以下に紹介したい。

## ① マッチング手法による DEM 抽出

DEM 抽出にあっては、山川ら（2002）が示した2次元アフィンモデルを用いた。具体的には PRISM によって撮影された直下視と前方視の2枚の画像を用いて、ステレオマッチングを行い、2次元アフィンモデルによる標定を行い、10m×10m メッシュの DEM を作成することにした。

$$\begin{aligned}x_l &= a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4 \\y_l &= b_1X + b_2Y + b_3Z + b_4 \\x_r &= c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4 \\y_r &= d_1X + d_2Y + d_3Z + d_4\end{aligned}$$

ここに、 $x_l, y_l$ :後方、 $x_r, y_r$ :直下画像のピクセル座標、 $X, Y, Z$ :地上座標、 $a_1 \cdots a_4, b_1 \cdots b_4, c_1 \cdots c_4, d_1 \cdots d_4$  未知係数で、それぞれを  $I, A, X$  とすれば  $X, Y, Z$  は  $R = A^{-1}I$  で求められる。上記の16個の未知係数は最小二乗法を用いて定めた。

$$\begin{bmatrix}x_l - a_4 \\y_l - b_4 \\x_r - c_4 \\y_r - d_4\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}a_1 & a_2 & a_3 \\b_1 & b_2 & b_3 \\c_1 & c_2 & c_3 \\d_1 & d_2 & d_3\end{bmatrix} \begin{bmatrix}X \\Y \\Z\end{bmatrix} \quad I = \begin{bmatrix}x_l - a_4 \\y_l - b_4 \\x_r - c_4 \\y_r - d_4\end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix}a_1 & a_2 & a_3 \\b_1 & b_2 & b_3 \\c_1 & c_2 & c_3 \\d_1 & d_2 & d_3\end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix}X \\Y \\Z\end{bmatrix}$$

これには、4点以上の基準点が必要になるため、Google Earthを用いて6点の（地上座標）を取得し、対応する箇所のピクセル位置を後方、直下視画像から求めた。

## ② DEM抽出結果と崩壊土量

図2.3には、DEM抽出に用いた崩壊前の地形（Google Earthを用い、uTreKGE（Eugene Software Inc for Mac）により求めた）を、また図2.4には、得られたDEMにALOSのAVNIRカ



図 2.2 大光包岩盤崩壊の ALOS 衛星 AVNIR 画像 (JAXA 提供, 2008 年 6 月 4 日撮影)

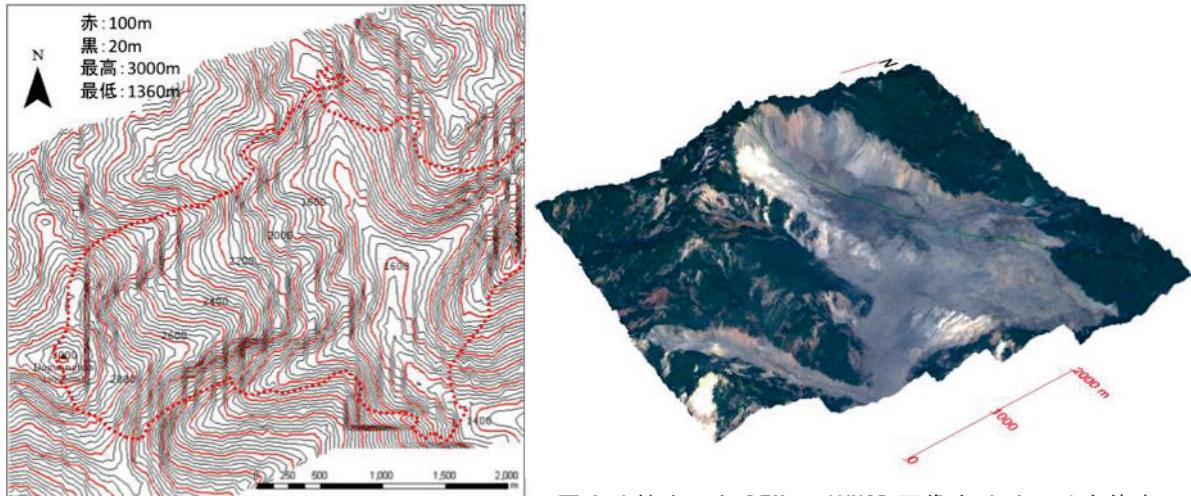


図 2.3 崩壊前の地形と崩壊範囲

図 2.4 抽出した DEM に AVNIR 画像をはりつけ立体表示した崩壊後の地形

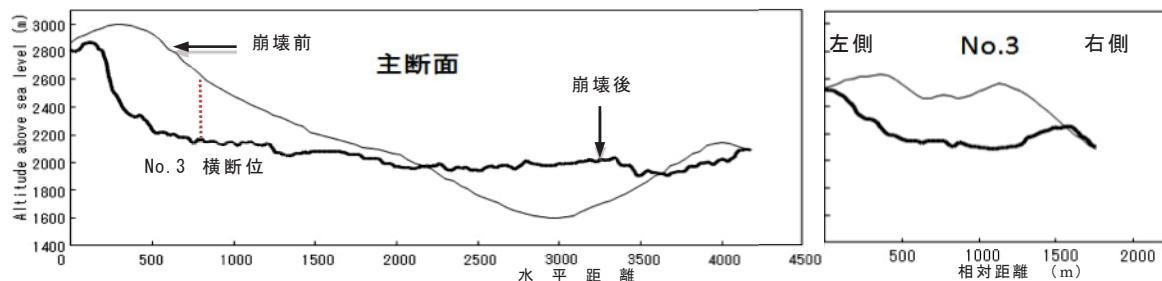


図 2.5 主断面位置における縦断方向の崩壊前後の地形変化と横断形状

ラ一画像を地表に貼付け、立体化して表示した。図2.5に示すように崩壊後の地表縦断形状は、源頭部がほぼ垂直に落ち込み中央部から下流部にかけてほぼフラットに堆積していることがわかる。堆積状況から判断すると、崩壊土塊はバラバラの状態で層と程度の高速で流動したことが伺える。また、源頭部から約700m下流側（No. 3）の横断地形をみると、崩壊面は元地形から約600mの下位にあり、お椀状に堆積したことがわかる。

崩壊の前後を対比した縦断図上（図2.5）において、源頭部から約300mごとに横断を切り、崩壊土砂が堆積した範囲を対象に、崩壊した土量と堆積した土量を求めた。表2.1にその対比を一覧する。

これによれば、地山換算で崩壊土砂量は $6.9\text{億}\text{m}^3$ 、堆積土量は $13.4\text{億}\text{m}^3$ と莫大な量を示す。評価された堆積土量は崩壊土量に比べ異常に大きいが、この崩壊では、崩壊土砂は下流側に拡大して流下し、両側に存在する小高い尾根を超えており、堆積土砂のカウントにはこの部分も含まれる。崩壊部は地山換算なのでその体積増加を勘案し、割り増し相当分を30%と見積もると、約9億 $\text{m}^3$ であるから、評価した堆積土量とは4.4億 $\text{m}^3$ の差がある。崩壊土砂が尾根越えとともに新たな崩壊を引き起

表 2.1 崩壊・堆積した土量

Section	Distance	Depletion	Depletion	Accumulate	Accumulate
		section area	section volume		
	m	$\text{m}^2$	$\text{m}^3$	$\text{m}^2$	$\text{m}^3$
1	250	400107	50013375		
2	330	626283	169354350		
3	310	478527	171245550		
4	290	377105	124066640		
5	290	264417	93020690		
6	310	149340	64132335	318840	49420200
7	260		19414200	102510	54775500
8	270			359280	62341650
9	300			769080	169254000
10	310			1814940	400523100
11	310			522960	362374500
12	360			162270	123341400
13	320			592200	120715200
		total	691247140	total	1342745550

こしたことが考えられるが、その差が大きすぎて数量的なバランスがとれていない。精度を高めるには、崩壊前のALOS・PRISM画像を入手してより正確なDEM抽出を行い、崩壊と堆積の土砂量を評価する必要があるが、光学センサーであるPRISM画像は雲霧に影響され、運用開始から地震発生時まで有用なものは見当たらなかった。

## (2) 台風 Morakot による土砂災害概要

### ① 災害概要

台湾の中部から南部にかけて、2009年8月6日から10日にかけて進行速度を落とした台風Morakotが一帯に2000mmを超える多量の雨をもたらした。これにより、南投縣、嘉義縣、台南縣、高雄縣、屏東縣、台東縣にわたる広範囲で多様な土砂災害が発生し、死者600名以上、行方不明者76名、農業被害額165億元を超える大惨事となった(Cheng et al., 2010)。

高雄縣甲仙鄉小林村(図2.6)では、8月9日6時頃、集落の背後斜面に発生した大規模な深層崩壊が集落全体を襲った。その後斜面から流動化した崩土は、集落に面して流下する旗山渓を約30mの高さで塞き止め、午前7時頃に決壊した。このため河床から約10mの高位にあった小林村集落は、崩土堆積と土砂ダム決壊により170軒近くあった家屋のうち、2軒を残し壊滅し、47名は生存したが500名近くの命が失われた(堤ら, 2011)。

### ② 大規模斜面崩壊の規模

図2.7にはALOS衛星PRISM画像(崩壊前:2009年6月10日撮影、崩壊後:2010年2月24日撮影)を用いて作成した崩壊前後のDEMに画像を貼り付け作成したオルソ画像を対比して示す。

両者を対比すると、崩壊後には小林村の集落の背後約1000から1500m付近の斜面がえぐられたように大きく変化したこと、また集落のすぐ背後から約1000m区間には段丘面と思われる小高い平坦な地形が存在しているのが認められる。さらには、崩壊前に小林村集落の北側近隣に存在していた最大深さ60mほどの谷地形はほぼ完全に埋没し、埋没した谷が合流する旗山渓の対岸側河床には、大きく盛り上がったような痕跡がみられることから、土砂ダムはここに形成されたことがわかる。

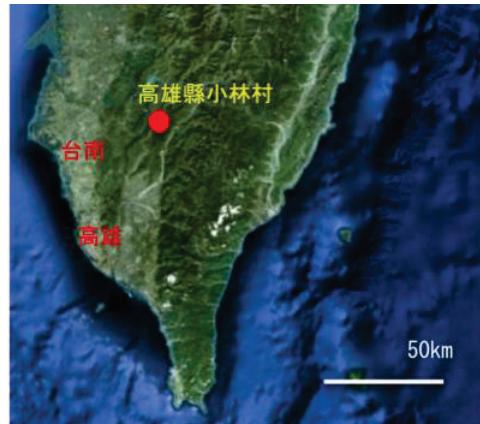


図2.6 台湾高雄縣甲仙鄉小林村  
(Google Earth画像に加筆)

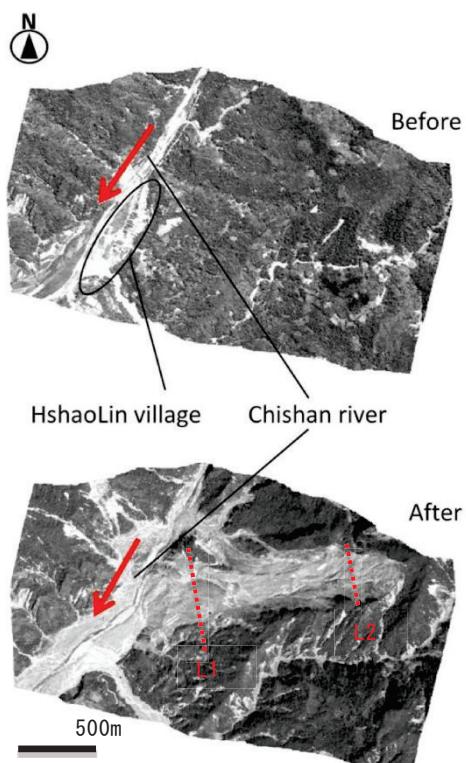


図2.7 小林村大規模崩壊地と周辺の崩壊前後のオルソ画像

図 2.8 には斜面崩壊の縦断方向の断面図を示す。これによれば、小林村のすぐ配後に位置する段丘面（旗山渓、Chishan river）の河床から水平距離 1200m まで区間)では大きな地形の変化は見られない。水平距離で 1200m から 1700m までの区間では堆積を呈し、堆積厚は最大で約 46m であった。水平距離 1700m から 2200m までの区間は、地形変化に乏しく崩壊土砂が侵食、堆積をともなわざ流下した範囲であろう。水平距離 2200m から 3400m までの区間は地表低下が著しいことから崩壊はこの区間で発生したと考えられる。

図 2.8 には、崩壊前後の地形を対比し、その縦断図と縦断図の水平距離約 1300m 位置 (L1) と水平距離約 3000m 位置 (L2) でこれに直交する横断図を示した。

横断 L1 をみると、集落南側から延びる左岸側の谷では堆積、浸食された様子はうかがえないが、集落北側から延びる谷部（図の右岸）では、最大約 70m、丘陵部でも約 30-40m の厚さで土砂堆積したことがわかる。横断 L2 によれば、崩壊前の断面と比べ、崩壊後は深さ 60-70m、最大約 100m で深くえぐられた形状を呈している。

図 2.7 に示す崩壊地の平面的な分布と図 2.8 に示す断面形をもとに、崩壊前後の地形変化（最大崩壊深約 110m、平均崩壊深約 60m）から崩壊土量を評価すると、崩壊土砂量は 2500 万  $m^3$  となった。

### ③ 崩壊土塊の運動シミュレーション

崩壊が起きたとき、どのような速度でいかに流動したかは有用な災害情報である。ALOS の PRISM 画像から崩壊前後の DEM が作成されているので、これを基に LS-RAPID (Sassa et al., 2010) を用い、「崩壊土塊の運動シミュレーションを試みた。シミュレーションに用いた地表面データは 20m 精度とし、斜面崩壊した範囲のみ崩壊後の標高、それ以外は崩壊前の標高を与えた。

シミュレーションでは、土塊の単位体積重量を 20KN/ $m^3$ 、土塊内部の粘着力 5.0KPa、摩擦係数 0.58 とし、定常時のせん断抵抗は 50KPa とした。運動時のすべり面摩擦係数は地形傾斜相当とした値を各メッシュに入力し、水平土圧係数 0.152 と設定した。また、過

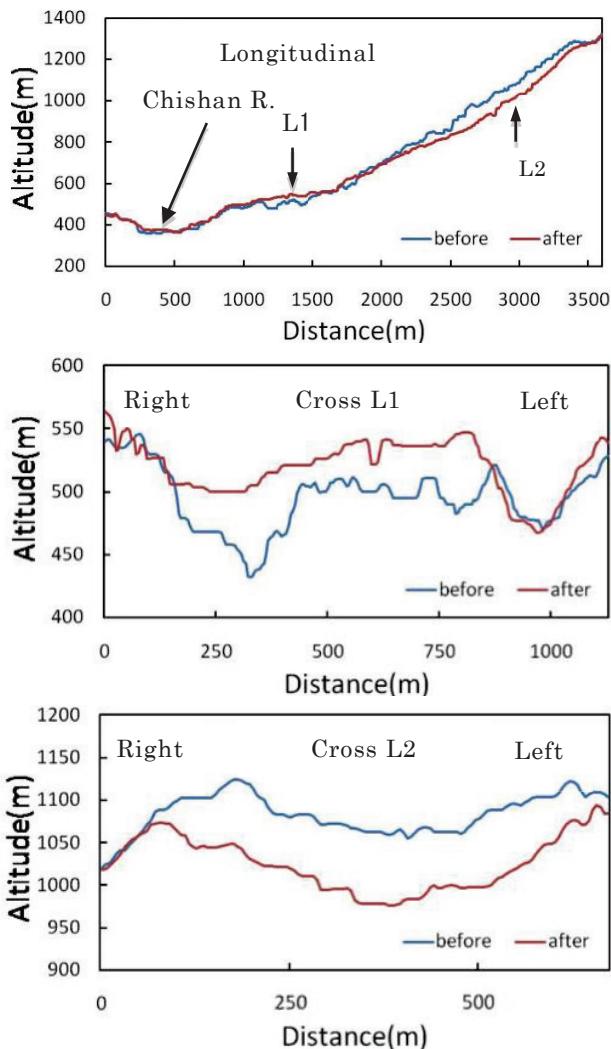


図 2.8 崩壊前後の地形対比

剥間隙水圧はその発生係数を 0.6、摩擦エネルギー以外のエネルギー消費は速度 50m/s として与え、土塊厚 200m を越えた場合に発動させた（係数  $\alpha$  は 10）。

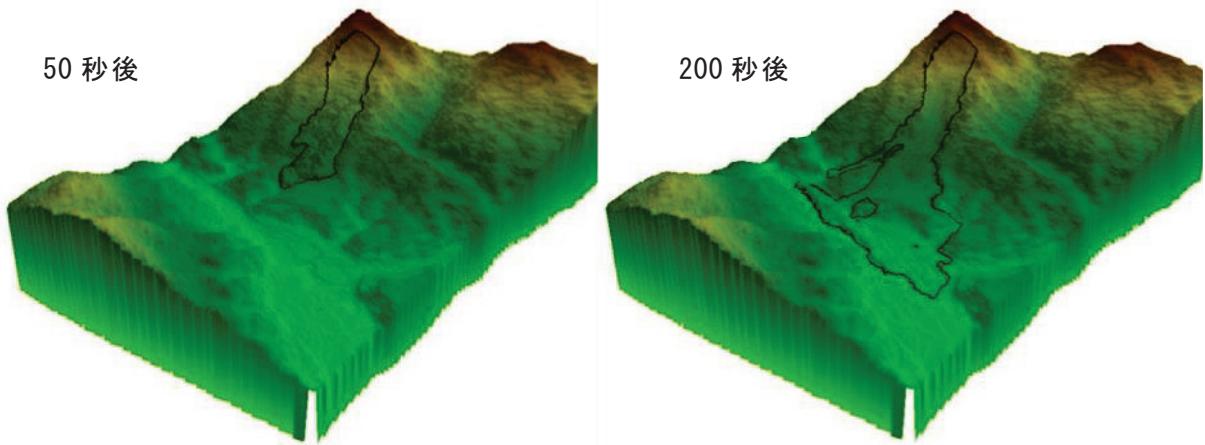
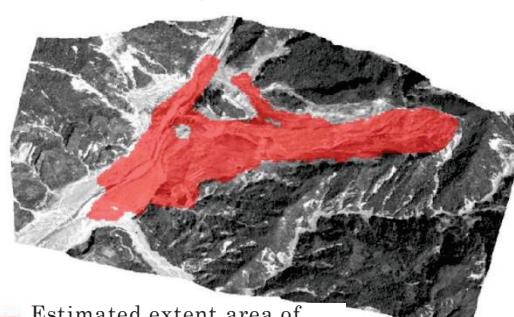


図 2.9 シミュレーション結果（左：50 秒後、右：200 秒）

ミュレーション開始 50 秒後と 200 秒後の崩壊土砂の到達範囲を図 2.9 に示す。開始 50 秒後には、崩壊の先頭部は小林村集落北部に位置する谷を流下し、その一部は谷の湾曲している部分を曲がり切れずに段丘面に乗り上げるとともに、この時刻では崩壊の大部分は斜面の中腹部を流下している。崩落開始後 200 秒には、崩壊土砂の主体部分は集落背後の段丘面に乗り上げ、その先頭は集落を通過し旗山渓の対岸に達し堆積を始めている。また、集落を通過した土砂流れは、旗山渓の下流に向かい流動範囲を拡大するが、対岸に衝突した流れは開始 150 秒後と比べ大きくは拡大していない。しかし、堆積厚は大きくなり平均で 40m の高さを示した。ミュレーション開始から約 300 秒後には、開始 200 秒と比べ流動範囲には大きな拡大が見られず、土砂ダムの土塊厚は埋没した谷の出口付近で最大 53m に達した。開始から 500 秒の時点では主要な崩壊土砂の移動はほぼ終了した（図 2.10）。

図 2.10 に示すように、小林村集落の存在していた位置は、到達範囲に含まれている。小林村集落北には、土塊流動の影響を受けていない場所が存在するが、この場所は谷沿いに流下した崩壊土砂、段丘面を越えた土塊双方の影響を受けにくく、崩壊後のオルソ画像でもそこには植生が残っている。集落を通過した土砂は旗山渓沿いに 1 km ほど流下し停止している。したがって、概ね良好にシミュレートできているといえよう。

ただし、土砂ダムを形成した土塊は、実際の旗山渓右岸に到達した範囲から 250m ほど手前で停止している。これはミュレーションの移動速度が本来よりも遅かった、あるいは作成した崩壊前の DEM の標高が高かったことや、天然ダム形成位置の右岸上部の崩壊地から流出した土砂の影響などが考えられる。



■ Estimated extent area of sediment movement and accumulation

図 2.10 シミュレーション終了時の崩壊土砂の到達範囲

## 2-2 合成開口レーダによる干渉 SAR

### (1) 合成開口レーダによる観測データと干渉手法の概要

#### ① 合成開口レーダの概要

合成開口レーダ（SAR）は、地表にマイクロ波の照射と反射波の受信を連続的に行い、空間上に巨大なアンテナが存在しているかのように、高い分解能で地表の画像を得る技術である。マイクロ波は比較的長い波長の電波であるため、光学センサーとは異なり雲や昼夜関係なく、また雨天など観測領域の天候状況に左右されることなく地表を観測することが可能である（JAXA、2015b）。

一般にレーダにより得られるデータの地上分解能はアンテナの大きさに比例するので、人工衛星を軌道上に移動させながらマイクロ波の送受信を行い、受信した反射波のドップラ効果を考慮した上で合成することにより進行方向の分解能を大きくしている。

図 2.11 に示すように SAR は斜め下方向（サイドルッキング）に向けてマイクロ波の送受信を行う。これは、マイクロ波を真下に向けて照射すると、進行方向に直交する両側に距離の等しい点からの反射波を区別できなくなるためである。

得られた生データはアジマス方向とレンジ方向パルス圧縮すると SLC 画像データ（図 2.22）が得られる。この画像はサイドルッキングレーダであること起因して標高の高い山の斜面などはレンジ方向に倒れ込んでいる。

#### ② 干渉 SAR

干渉 SAR (InSAR) とは、SAR レーダ観測を地表の同一地点に対して 2 回以上実施し、それから得られた 2 枚の SLC 画像を干渉させ位相差をとり DEM の作成、あるいは観測期間に発生した衛星視線方向の地表変動量を面的に計測する技術である（図 2.23）。距離変化の計測精度は一般的に数 cm 程度と考えられる。地表変動を抽出する場合は、図 2.23 に示すように地形が変化したことによる位

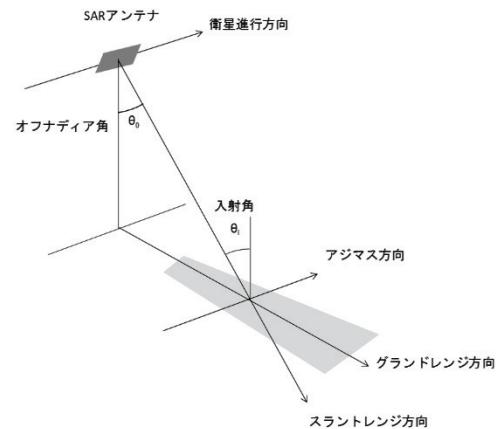


図 2.11 SAR の幾何学的構成

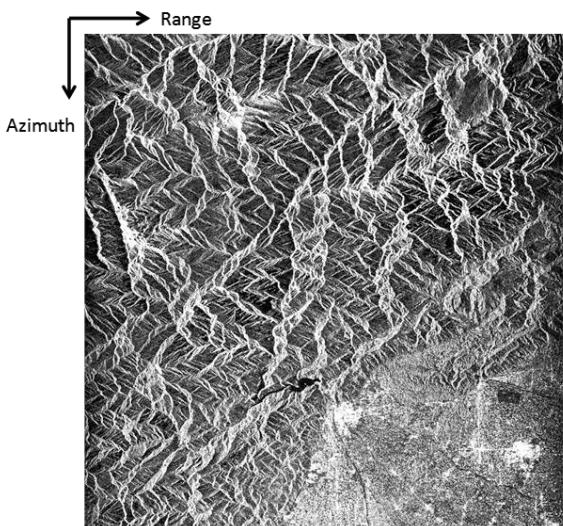


図 2.22 SLC 強度画像  
(成都付近レーダ画像)

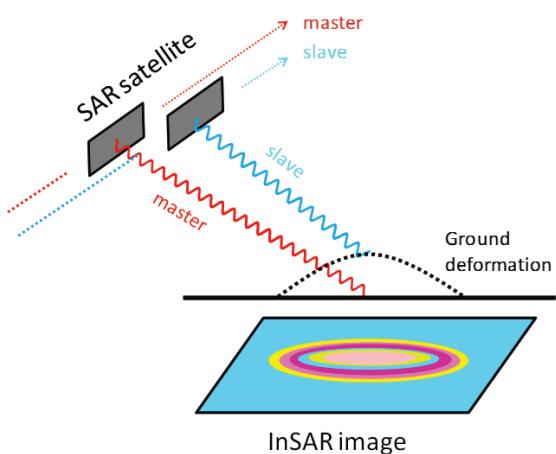


図 2.23 干渉 SAR の概略図  
(先に観測したマスター (master) 画像  
と後で観測したスレーブ (slave) 画像  
による干渉の仕組み)

相情報の変化を干渉画像として得ている（国土地理院、2015）。

### ③ 解析の流れ

解析ソフトウェアはフリーソフトである GMTSAR (Sandwell et, 2011) を用いた。干渉 SAR 解析は、観測されたマスターとスレーブの生データより SLC 画像を作成する。次にスレーブ画像をリサンプリングして、マスター画像と幾何学的に重なるように配置し、初期干渉画像が得られる。

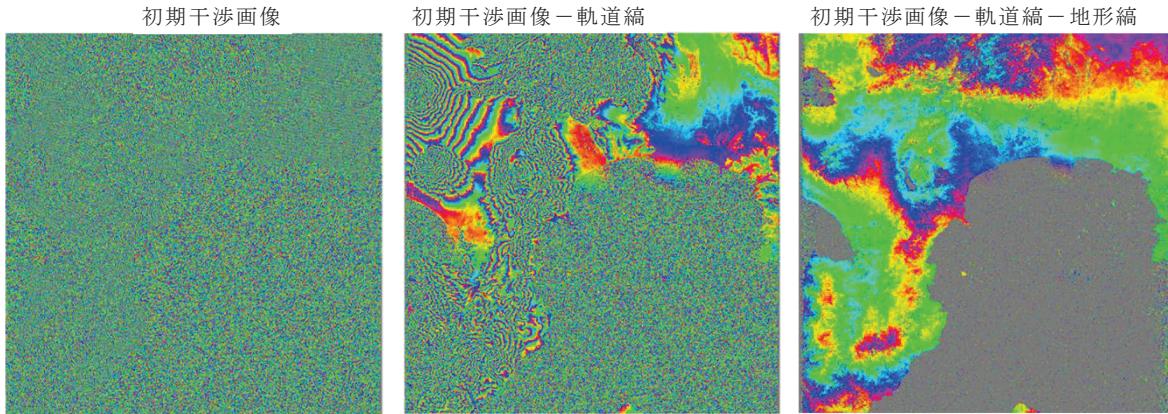


図 2.24 解析で作られる中間画像

この時点では干渉画像には軌道縞、地形縞、変動縞が含まれているため何を表しているのかわからない（図 2.24、左図）。初期干渉画像から軌道縞を除去して地形縞（図 2.24、中図）が得られるので、観測期間内に地表変動がなければ、DEM の作成が可能である。一方、観測期間内に明らかな地表変動がある場合は、軌道縞と地形縞が除去される（図 2.24、右図）。

その後、ノイズを除去するためにフィルタリング処理を行った後、位相アンラッピングを行う（図 2.25）。最後にレーダ座標で表されている画像を地図投影することによって DEM や地表変動を表す干渉 SAR 画像が作成される。

### （2）2008 年四川大地震への適用

#### ① 四川大地震の概要

四川大地震の特徴は、震源が浅く地震動が大きいことや揺れの時間が 90 秒以上と長いことがあげられる。また、地形が急峻な山岳地で地震が発生したため、広範囲にわたり大規模斜面崩壊、地すべり、河道閉塞等の斜面災害が多発した（小長井ら、2008）。これらの山地災害は甚大な被害をもたらすと共に、道路の寸断を引き起こし、被害状況の把握や救援、復旧活動にも大きな支障をもたらした。また、河道閉塞の決壊による二次災害の危険性は現在も続いている。地震による死者は約 7 万人、行方不明者は約 2 万人、負傷者は約 37 万 4000 人であるとされる大震災であった。

この地震は四川盆地の北西側を北東から南西に走る龍門山脈の下を走り、チベット高原側が隆起の逆断層である龍門山断層帯で長さ約 300km の断層帯の一部が動いたことにより起きた。龍門山断層帯は北の方から汶川—茂汶断層、北川断層、彭灌断層の 3 つの主要な断層からなる。このうち主に活動した断層は北川断層と彭灌断層とされている。

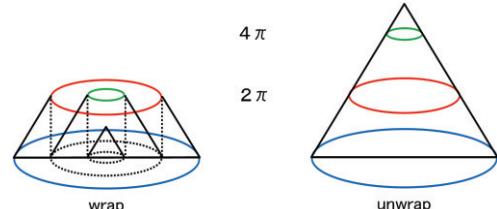


図 2.25 位相アンラッピングの模式図

## ② 干渉 SAR 解析結果

解析には地震前のマスターに 2007 年 12 月 21 日に観測されたデータを、地震後のスレーブには 2010 年 2 月 10 日に観測されたデータを用い、地形矯除去には ASTER-DEM を用いた。解析によって得られた干渉 SAR 画像のアンラップ結果を図 2.26 に示す。寒色系カラースケールは地表面が衛星から離れたことを表し、逆に暖色系は地表面が衛星に近づいたことを表している。

これによれば、汶川－茂汶断層に沿うような変動は見られないのに対して、北川断層に沿うように地表変動が起きていることがわかる。震央のすぐ北では衛星視線方向に 40cm ほど近づいている箇所が見られるが、これは震源に近いことから隆起であると判断される。一方、断層位置と整合しない隆起箇所は、最大でマグニチュード 6.4 の余震が観測されていることから、これらの余震による隆起であると考えられている。

## ② 四川大地震後の干渉 SAR 結果

図 2.26 に地震後の 2008 年 6 月 22 日（マスター画像）と 2009 年 12 月 26 日（スレーブ画像）に観測された SAR データ（飛行方向：Ascending（北行））から得た干渉 SAR 解析結果のアンラップ画像を示す。この期間に大きな地震は発生していないので、赤色系箇所は土砂の堆積などにより地表上昇した箇所（衛星との距離が短くなった）であり、青色系箇所が侵食や土砂の崩落などにより地表低下した箇所（衛星との距離が長くなった）であると判断される。

解析域内の結果を見ると高標高域で大きな変動を示しているが、アクセスは困難で現地確認することは難しい。このような変動を示した理由として、マスター画像が夏季（6 月）、スレーブ画像が冬季（12 月）であることを考慮すると、植生繁茂や降雪による影響が反映した可能性が考えられる。全体的にノイズのようなも

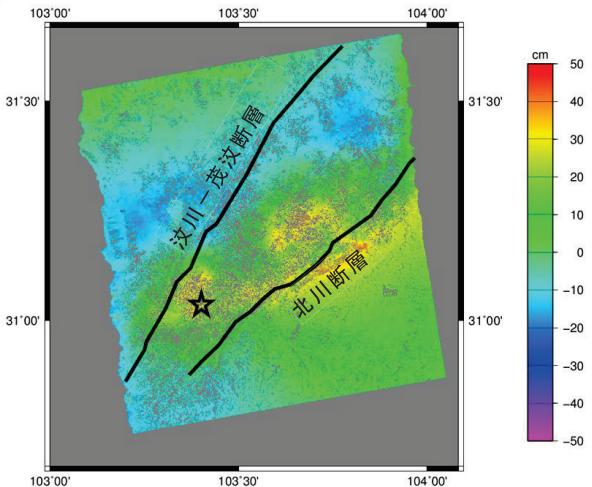


図 2.26 干渉 SAR による地殻変動と断層位置図

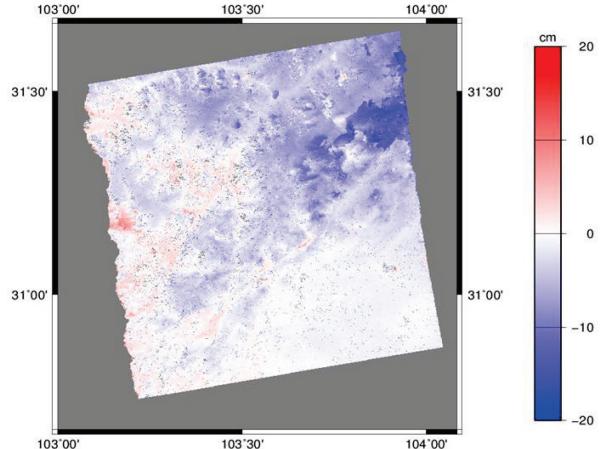


図 2.27 四川大地震後の干渉 SAR 画像  
(2008 年 6 月と 2009 年 12 月)

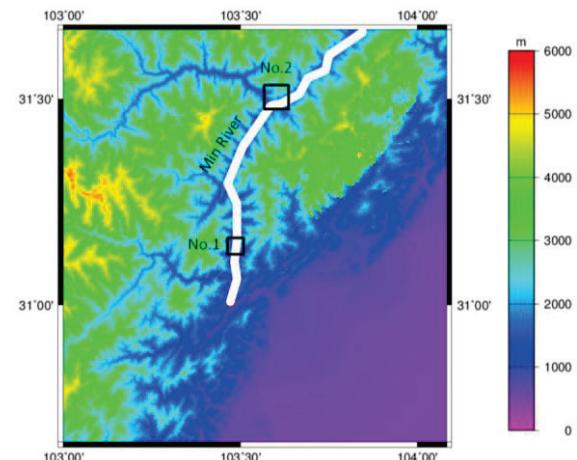


図 2.27 地表変動を現地確認した 2 箇所の位置（白線は岷江）

のも見られるが、岷江や合流する支川の近接する山腹斜面では濃い青色系の箇所と、岷江沿いに薄い赤色系を示す箇所が見られる。岷江沿いの急斜面では、この地震により多くの崩壊地が発生しており、そこでは地震後の豪雨で土砂流出が起こり、これらが河床に運搬され河床上昇を生じていることが考えられる。

### ③ 現地確認した地表変動箇所

図 2.27 に示す干渉 SAR で地表変動が抽出された No. 1 箇所の拡大画像を google 画像と対比して図 2.28 に示す。干渉 SAR 画像が示す 2 箇所の地表低下部（青色系の円マーク）の位置は google 画像では崩壊地に相当し、河床上昇を示す箇所は、岷江の河道部にあたる。したがって、崩壊地面からその後の降雨で土砂流出が生じ地表低下した個所、岷江の河道内では洪水時に上流から流入した土砂が堆積して河床上昇を生じた河床上昇箇所であると考えられる。

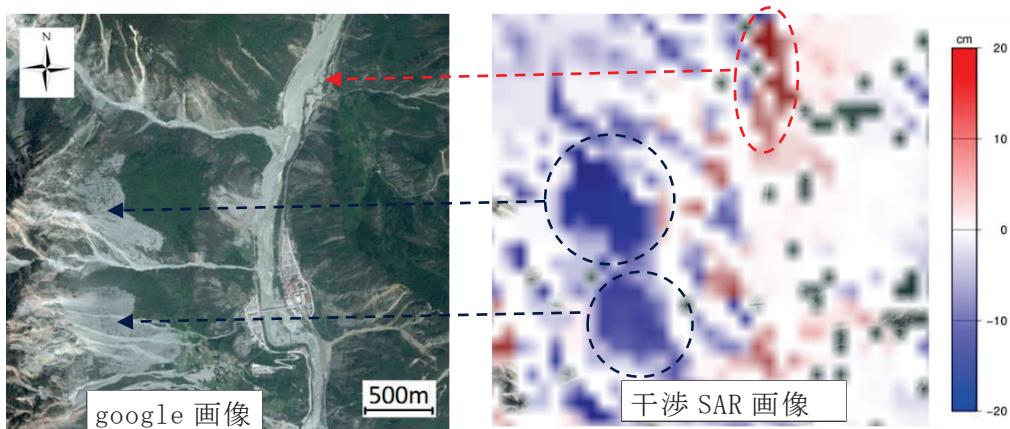


図 2.28 干渉 SAR により抽出された岷江沿いの地表変動（No. 1）

また、地すべりによると考えられる地表変動が確認された箇所（図 2.27, No. 2）を拡大し、google 画像と対比して図 2.29 に示す。干渉 SAR 画像によれば、南西向きに馬蹄形の濃い青色系で囲まれた斜面が明瞭に描かれている。頭部一帯が沈下を示すことは一般的な地すべり地形の特徴であることから、ここが地すべり変動を生じた可能性は高い。したがって、地震後の豪雨などにより下方移動した可能性は高いが、実際に地表変動があったかは現地調査による確認を必要とする。

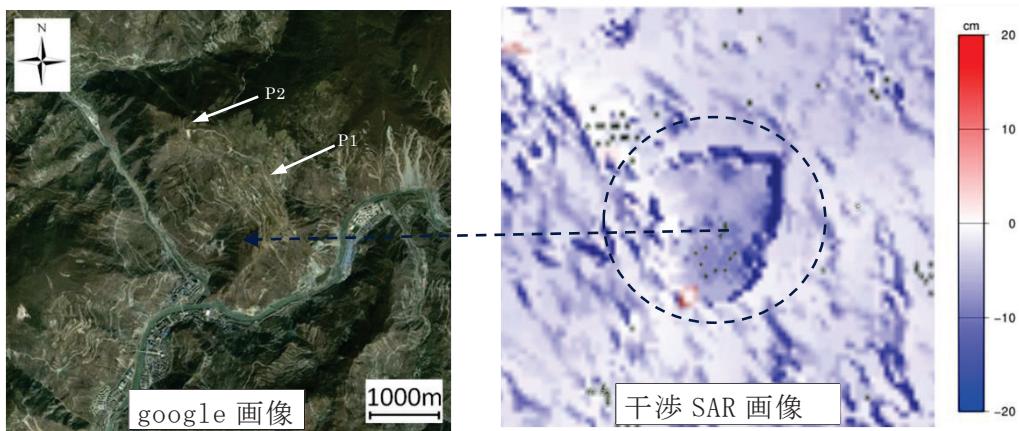


図 2.29 干渉 SAR により抽出された規模の大きな斜面変動（No. 2）

2013年3月に現地を確認したところ、図2.29の干渉SAR画像が示す変動域内では、道路のズレを補修した形跡（図2.29、google画像のP1個所）と、頭部付近にある住宅のコンクリート塀には地盤変動によると思われる亀裂（図2.29、google画像のP2個所）が確認されたことから、当該地区で地すべり変動が生じたことは間違いない。



図2.30 地すべりによる地盤変動が現れた個所

### 3. だいち2号（ALOS-2）による地すべり斜面の変動把握

だいち2号は合成開口レーダ（SAR）に特化した衛星で、高詳細なスポットライトモードが追加されたため、だいち1号のPALSARに比べ分解能は1~3mと向上し、また回帰日数もそれまでの46日から14日と大幅に短縮した改良が行われた。これにより、地表の同一個所を短期間で高詳細に把握することが可能になった。

ここでは、静岡県口坂本地すべりと長野県小塩地すべりを対象に ALOS-2 の SAR データを用いた干渉SARの結果から求めた地すべり変動量と実際のGPS観測結果との比較対比を行ったので、その適用性についていかに紹介したい。

#### 3.1 口坂本地すべり

##### (1) 概要

口坂本地すべりは、静岡市から北西に約25kmに位置する規模の大きい地すべりである。地すべりの頭部尾根は、標高1,300~1,500mの高さでほぼ南北に走り大井川流域と安倍川流域の分水嶺となっている。尾根沿いには笹山構造線が走り、その西側斜面には広い緩傾斜地が連続して存在する。ここでは、昭和63年7月の梅雨期の豪雨によって顕著な変動が認められて以来、県道南アルプス公園線の道路面には、亀裂や対策工である集水井が破断されるような動きがあった。その後、平成23年台風12号の豪雨により、年間10mmを超える移動量が一部の伸縮計で確認されており、継続して地下水排除工を実施している。

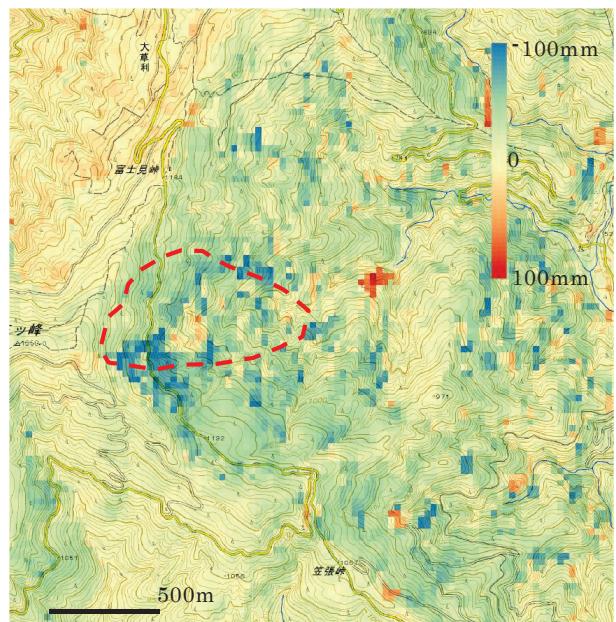


図3.1 口坂本地すべりブロック（赤枠）  
と干渉SAR画像

## (2) 干渉 SAR 解析結果

図 3.1 には、2014 年 9 月 19 日撮影をマスター、2015 年 6 月 26 日撮影をスレーブとして得られた干渉 SAR 結果を地すべりブロックとともに示した。解析に用いたデータは 3m × 3m の平面的精度を有しているが、図 3.1 に示すメッシュ精度は、視覚的な明瞭さを得るためにフィルタリング操作から試行錯誤により 30m × 30m とした。

図 3.1 によれば、地すべりブロック範囲外でも広範囲な地表変動が示されており、とりわけ地すべりブロック右端において、県道が通過する周辺部で沈下が生じていることが示される。一方で、地すべりブロックの中央部の道路直下では地表上昇、ブロック下端を外れた谷部では幅 100m、長さ 150m の範囲で地表が大きく上昇した個所が示されている。

### 3.2 小塩地すべり

#### (1) 概要

小塩地すべりは長野県大鹿村小塩地区の国道 152 線に沿って流れる鹿塩川の左岸側に位置する（図 3.2）。地すべりの源頭部は標高約 1500m、末端部は標高約 900m、上部域は約 1000m の幅を有し、地形図上においても、頭部付近の等高線の膨らみが認められる大規模な地すべりである。当該地区では、大規模な地質構造線である中央構造線が鹿塩川に沿ってほぼ南北方向に走り、東側には三波川変成岩類、西側には領家変成岩類が分布する。

#### (2) 干渉 SAR 解析結果

干渉 SAR 解析に用いた画像は、口坂本地すべりに事例と同じ画像で、2014 年 9 月 19 日撮影をマスター、2015 年 6 月 26 日撮影をスレーブとして解析を実施した。この場合も、干渉図に示すメッシュ精度は、視覚的な明瞭さを得るために実施したフィルタリング操作から 30m × 30m である。

図 3.2 によれば、地すべりブロック範囲内の中央部とその下方右岸端部で 100 から 130mm の地表上昇を示す濃い赤色メッシュが現れている。中央部の赤色部は幅約 300m で、斜面方向に 200m の範囲、右端部は幅約 150m 斜面長 300m の大きさを有しており、地すべり変動は良好に表現されているようである。一方、解析領域全体をみると、全体的に赤色系が目立ち、沈下を示す青色系を示す個所は、図の右上方にまばらに現れるのみである。図 3.1 の口坂本地すべりの場合にくらべ地表変動に関する特徴は異なったものとなった。

### 3.3 干渉 SAR の解析精度

口坂本地すべりと小塩地すべりでは定期的に GPS 観測から得られた変動量が取得されているので SAR 干渉画像より得られた変動量を対比し、その精度を検討することにした。干渉 SAR から得られる変動量は人工衛星と地表面を結ぶ衛星視線方向の成分を示すが、GPS

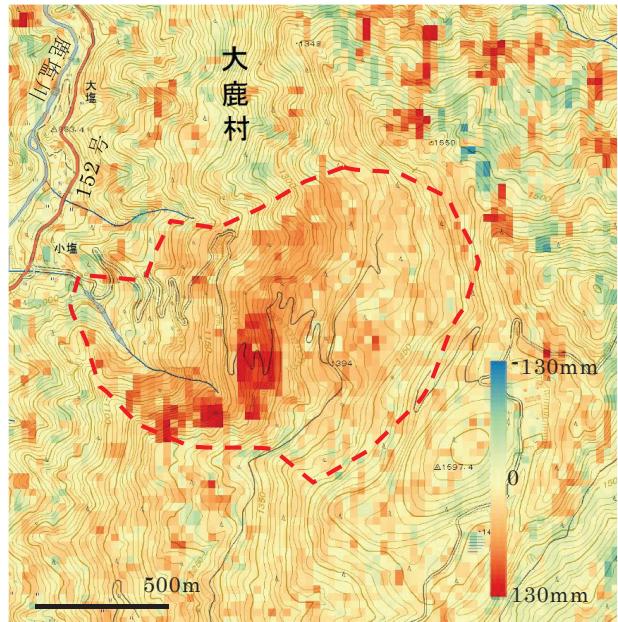


図 3.1 小塩地すべりブロック（赤枠）と干渉 SAR 画像

観測から得られる変動量は X, Y, H 座標成分の変化量であるため、衛星入射角、衛星進行方向方位角などを用いて両者の対比が可能になるよう変換した。

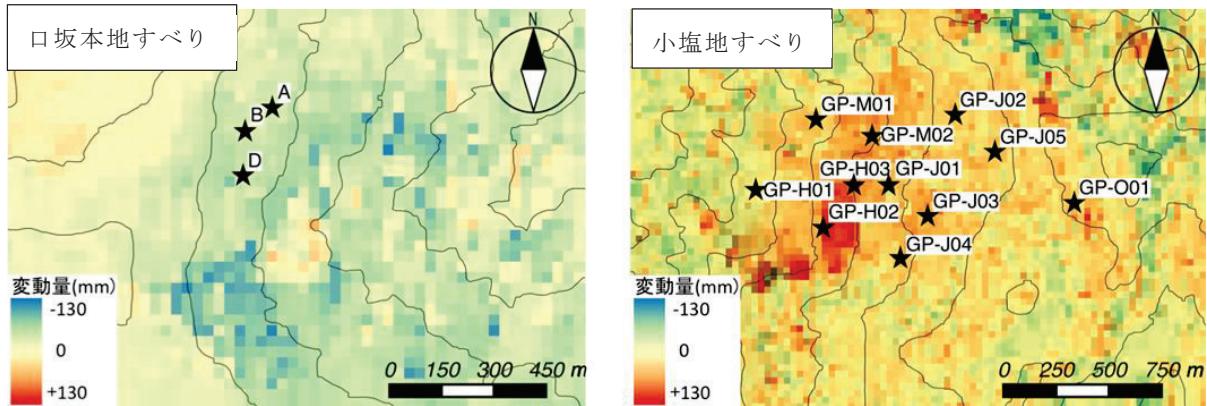


図 3.3 口坂本地すべりと小塩地すべりの GPS 観測地点（等高線間隔は 100m）

地表 GPS 観測期間に干渉 SAR に供するマスターとスレーブ画像の撮影期間が重なるようになり、それぞれの期間で同一場所（GPS 観測地点が所属するメッシュデータを特定し）における両者の変動を対比した。これにより、口坂本地すべりでは GPS 観測 3 箇所、6 時期の SAR 干渉結果（合計 18 事例）を対比し、小塩地すべりでは GPS 観測 11 箇所の観測結果に対して 6 時期の SAR 干渉結果を対比させた（合計 66 事例）。

図 3.4 に対比結果を示す。破線内は GPS 観測による変動量と干渉 SAR 解析による変動量の残差が  $\pm 20\text{mm}$  以内の範囲を示している。これに見るように地表変動量の大小に関わらず、多くのプロットが  $\pm 20\text{mm}$  の範囲に入ることがわかる。図 3.4 によれば、口坂本地すべりの変動量は  $30\text{ mm}$  以内であるが、小塩地すべりの変動量は  $100\text{ mm}$  を超えるものも存在する。これは、地すべりの活動性に加え、口坂本地すべりでは地すべりの変動が比較的緩慢な斜面に GPS 観測地点が置かれているのに対して、小塩地すべりでは地すべり変動の活発な箇所に GPS 観測地点が置かれているのが大きい。

#### 4. おわりに

陸域観測技術衛星（だいち 1 号、2 号）の合成開口レーダの干渉 SAR 解析を通して、このデータの活用には、光学センサーによる詳細な地表状況データを併用する必要性があると考えている。合成開口レーダは、データ取得上の精度を上昇させてもバラツキなどを除去するためのフィルタリングは避けられない。その結果、地表における期待通りの詳細さは失われてしまう。さらに、この解析で大きな変動を示したメッシュ群が実態を示すか否かは、実際に現地確認するまで不明である。したがって、光学センサーによる地表の判読は欠かすことができない。この点、だいち 1 号に搭載された PRISM

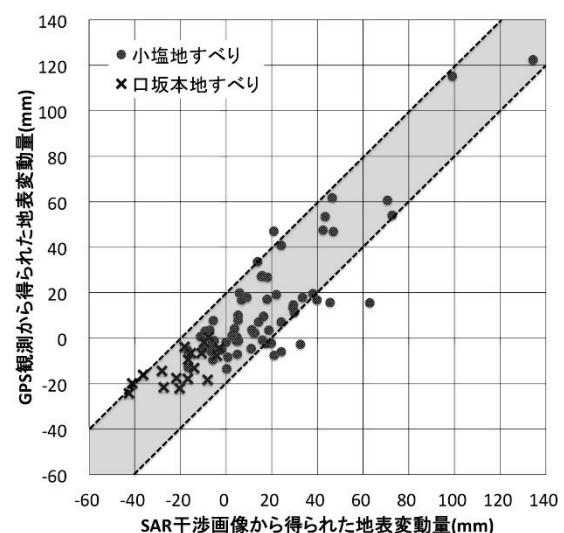


図 3.4 地表 GPS 観測による変動量  
と SAR 干渉結果の対比

センサーは地表を詳細に表現して、対応する 3 次元座標も空間的に細かく、詳細な DEM の取得が可能であった。このことから、今後のだいち 3 号には是非とも光学センサーの搭載を依頼したいと思う。

#### 謝辞

口坂本地すべりの GPS 観測による地表変動データは静岡県交通基盤部河川砂防局砂防課から提供していただいた。また小塩地すべりの GPS 観測による地表変動データは中部森林管路局南信森林管理署から提供されたものである。貴重なデータの提供に厚く御礼申し上げます。

#### 引用文献

- JAXA(2015a) : ALOS について - 衛星の概要と目的(2015)、ALOS 解析研究プロジェクト EROC、  
[http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/about/about\\_jindex.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/about/about_jindex.htm)
- 小長井一男, 土屋 智, 石川 芳治, 汪 発武 (2008) : 2008 年 5 月 12 日四川省汶川地震と土砂災害、・生産研究, 60 卷 6 号, 3-8
- 山田正雄, 王功輝, 蔡飛 (2010) : 中国をよく知る地すべり研究者の四川大地震と山地災害、理工図書、198p
- 山川毅, Fraser C.、Hanley H. (2002) : 高解像度 IKONOS 衛星画像を用いた精密 3 次元計測、写真測量とリモートセンシング、Vol. 41、36-43
- 堤大三, 藤田正治, 宮本邦明, 今泉文寿, 藤本将光, 国領ひろし, 泉山寛明 (2011) : 台湾高雄県小林村の深層崩壊発生機構に関する解析、土木学会論文集 (水工学)、Vol. 67 (4)、721- 726
- Cheng-Min H.、Edward C.、Adnan A. H. (2010) : Web 2.0 and Internet Social Networking: A New tool for Disaster Management? - Lessons from Taiwan、BMC Medical Informatics and Decision Making、DOI: 10.1186/1472-6947-10-57.
- Sassa, K., Nagai, o., Solidum, R., Yamazaki, Y., Ohta, H. (2010) : An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte Landslides, Vol. 7, 219-236
- JAXA(2015b) : 陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」(ALOS-2)、  
<http://www.satnavi.jaxa.jp/project/alon2/>
- 国土地理院 (2015) : 干渉 SAR-宇宙から地球の変動を見る -  
<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/gsisar/gsisar.html>

成構因調查

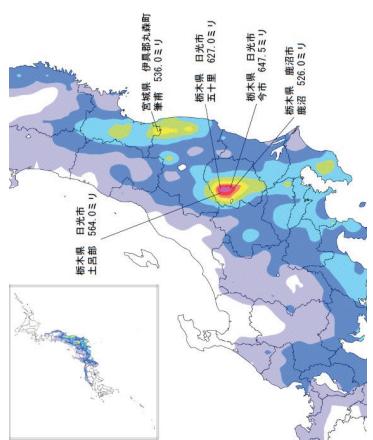
本日の話題提供の内容

# 平成27年9月関東・東北豪雨における災害

団長	落合 博貴	(支部長、日本森林技術協会)
副団長	櫻井 正明	(幹事長、山地防災研究所)
	蔡 飛	(群馬大学)
	林 一成	(奥山ボーリング)
	若井 明彦	(群馬大学)

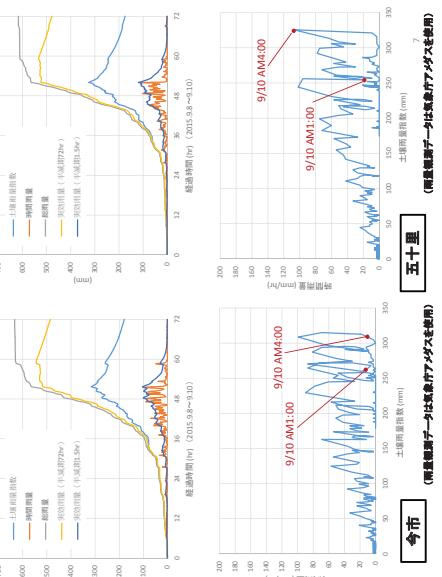
——栃木県内の土砂災害を中心にして

日本地すべり学会関東支部 災害調査団



2015.9.7～9.11の総降水量の分布

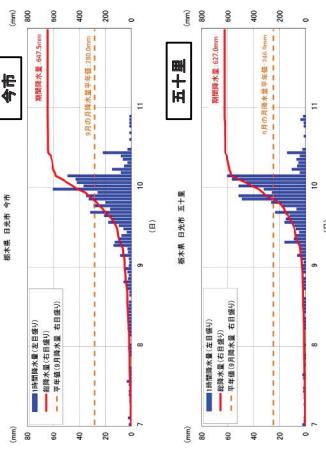
## (1) 被災箇所の分布等



## がけ崩れ（ローム質土壤）の一例

- (1) 被災箇所の分布等
- (2) 被災事例
  - 一 芹沢地区(日光市)
  - 一 白石川地区(日光市)
  - 一 赤川地区(那須塙原市)
- (3)まとめ

2



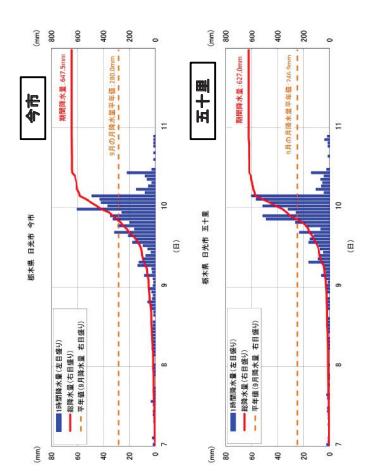
気象庁2015.9.14報道参考資料を基  
2015.9.7～9.11の降水履歴（今市、五十里）



宅地斜面の崩壊の一例

櫻井 正明（幹事長、山地防災研究所）  
蔡 飛（群馬大学）  
林 一成（奥山ボーリング）  
若井 明彦（群馬大学）

第1回現地調査 平成27年11月28日（土）	栃木県日光市芹沢地区
第2回現地調査 平成27年12月20日（日）	栃木県日光市岩崎地区



気象庁 2015.9.14報道発表資料を抜粋





11

## (2) 被災事例

### —芹沢地区(日光市)

深刻な被災箇所の例 (■)



提供：国土交通省日光砂防事務所 (着井が加筆)



以降、一つの沢について詳述

出口付近の幅: 約10m



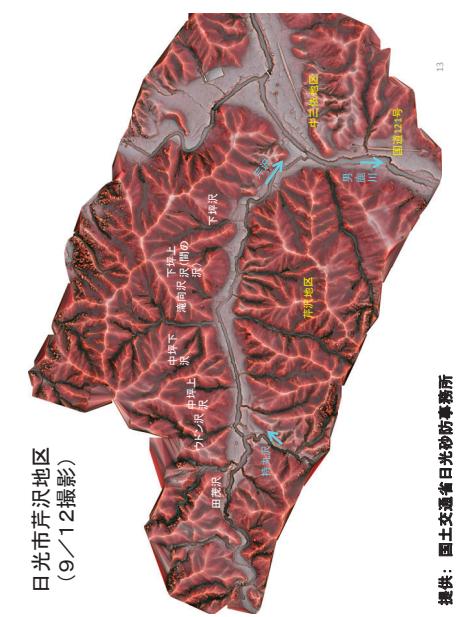
田茂沢第二砂防堤壙



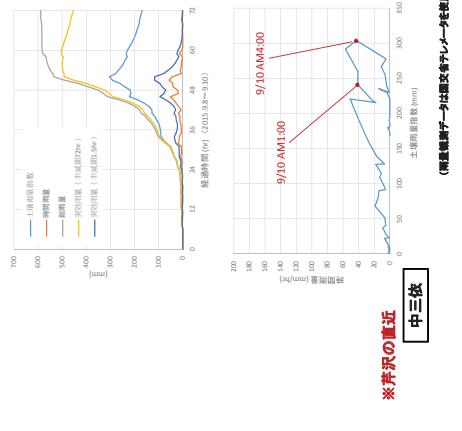
対岸の長食が普しい箇所



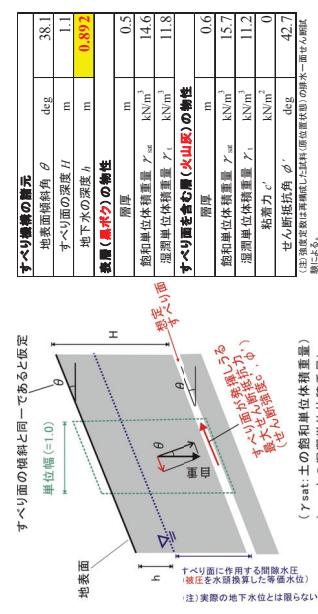
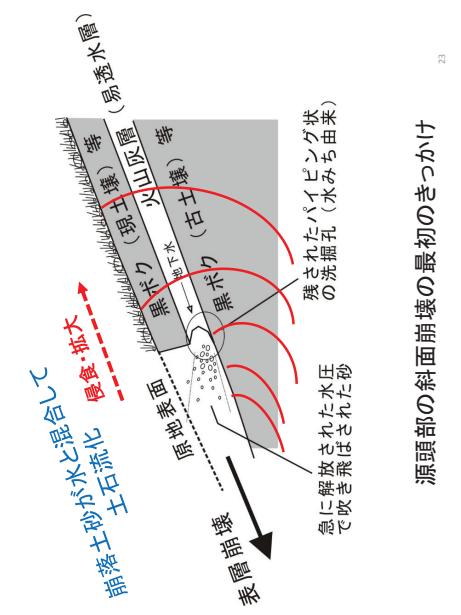
下流→  
(五十里ダム方向)



提供：国土交通省日光砂防事務所

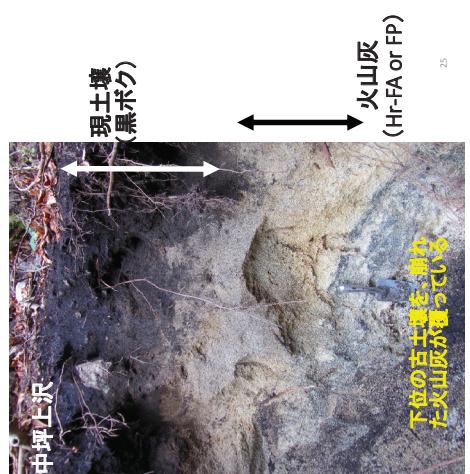
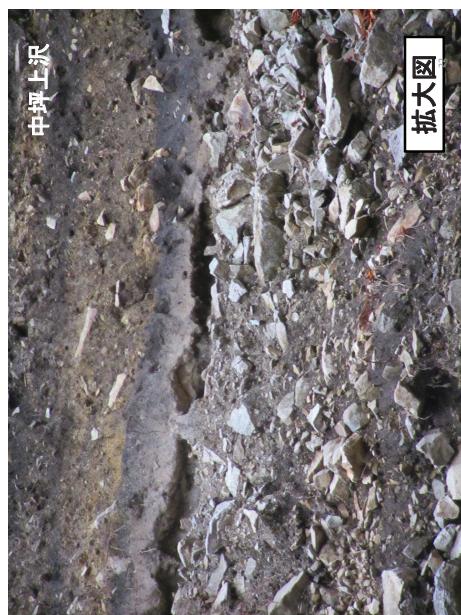


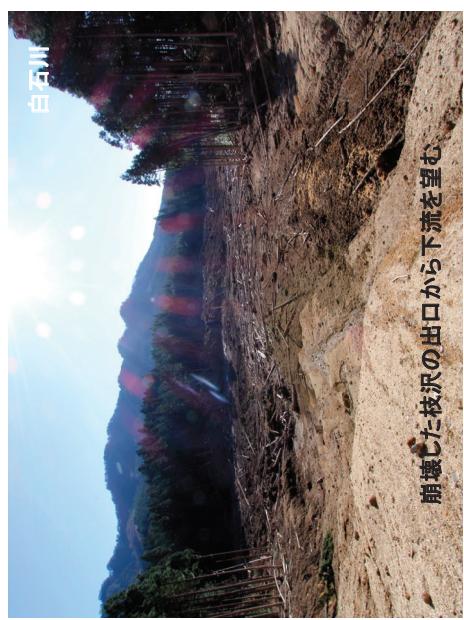
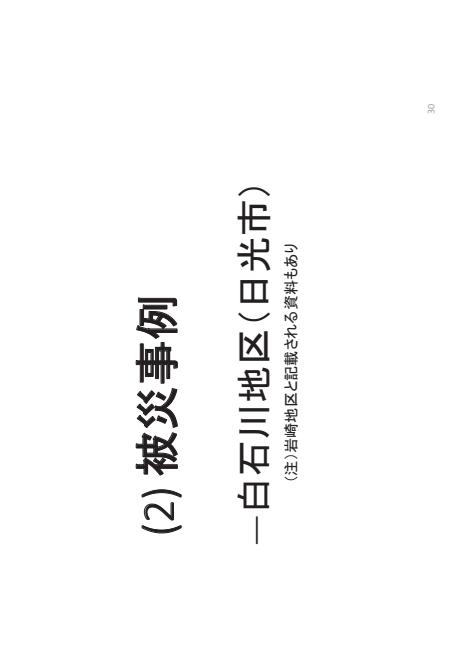
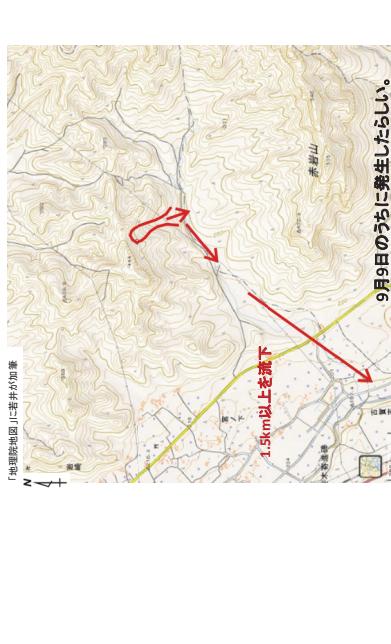
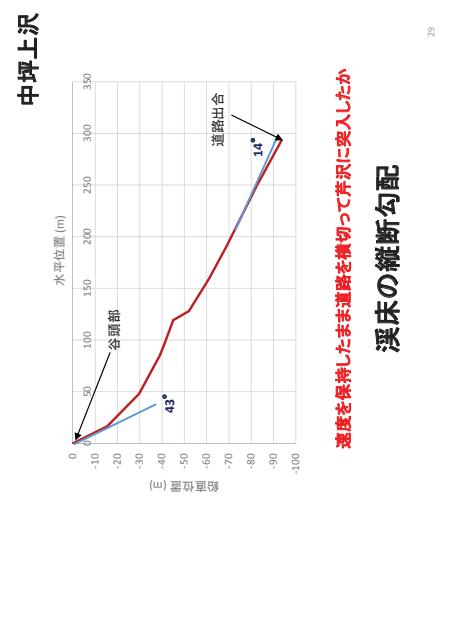
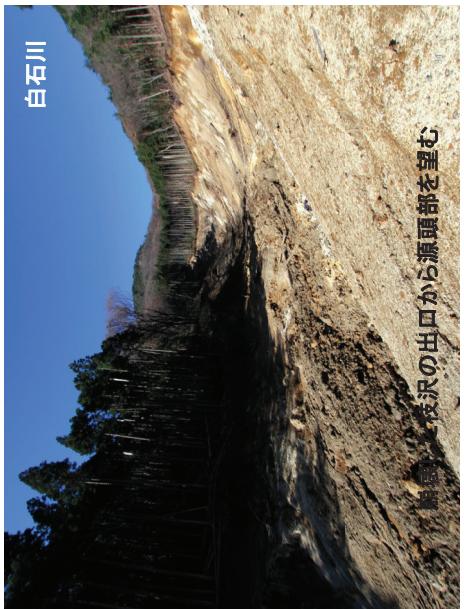
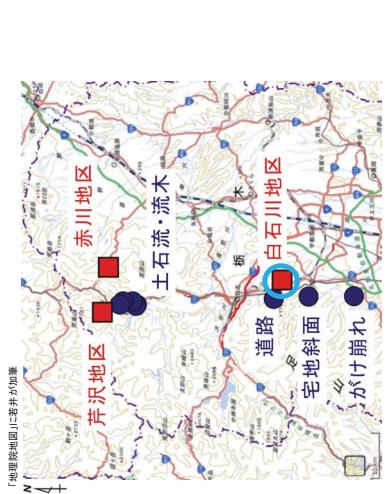
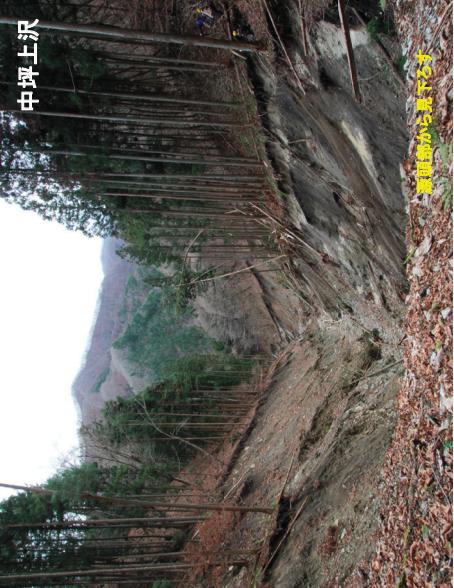
※芹沢の直近  
中三段

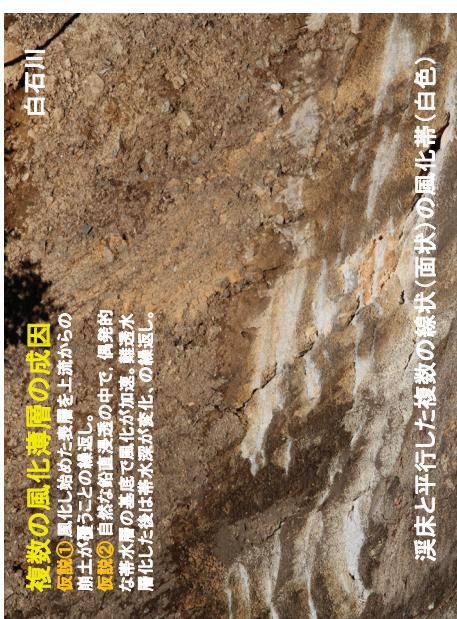
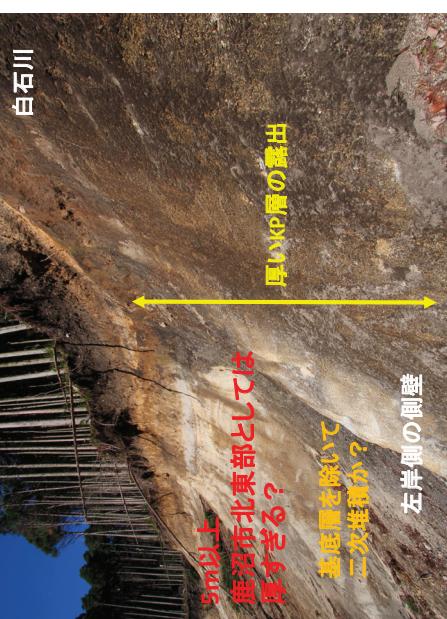


知見①：平常時(地下水位なし)には、 $f_s=1.18$   
知見②：火山灰層に帶水すると、層下端から21cmの水頭で崩壊する( $f_s=1.0$ )

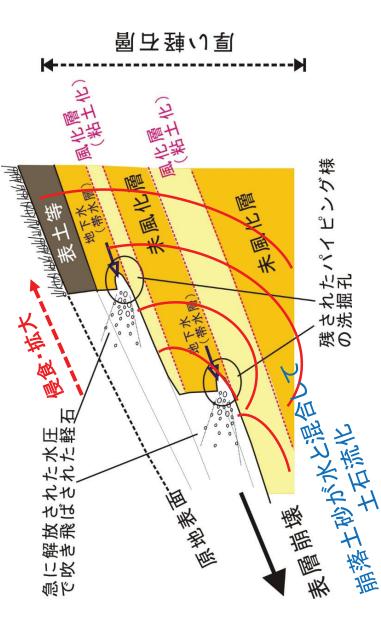
半無限斜面仮定に基づく安定計算(火山灰層すべり仮定)の結果



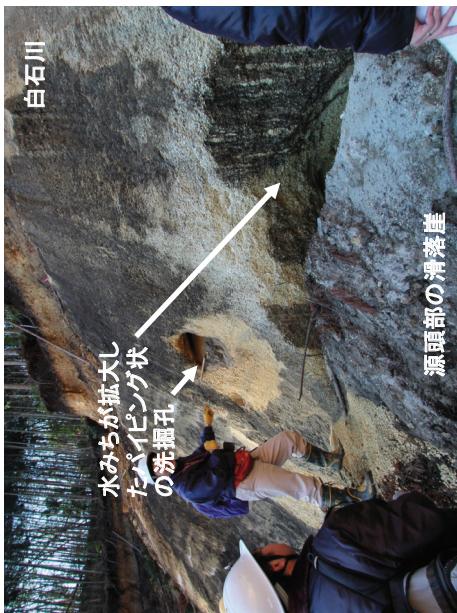




白石川 溪床と平行した複数の線状(面状)の風化帶(白色)



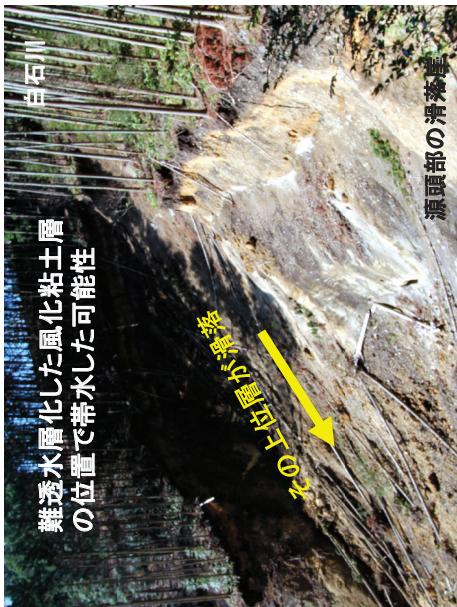
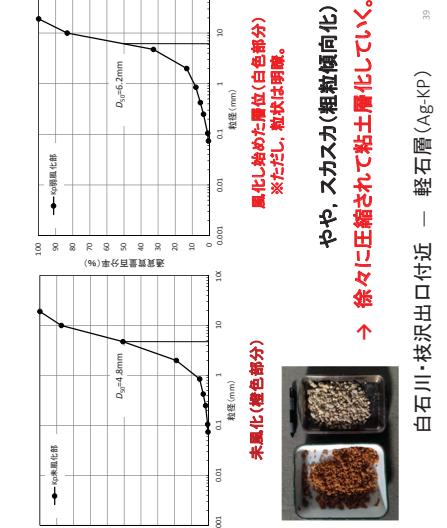
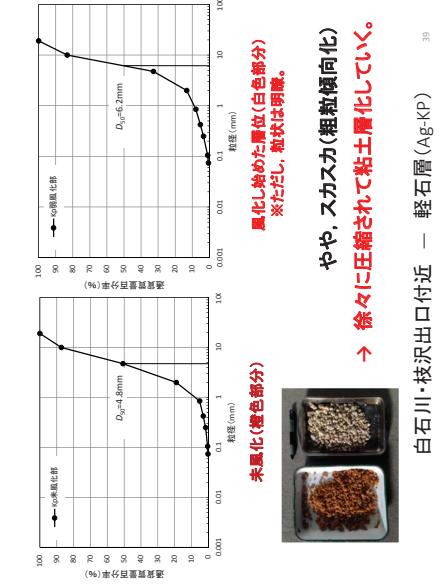
源頭部の斜面崩壊の最初のきっかけ



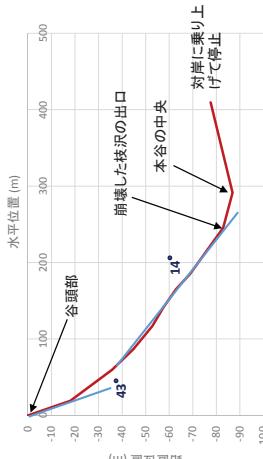
白石川 源頭部の滑落崖



源頭部の滑落崖のより下方を望む



白石川 源頭部の滑落崖



速度を保持したまま本谷に突入したか  
渓床の縦断勾配

## (2) 被災事例

—赤川地区(那須塩原市)  
(注)上塙原地区と記載される資料もあり

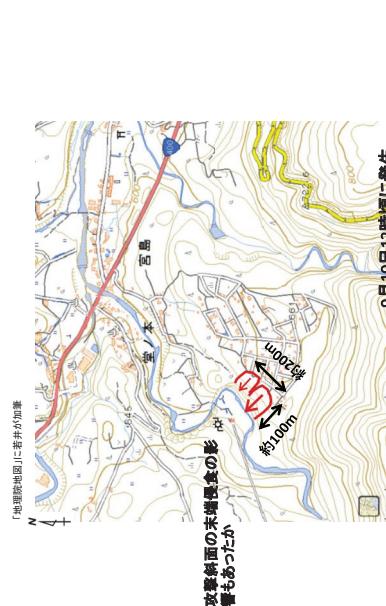


深刻な被災箇所の例 (■)

47



対岸(左岸)より地すべりを見上げる



赤川地区(上塙原地区)の地すべり

48



地すべり土壌内の立木は後方傾斜

49



壁頭の下立層はシルト岩ないし砂岩

50



滑落崖の上位層は干燥まじり

## (3)まとめ

- 近年まれに見る雨量があった。
- テフラを挟む斜面では、その成層構造および透水性のコントラストによって平常時から“水みち”が発達している。
- 集中豪雨時には、これら易透水層に地下水が集中し、その水圧上昇が帶水薄層より上位の層の崩壊をもたらす。
- こうした機構で土石流が発生した。

## 謝辞

今回の調査にあたり、被災箇所の分布および個別の被災事例などに關する貴重な資料を提供されたいた、国土交通省関東地方整備局ならびに同日光砂防事務所、林野庁関東森林管理局、および栃木県の関係者の皆様方に、謹んで御礼を申し上げます。

※赤川地区的考察は除く

# 雨量観測は新時代へー先端的気象レーダーによる降雨観測ー

防災科学技術研究所 気象災害軽減イノベーションセンター  
岩波 越 (iwanami@bosai.go.jp)

## 1. はじめに

地球温暖化に伴い大雨の頻度の増加が予測されるなか、気象庁アメダスデータによれば、1時間雨量 50 mm 以上の「非常に激しい雨」の年間発生回数は、1976 年以降 39 年間で約 1.5 倍に、また、日雨量 400 mm 以上の大雨の年間発生回数は、約 3.9 倍に増加している（気象庁 2015）。

2008 年夏に発生し、それぞれ 5 人が犠牲になった神戸市都賀川水難事故及び豊島区雑司が谷下水道工事事故は、短時間の大雨に対する都市の脆弱性を露呈し、「ゲリラ豪雨」という言葉が世の中に広がった。その後も局地的大雨による被害が各地で発生しており、都市河川の急増水や浸水による被害の軽減・防止のために、局地的大雨に関する情報が求められた。このような局地的大雨等に対して適切な水防活動や河川管理を行うために、2008 年から国土交通省によって X バンドマルチパラメータレーダー（以下、MP レーダーと記す）の整備が全国の主要都市域を中心進められ、現在は XRAIN と呼ばれる 38 基からなるネットワークが運用されている（国土交通省）。

2011 年 9 月台風第 12 号に伴う大雨による和歌山県那智勝浦町などでの水害、土砂災害（死者・行方不明者 98 名）、2013 年 10 月台風第 26 号災害（伊豆大島などで死者・行方不明者 43 名）、2014 年 7 月南木曽町読書地区での土石流災害（死者 1 名）、8 月の広島豪雨災害（死者 75 名）と大雨を誘因とした大規模な土砂災害が頻発しており、土砂災害の軽減・防止のためにも大雨に関する情報は極めて重要と考えられる。これらの災害時の特徴的な雨量は、順に 78 時間で 1,600 mm、6 時間で 525 mm、2 時間で 120 mm、2.5 時間で 200 mm であり、災害は必ずしも長雨によるものではなく、2 時間程度の短時間の強雨でも発生している。

本稿では、X バンド MP レーダーによる雨量観測の原理、有効性、観測事例、課題等について述べる。

## 2. 気象レーダー

気象レーダー (RADAR: Radio Detection and Ranging) は回転するアンテナから電波を発射し、雨滴により散乱されて返ってきた電波を受信して、雨雲の位置や雨の強さを知ることができるリモートセンサーである。雨量を直接測定できる機器として雨量計があるが、測れるのは雨量計の設置「点」だけで、雨水をためる必要があるため、測定は普通 5 分から 10 分間隔になる。一方、気象レーダーは光速で進む電波を使っているので、数 10 秒で 100 から数 100 km 四方の広範囲の雨の強さを「面」的に測ることができる。

機能面では、在来型レーダー、風を測定できるドップラーレーダー、

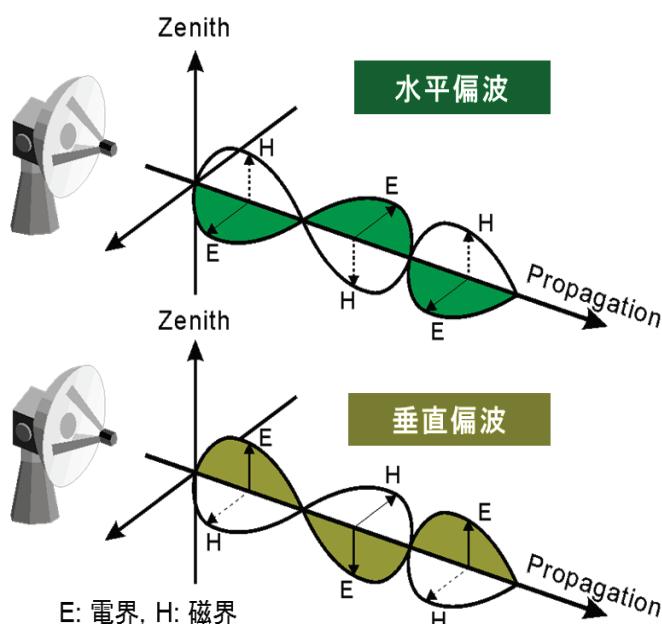


図 1 MP レーダーが送信する水平偏波と垂直偏波の模式図。

そして MP レーダーと発展してきた。MP レーダーは複数の偏波や波長（周波数）を用いて観測を行い、多くの項目（パラメータ）を測定できるレーダーの総称だが、図 1 に示すとおり、電界  $E$  が水平方向と垂直方向に振動する 2 種類の電波（水平偏波と垂直偏波）を、同時に送信・受信する直交 2 偏波ドップラーレーダーをこう呼ぶことが多くなっている。

なお、本稿では引用文献の題名などを除き「レーダー」と統一して表記する。

## 2.1 在来型気象レーダーによる降雨強度推定

在来型気象レーダーは、水平偏波のみを送受信して、雨滴に当たって返ってくる「電波の強さ（受信電力）」すなわち受信電波の振幅情報から雨の強さ（降雨強度： $R$  mm/h）及び雨量を推定している（図 2(a)；岩波・前坂 2013）。観測量としてはレーダー反射因子  $Z$  ( $Z_H$ ) が用いられる。 $Z$  はもともとレイリー領域（レーダー波長より粒子がはるかに小さい）にある降雨に対して定義されたもので、観測体積内に存在する全雨滴粒子の直径の 6 乗の総和として以下のように与えられる。

$$Z = \int_{D_{min}}^{D_{max}} D^6 N(D) dD \quad (1)$$

ここで、 $N(D)$  は雨滴粒径分布と呼ばれる粒径の関数であり、 $N(D)dD$  は単位体積中において直径が  $D$  と  $D+dD$  の間にあらう雨滴の個数を示す。 $D_{min}$ 、 $D_{max}$  は粒径の最小値、最大値である。また、レーダー方程式から、

$$Z = C \frac{P_r}{P_t} \quad (2)$$

である。ここで、 $P_t$ 、 $P_r$  は送信及び受信電力、 $C$  はレーダーの性能、水滴の複素屈折率と観測距離によって決まる量である。

落下する雨水量のフラックスである降雨強度  $R$  は、直径  $D$  の雨滴の終端速度を  $w(D)$  とすると、

$$R = 0.6 \times 10^{-3} \pi \int_{D_{min}}^{D_{max}} D^3 w(D) N(D) dD \quad (3)$$

と表せる。 $Z$  と  $R$  は粒径  $D$  とべき乗則で関係づけられ、両者は雨滴粒径分布  $N(D)$  によって結びつけることができる。これがいわゆる「 $Z-R$  関係」であり、雨滴粒径分布にマーシャル・パルマ一分布（指数分布；Marshall and Palmer 1948）を仮定すると、よく知られた関係式  $Z = 200R^{1.6}$  が導かれる。しかし、実際の雨滴粒径分布の変動は非常に大きく、これが  $Z-R$  関係式による降雨強度推定の最大の誤差要因になっている。また、強度信号の絶対較正の難しさ、降雨減衰による過小評価、雹の混在による過大評価、地形によるビームの部分的遮蔽による過小評価などにより、地上雨量をレーダー反射因子から正確に見積もるのは容易ではなく、現実的には雨量計の測定値を使って補正することが必要であった。正確に測れる雨量計と広い範囲を測れる気象レーダーの利点を組み合わせた優れた方法と言えるが、測定や補正に時間がかかり、情報更新が遅れてしまうという難点がある。このことは、急激な発達を特徴とする局地的大雨の監視や避難勧告等の発令判断には不都合である。

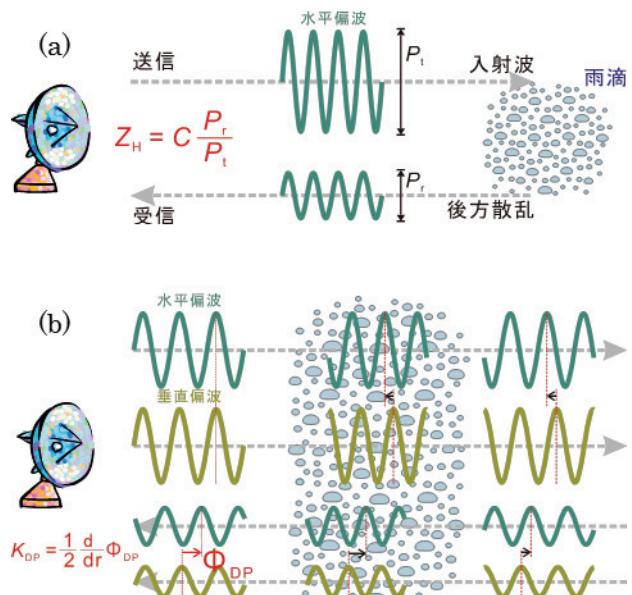


図 2 (a) レーダー反射因子と (b) 偏波間位相差  
(岩波・前坂 2013) .

## 2.2 MP レーダーによる降雨強度推定

一方、MP レーダーは返ってくる電波の強さではなく、水平偏波と垂直偏波が雨雲の中を通過する時のわずかな「伝わり方（伝搬速度）の違い」（偏波間位相差  $\Phi_{DP}$  deg）を利用して雨の強さを見積もる（図 2(b)）。この  $\Phi_{DP}$  は、雨滴が横長の形をしていることによって生じる。雨滴は「涙」や「しずく」のイラストによく見られる上部が尖った縦長の形ではなく、「お供え餅」のような横につぶれた形をしている（Pruppacher and Beard 1970）。落下中に空気の抵抗を受けるために、小さい雨滴は球に近く、大きな雨滴ほど扁平になる。MP レーダーはこの雨滴の形を利用して降雨強度を正確に推定する。

具体的には、 $\Phi_{DP}$  の距離 ( $r$ ) 微分で定義される比偏波間位相差（あるいは偏波間位相差変化率） $K_{DP}$  deg/km を求めて、比偏波間位相差と降雨強度の関係（「 $K_{DP}-R$  関係」）を用いて推定する。また、 $K_{DP}$  の感度未満の弱い雨に対しては、前述の  $Z-R$  関係が利用される。Park *et al.* (2005a, b) が関東地方におけるディストロメーターによる雨滴粒径分布観測とそれに基づく散乱計算から導出した降雨強度推定式は以下のようになる。

$$R = \begin{cases} 7.07 \times 10^{-3} Z^{0.819}, & K_{DP} \leq 0.3 \text{deg/km} \\ 19.63 K_{DP}^{0.823}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

比偏波間位相差はレーダー反射因子ほど雨滴粒径分布の変化によらず、降雨強度との間にばらつきの小さい対応関係がある（Maki *et al.* 2005）。また、降雨減衰によって電波の強さが弱められても、この情報は得られるので、正確に降雨強度を推定できる。このため、雨量計による補正を必要とせず、気象レーダーが本来持つ一瞬にして広範囲の雨を捉える利点が活かせることになる。特に災害を引き起こすような強い雨に対しても精度がよいことが活用上の特長である。

図 3 は、X バンド MP レーダーと在来型の C バンドレーダーによる雨量の推定結果を比較したものである。27 の降雨事例における 1 時間雨量を対象にしている。いずれも過小評価傾向があるが、X バンド MP レーダーの方が、より広い雨量範囲で精度良く、ばらつきも小さく推定できている。

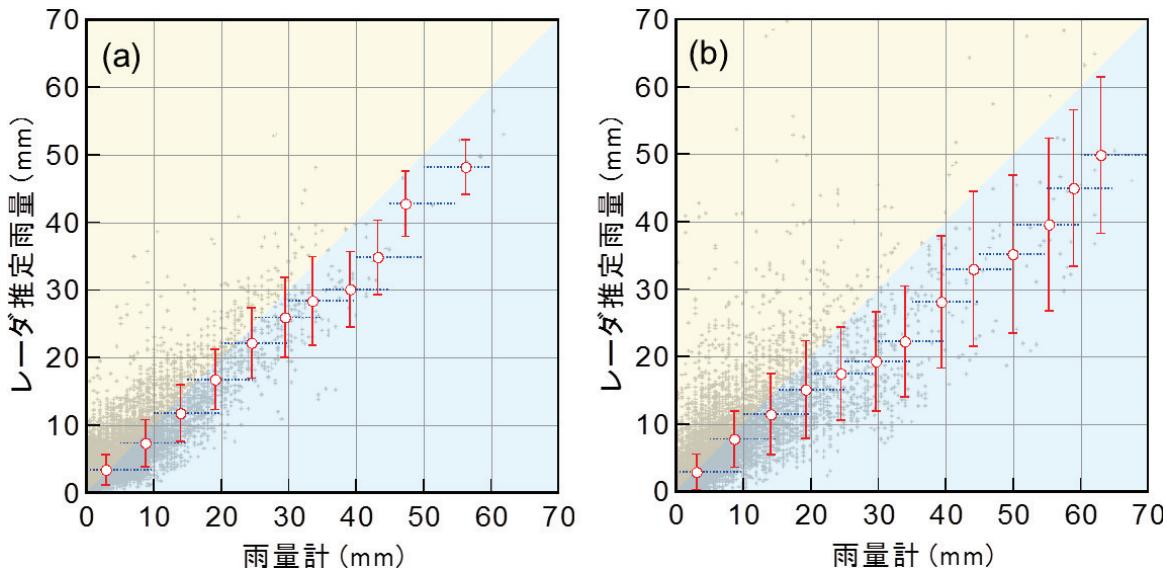


図3 (a) X バンド MP レーダーと (b) 在来型 C バンドレーダーによる雨量の推定結果。2007～2009 年の 27 降雨事例（日）について、0～10, 10～20, 20～30, ... と 10 mm ずつ階級を区切って雨量計観測値と比較・計算したレーダー推定雨量の平均と回帰直線からの誤差。

## 3. レーダーネットワーク

気象レーダーとして活用されている電波は主に S バンド（波長約 10 cm, 代表的観測半径 460 km）、C バンド（約 5 cm, 250 km）、X バンド（約 3 cm, 80 km）のセンチメートル波である。

周波数（波長）による特徴として、高い周波数（短い波長）ほど、降雨による減衰が大きいこと（Wexler and Atlas 1963），観測範囲が狭いこと、設備が小型でコストが小さいことが上げられる。Xバンド気象レーダーは降雨減衰が非常に大きいため、従来、降雨監視を主目的とした気象レーダーには適さないと考えられていた。現業用の気象レーダーにSバンド（米国など）とCバンド（日本や欧州）が使われているのはこのためである。しかし、前章で述べた比偏波間位相差  $K_{DP}$  の降雨強度に対する感度は、S, CバンドよりXバンドの方が高く（Bringi and Chandrasekar 2001），比較的弱い雨から災害を引き起こすような強い雨まで正確な推定が可能になったため、これまでの評価は一変した。

一般に、現業用気象レーダーネットワークは、山地の遮蔽を考慮の上、なるべく少ない台数で必要な観測範囲をカバーするように、言い換えると1台のレーダーによる観測範囲がなるべく広くなるように配置されてきた。しかし、地球の曲率のために、電波を水平に発射しても遠方では観測高度が地表付近から離れ（距離250 km先で観測高度は約3.7 km），地上雨量の推定が困難になる。また、気象レーダーは幅1 deg程度のビーム状の電波を送信するので、遠方ほどビームは広がり、空間分解能が粗くなる（距離57 kmで幅約1 km）。

Xバンド気象レーダーは降雨減衰が大きいため、非常に強い雨の後ろ側で、電波が完全に消散して観測不能になることが時々発生するという欠点がある。この電波消散領域を検出して無降雨域と区別することは、比偏波間位相差を用いた減衰量の評価により可能ではあるが（岩波ほか 2007），これを避けるために、重点観測領域を複数台のレーダーで異なる方向から重複観測できるような稠密な配置をすることが求められる。これにより、欠点を補うのみならず、災害に直接的に関わる地表付近を高い空間分解能で観測すること、さらには複数台のドップラー速度観測値から風向風速を求めることも可能になる。コストが小さく設置が容易なことも、この稠密配置のネットワーク観測に好都合である。

#### 4. XバンドMPレーダーネットワークによる観測例

防災科研は、2000年にXバンドMPレーダーを開発導入し、降雨強度をより正確に推定する研究を進めてきた（Park *et al.* 2005a, b）。2003年からは神奈川県海老名市にこのレーダーを設置して、暖候期の降雨連続観測を開始した。さらに、2006年以降、防衛大学校、中央大学、日本気象協会等と協力して、首都圏に研究用のXバンドレーダーネットワーク（略称X-NET）を構築して、観測データをリアルタイムで防災科研（茨城県つくば市）に集めて処理し、豪雨・強風を500 m格子、5分間隔のきめ細かさで監視して、リアルタイムに情報発信する技術を開発した（Maki *et al.* 2005b；防災科学技術研究所）。2008年8月5日に東京都豊島区雑司が谷で下水道工事中の作業員5名が犠牲になった局地的大雨が発生した。海老名市に設置したXバンドMPレーダーによる観測で、雑司が谷上空の、降り始めから10分で40 mm/h、25分で100 mm/hを越える急激な発達を記録し（近くの雨量計観測値とよく一致），大手町と雑司が谷の間の5 km程度のごく狭い範囲に1時間雨量60～100 mmの大雨が集中したことを明らかにした（Kato and Maki 2009; Kim *et al.* 2012）。いわゆる「ゲリラ豪雨」を正確に捉えることに成功したと言える。

これらの成果を受けて国土交通省はXバンドMPレーダーネットワークの整備を2008年から開始し、防災科研は特許2件を含むデータ処理アルゴリズムを実装した（Maesaka *et al.* 2011）。この国土交通省XバンドMPレーダーネットワーク（XRAIN）の本運用と数値データ配信事業は2013年度に開始され、世界に先駆けて、250 m格子、1分間隔のきめ細かく高精度の雨量情報のリアルタイム配信が実現された。

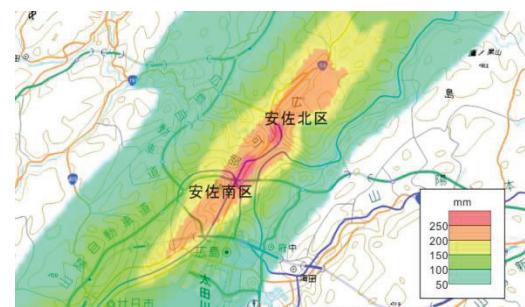


図4 XRAIN及び気象庁レーダーの観測データから解析した8月19日18時から20日06時までの12時間積算雨量の分布図。背景地図は地理院地図（標準地図）を使用。

その観測範囲は全政令指定都市を含み、人口カバー率は 90 %を越えた。

続いて、2014 年 8 月の広島豪雨の観測事例を示す。図 4 は XRAIN 及び気象庁レーダーの観測データから解析した 8 月 19 日 18 時から 20 日 06 時までの 12 時間積算雨量の分布である。広島市では 200 mm を越える積算雨量が解析され、その領域は南西から北東の走向を持つ長さ 23 km、幅 5 km の線状の領域に集中していた。また、土砂災害が発生した安佐南区と安佐北区周辺では、12 時間で 250 mm を越える積算雨量が解析された。国土地理院が撮影した斜め空中写真から判読した土石流や斜面崩壊の場所は、200 mm 以上の降雨域に概ね含まれていた。

XRAIN は 1 分毎に地上雨量分布を出力するだけでなく、5 分間隔で 3 次元観測を行っている。図 5 は広島地域の 2 台の X バンド MP レーダーで観測されたレーダー反射因子の 3 次元分布を土砂災害発生地点の南東上空から見た様子である。図 4 で示した豪雨域は、図 5 に見られる南西から北東の走向を持つ長さ約 100 km の線状降水システムに伴い発生した。線状降水システムは形成初期にはゆっくりと東進したが、20 日 01 時 30 頃から 04 時 30 分頃にかけて、土砂災害が発生した広島市上空に停滞した。この線状降水システムの風上側では、新しい降水セルが発生し風下側へ移動するバックビルディング型の積乱雲の形成が観測された。

## 5. おわりに

在来型レーダー及び MP レーダーによる降雨強度推定方法とその観測例、レーダーネットワークの意義について述べた。XRAIN は日本全国を覆っているわけではないが、国土交通省は全国をカバーする既存の C バンドレーダーを、更新時に MP レーダー化し始めている。また、XRAIN のデータは気象庁でも活用され、2014 年 8 月からは「高解像度降水ナウキャスト」の配信が開始された。全国を対象として 250m 格子（陸上）の降雨強度分布と 30 分先までの予測を 5 分間隔で知ることができる。今後も、XRAIN と C バンドレーダーネットワークの相補的な合成の高度化は重要な課題である。

X バンド MP レーダーの実用化により、時間的にも空間的にもきめ細かく、高精度の雨量情報のリアルタイム配信が実現され、雨量観測は新しい時代に入ったと言える。雨量計が数 100 m 間隔に配置されたことに匹敵する。既に、競争的資金課題や国土交通省の事業等で実証実験も始まっているが、このような高時空間分解能で精度の高い雨量分布がリアルタイムで得られることを前提として、降雨予測や浸水被害、中小河川氾濫等の都市型水害予測、鉄道・道路の運転・通行規制の方法のみならず、土砂災害の予測手法（三隅ほか 2011）の開発、改良が加速することが期待される。

## 謝辞

利用した XRAIN データは、国土交通省より提供されたものである。利用したデータセットは、国土交通省「X バンド MP レーダーに関する技術開発コンソーシアム」及び国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」：データ統合・解析システム（DIAS）の枠組みの下で収集・提供された

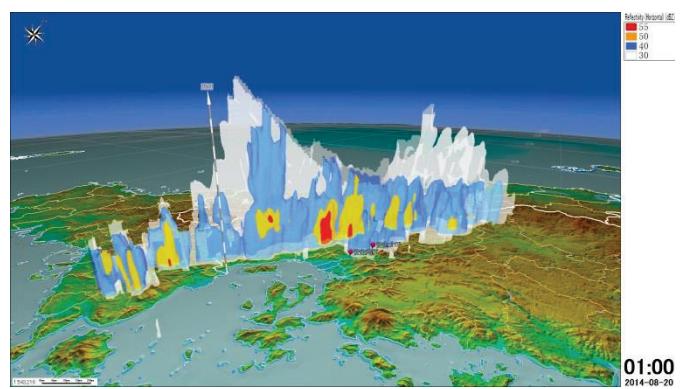


図 5 8 月 20 日 01 時に XRAIN で観測されたレーダー反射因子の 3 次元分布を、土砂災害発生地点の南東上空から見た様子。白・青・黄・赤の等値面はそれぞれ 30, 40, 50, 55 dBZ のレーダー反射因子（降雨強度換算で、それぞれ 3, 12, 49, 100 mm/時）を示す。図中の赤球は、土砂災害が発生した安佐南区と安佐北区の位置を示す。図中の矢印は高度 15 km の高さを示すスケールである。地図情報は国土地理院地図（色別標高図）を利用。

ものである。

X バンド MP レーダーによる降雨量推定手法に関する研究は防災科学技術研究所のプロジェクト研究において水・土砂防災研究ユニット（当時）のレーダーグループにより行われた。図の作成について協力を得た前坂 剛博士、櫻井南海子博士に謝意を表する。

## 参考文献

- 防災科学技術研究所 : X バンドマルチパラメータレーダ, <http://mp-radar.bosai.go.jp/>.
- Bringi, V. N. and V. Chandrasekar, 2001: Polarimetric Doppler Weather Radar – Principles and applications. Cambridge Univ. Press, pp.539.
- 岩波 越・前坂 剛, 2013 : X バンド MP レーダーによる降雨強度の推定. ながれ, **32**, 313-318.
- 岩波 越・前坂 剛・木枝香織・真木雅之・三隅良平・清水慎吾, 2007 : X バンド偏波レーダーによる降雨観測における簡易減衰補正. 日本気象学会 2007 年度春季大会講演予稿集, **91**, 128.
- Kato, A. and M. Maki, 2009: Localized heavy rainfall near Zoshigaya, Tokyo, Japan on 5 August 2008 observed by X-band polarimetric radar - Preliminary analysis -. *SOLA*, **5**, 089–092.
- Kim, D.-S., M. Maki, S. Shimizu, and D.-I. Lee, 2012: X-band dual-polarization radar observations of precipitation core development and structure in a multi-cellular storm over Zoshigaya, Japan, on August 5, 2008. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**, 701-719.
- 気象庁, 2015 : 気候変動監視レポート 2014. 31.
- 国土交通省 : 川の防災情報. <http://www.river.go.jp/kawabou/ipXAreaMap.do>.
- Maesaka, T., M. Maki, K. Iwanami, S. Tsuchiya, K. Kieda, and A. Hoshi, 2011: Operational rainfall estimation by X-band MP radar network in MLIT, Japan. *Proc. 35th Conf. on Radar Meteor.*, 142 ([http://ams.confex.com/ams/35Radar/webprogram/Manuscript/Paper191685/35RADAR\\_Maesaka.pdf](http://ams.confex.com/ams/35Radar/webprogram/Manuscript/Paper191685/35RADAR_Maesaka.pdf)).
- Maki, M., S.-G. Park, and V. N. Bringi, 2005a: Effect of natural variations in rain drop size distributions on rain rate estimators of 3 cm wavelength polarimetric radar. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 871–893.
- Maki, M., K. Iwanami, R. Misumi, S.-G. Park, H. Moriwaki, K. Maruyama, I. Watabe, D.-I. Lee, M. Jang, H.-K. Kim, V. N. Bringi, and H. Uyeda, 2005: Semi-operational rainfall observations with X-band multi-parameter radar. *Atmos. Sci. Letters*, **6**, 12–18.
- Marshall, J. S. and W. M. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.*, **5**, 165-166.
- 三隅良平・真木雅之・岩波 越, 2011 : レーダ雨量に基づく土砂災害の発生評価—都市域を対象に, 神奈川県の場合—. 天気, **58**, 697-704.
- Park, S.-G., V. N. Bringi, V. Chandrasekar, M. Maki, and K. Iwanami, 2005a: Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X-band wavelength. Part I: Theoretical and empirical basis. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **22**, 1621–1632.
- Park, S.-G., M. Maki, K. Iwanami, V. N. Bringi, and V. Chandrasekar, 2005b: Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X-band wavelength. Part II: Evaluation and application. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **22**, 1633–1655.
- Pruppacher, H. R. and K. V. Beard, 1970: A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **96**, 247-256.
- Wexler, R. and D. Atlas, 1963: Radar reflectivity and attenuation of rain. *J. Appl. Meteor.*, **2**, 276-280.

# 茨城県大会で実施した崩壊実験の報告 — 関東支部斜面モニタリング研究会 —

Overview of large-scale model test in annual Landslide society

(Research group for slope monitoring in Kanto branch)

酒井 直樹 (防災科学技術研究所)

Naoki SAKAI (National research institute for earth science and disaster resilience)

キーワード：斜面崩壊、降雨、斜面モニタリング

Keywords : slope failure, rainfall, slope monitoring

## 1. はじめに

近年、伊豆大島（2013年）や広島（2014年）の土砂災害では、数時間にわたり時間雨量80mm超の強い雨が降り続き災害が発生している。このように多様化してきた雨に対して発生する土砂災害に対して、今後どう備えればいいのか、このような課題を解決するために、実用的な斜面モニタリング技術の普及を目指し、地すべり学会関東支部において研究会を立ち上げ、活動が行われてきた。本報告ではその一部である実験の概要を報告する。

## 2. 実験概要

ここで紹介する大型模型実験は、防災科学技術研究所の大型降雨実験施設を用いて行なったものである。今回の実験では、降雨時に発生する斜面崩壊でも一般的な表層崩壊を模擬している（図1参照）。また、実験では日本地すべり学会との共同研究によりセンサーを取り扱っている企業複数社の参加により各種センサーを設置した。

## 3. 実験条件と結果の概要

模型斜面形状は、総斜面長は7m、幅9m、土の厚さ1m、高さ5m、天端1.5mで傾斜は40°である。枠組みは鋼製で土台はソイルセメントが作られた大型模型盛土斜面（図2参照）である。斜面底面は非排水とし、斜面法先底面には排水礫層を設け、常時ポンプを稼働し排水することで、排水条件とした。

本実験試料は、0.1~1mm程度の粒径を主にした川砂を使用した。作製した盛土の層厚は、モルタル底面に対して垂直に1.0mとした。斜面の作



図1 実験開始風景

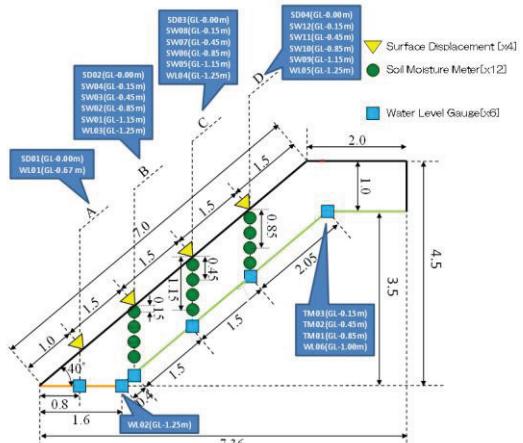


図2 センサー設置位置

製方法は、法先から鉛直方向に0.15mずつ盛土を行い、所定の密度(湿潤密度で約1.6cm/m<sup>3</sup>)になるように人力で踏み固めた。

センサ配置位置は図2に示す。斜面の変位の計測には、インバー線式伸縮計（地表面変位SD,4個）を設置した。斜面の水分挙動の計測には、ゲージ式圧力計（地下水位WL, 6個）、土壤水分計（体積含水率SW, 12個）を設置した。計測サンプリング時間は10秒でおこなった。降雨条件は、

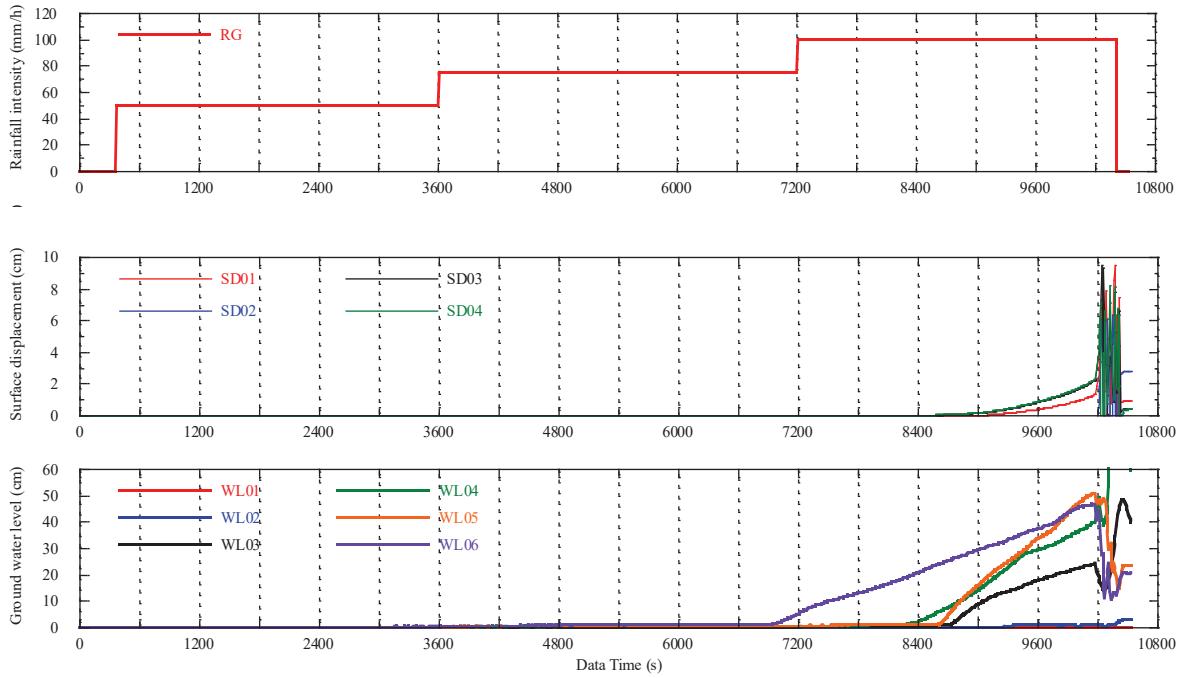


図3 ①降雨, ②地表面変位, ③地下水の時系列データ

50, 75, 100mm/h と段階的に上げていき、崩壊時までに、総雨量 214.2mm) となった。

実験結果の時系列のグラフを示す(図3参照)。実験では、降雨開始時を、ゼロ秒とし、変位はその時点での値を初期値とした。地下水は、7000秒付近で、WL06 が上昇を始めている。これは、斜面天端付近の平坦部で厚さが 1m 程度のため早く上昇を始めたと考えられる。その後斜面部の WL03, WL04, WL05 の 3カ所とも、8400 秒付近で上昇を始め、一定の早さで上昇し続けている。これは崩壊まで続き、最終的には 30~50cm 程度まで上昇した。そのときの地下水の変化を断面図で示すと図4のようになる。斜面下部では、排水が行われているため、WL01, WL02 ではほとんど上昇が見られない。

一方で、模型の表面上の変化(図5)をみてみると 10200 秒前では、ほとんど表面上変化がみられない。次に、10200 秒を越えると、斜面頭部に横に広がった亀裂が発生し急激に広がり崩壊に至った。

#### 4. おわりに

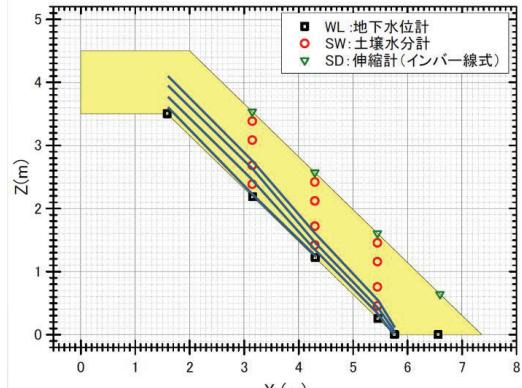


図4 崩壊直前の地下水位変化(10分ごと)



図5 崩壊後の土塊形状

今後は、地すべり学会として、このような各企業が参加しセンサー開発や斜面監視技術の実用化の流れを進めていきたい。

# (公社) 2014年8月22日 日本地すべり学会の現地見学会における斜面崩壊実験

## 加速度センサ杭を用いた計測結果

○小野田敏 (アジア航測株式会社), 渡邊聰 (復建調査設計株式会社)

Satoshi Onoda, Satoshi Watanabe

### 1. まえがき

アジア航測㈱と復建調査設計㈱は、公益社団法人日本地すべり学会第53回研究発表会及び現地見学会（2014年8月19~22日、茨城県つくば市）において実施した斜面崩壊実験に参加した。

本実験は日本地すべり学会関東支部斜面モニタリング研究会が主体となり、当社を含む協力企業が参画し実施したものである。本報告は、同崩壊実験結果のうちアジア航測、復建調査設計が設置した加速度センサの計測結果についてまとめたものである。

### 2. 実験の目的と背景

実験の大きな目的は2013年10月の東京都大島土砂災害等を鑑み、豪雨時の斜面崩壊が実際にどのくらいの雨量でどのような挙動で崩壊に至るのかを明らかにすることにある。そのため各観測計器を設置した人工的な斜面に人工降雨を降らし崩壊までの挙動を様々な計器により計測し、それらのデータを斜面モニタリング研究会で共有して分析・考察することにより、我が国の防災・減災に寄与することを考えている。具体的な目標としては、崩壊までの挙動や前兆現象をどのような機器（観測精度、観測間隔、経済性）で把握することが可能なのか、前兆現象から避難等の閾値はどのように設定できるのかがある。そのため我々は「比較的安価な計器を用い、直接に情報を必要としているユーザにスマートフォン等で情報配信し、住民等の自らの避難行動を促して災害軽減に役立たせる」というコンセプトで開発中の三軸加速度センサ（傾斜角測定分解能0.04度）+無線通信（au）装置を使用し、崩壊実験に参加した。



図1 計器の設置状況  
中央部と手前の黒杭（頭部が赤色）



図2 崩壊状況  
頭部は円弧すべり状で後方に傾動

### 3. 使用計器と設置状況

使用した計器は簡易に設置できる3軸の加速度センサを埋め込んだ情報杭（株式会社リプロ社製）である。1分間隔毎に計測データを自動取得し、電話回線で送信する。崩壊実験は時間雨量50mm、75mm、100mmの雨を降らし約3時間弱で崩壊に至ったが、その間は1分間毎に崩壊時までのデータを取得し、配信した。閾値としては杭が絶対値で5°以上傾いた時点で警報アラームを発信するようにした。設置状況等は図3、図4に示した。

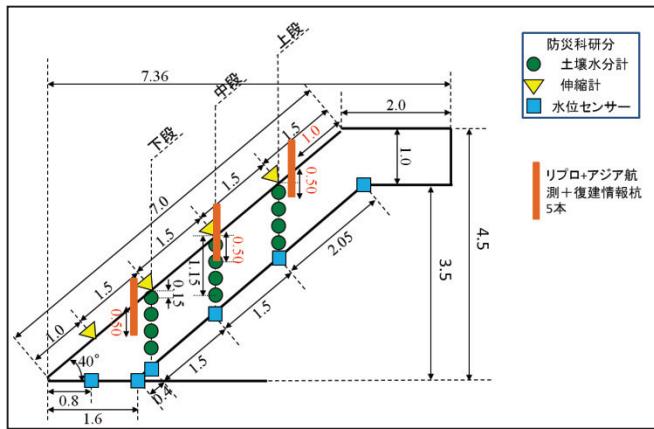


図3 計器配置断面図 (単位m)

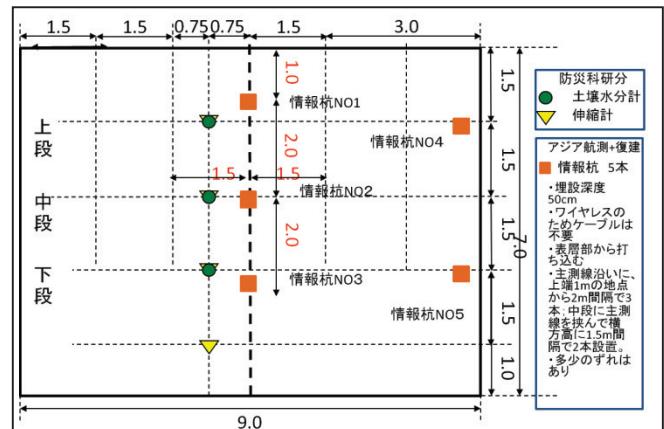


図4 計器配置正面図 (単位m)

### 4. 計測結果

計測結果を以下に示した。各図は経過時間と加速度センサ三成分を合成した傾きを経過時間毎に示した。計測は1分毎なので急激な崩壊現象は3分以内に終了したと考えられる。また崩壊に至るまでは±1°程度のノイズ的なデータとなり、挙動そのものではなくシステムの実用精度を表していると考えられる。また閾値の1分間に5°はNo1杭等に関しては妥当であったが、No4杭に関しては累積でも約4°であり、スマートフォンの警報アラームを鳴らすことができなかった。

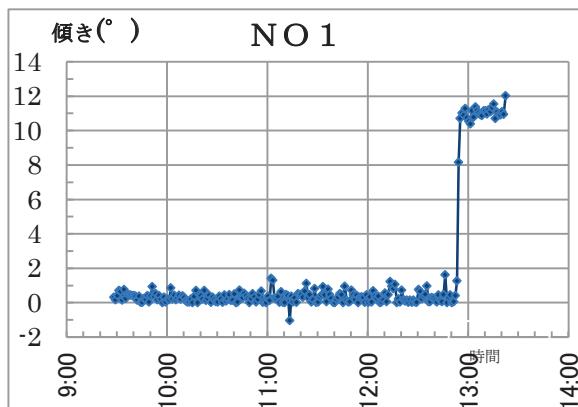


図5 N o 1 杭 (崩壊地内頭部)  
毎分の変位累積グラフ

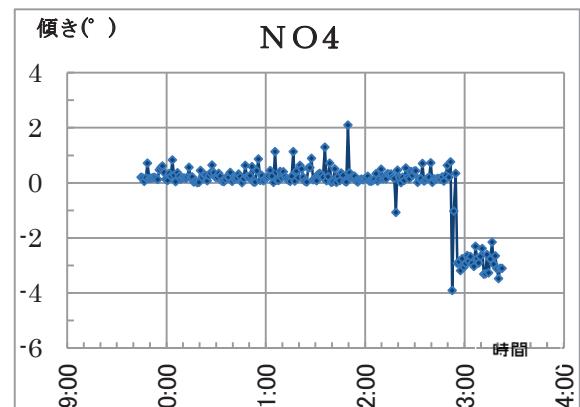


図6 N o 4 杭 (崩壊地内側部)  
毎分の変位累積グラフ

## 5. まとめと課題

今回の崩壊実験結果と課題を以下にまとめる。

- ① 大きく動いた崩壊そのものは補足することができた。
- ② 急激に活動した時間は3分以内であった。
- ③ 崩壊時の挙動そのものも、より多くの配置により可能となる。
- ④ 崩壊に至るまでの挙動はmmオーダで推移しており、前兆現象等を移動量だけから把握する
- ⑤ 閾値や計測インターバルは可変にし、遠隔で操作できることが望ましい。
- ⑦ 今回の崩壊規模での挙動把握には秒単位の計測間隔が望まれる。
- ⑧ 閾値は三方向の合成ベクトルの累積移動量5°としたが、崩壊現象を捉えるという目的では概ね妥当であった。ただし。設置位置によってはより小さな閾値を検討する必要がある。
- ⑨ 崩壊前の避難を促すためには、移動量以外にも着目する必要がある。
- ⑩ 設置に際しては7cm角のプラスチック杭を用いたが、より小型することが望まれる。
- ⑪ より大きい崩壊や地すべり等での挙動を本センサで計測する必要がある。
- ⑫ より安価で小型のセンサも検討することが望まれる。

なお、これらを踏まえて2015年10月に実施した崩壊実験では計測間隔約1秒単位での小型センサを採用し、加速度等を用いた閾値も検討している。また、今回と同様のセンサを用いて実際の地すべり地においても計測しており、伸縮計の計測結果等と対比検討もしている。<sup>1)</sup>

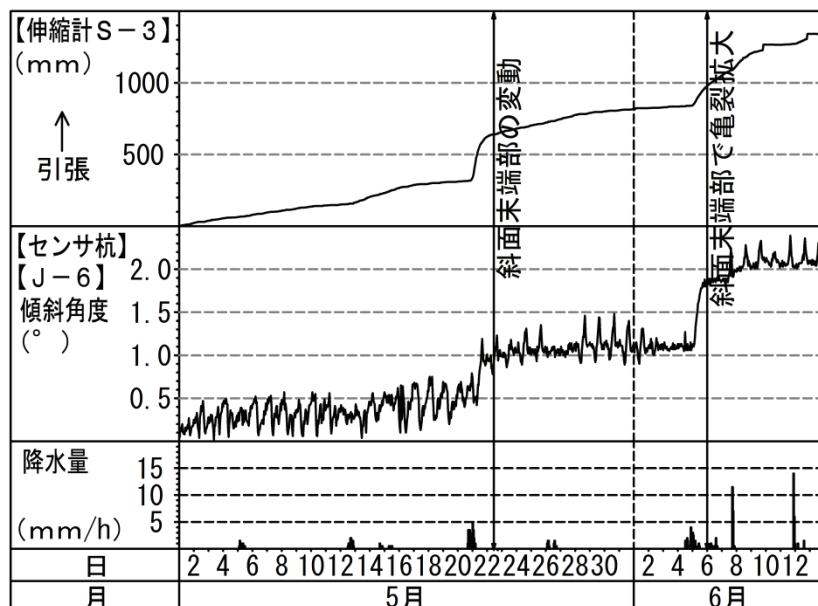


図7 活動中の地すべり地での計測結果<sup>1)</sup>  
加速度センサ杭（J-6）と伸縮計（S-3）との累積変動

## 参考文献

- 1) 渡邊聰, 小野田敏, 植野亮: 無線センサ杭を用いた地すべりの変動計測, 2015, 応用地質学会講演集, pp117-118

## 斜面崩壊実験における加速度センサ傾斜計計測結果報告（2014年8月22日実施）

明治コンサルタント株式会社 納谷 宏

### 1. 加速度センサ傾斜計の概要

平成26年度（公社）日本地すべり学会第53回研究発表会及び現地見学会にて実施した斜面崩壊実験（2014年8月22日）に設置したセンサは、加速度センサ傾斜計である。

設置した加速度センサ傾斜計は、内部にMEMS技術を用いた2軸の重力加速度センサを設置し、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度（測定分解能0.025°）を算出するものである。また内部には電子コンパスも内蔵しており、センサが向いている方角（測定分解能0.9°）も計測し、傾斜方向を算出する（表-1,写真-1）。

センサの測定角度レンジは±30度、計測間隔は1分～24時間に設定可能であるほか、設定された基準値を超えたかどうかの判断を0.3秒間隔で行うことにより、ほぼリアルタイムに警報出力する機能を持つ。また、基準値超過検知時刻の前後1時間は、設定されたデータ記録間隔に関係なく短い周期でログデータを記録する仕様（イベントレコーダ方式）となっている。

加速度センサ傾斜計は、親機と子機で構成され、親機1台につき最大で子機10台を特定小電力無線にてネットワークを組み、データの通信をする仕様となっている。

表-1 加速度センサ傾斜計の仕様

外形寸法		底面Φ70mm×高さ280mm
重量		約0.76kg
計測間隔		1分～24時間 (0.3秒間隔で基準値超過を判断し、警報出力)
計測仕様	傾斜センサ	範囲 ±30°
	分解能	0.025°
	加速度データ直線性	0.2%FS
	電子コンパス	範囲 0°～360° (北: 0°／南: 180°)
	分解能	0.9°
	方位データ直線性	2%FS



イ vent レコード方式の記録間隔  
基準値超過検知時刻の  
1時間前～10分前：1分間隔  
10分前～1分前：10秒間隔  
1分前～1分後：1秒間隔  
1分後～10分後：10秒間隔  
10分後～1時間後：1分間隔

写真-1 加速度センサ傾斜計外観

### 2. センサ設置方法

設置した加速度センサ傾斜計は、盛土斜面中心の西側（右側）1.5mの位置に直線配置とし、盛土天端面に1基（親機）、盛土斜面に3基（上から順に子機1、子機2、子機3）の合計4基設置した（図-1、図-2）。

設置方法は、盛土斜面に単管パイプL=0.5mを打込み、その上に傾斜計を載せ、ボルトで固定した。

また、電源ケーブルと警報出力ケーブルを各機から盛土斜面外側まで敷設し、基準値2.0°を超えた場合に各機からそれぞれ接続された赤色灯が点灯するよう設定した。

計測ログは特定小電力無線による通信にて記録装置に回収した。

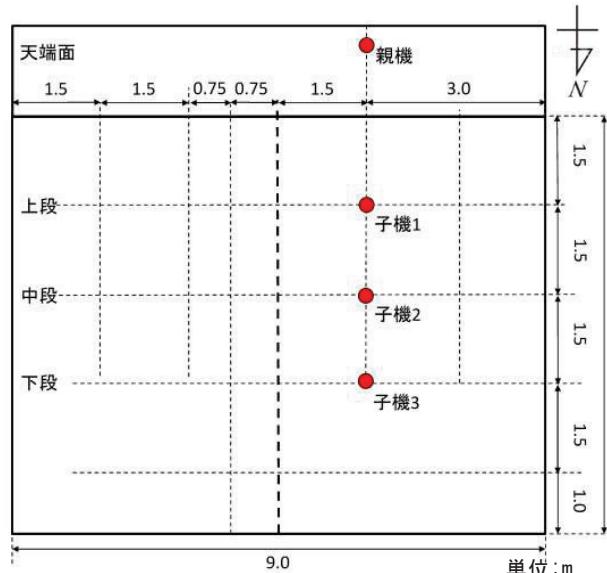


図-1 加速度センサ傾斜計設置平面図

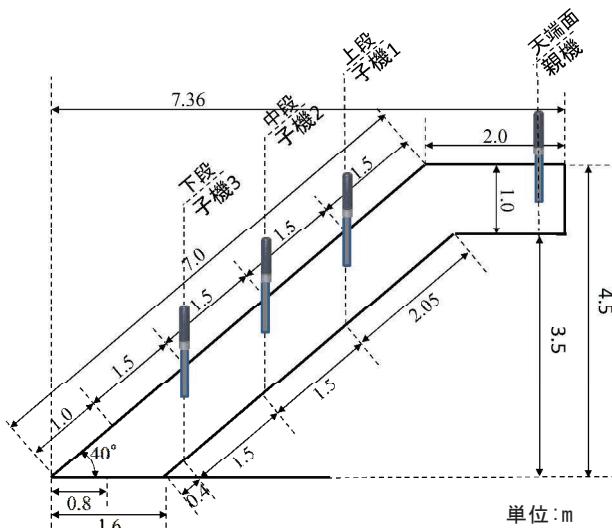


図-2 加速度センサ傾斜計設置断面図

### 3. 計測結果

加速度センサ傾斜計による計測の結果、アイドリング状態から傾斜を感じた時刻および基準値  $2.0^\circ$  を超えた時刻は、斜面下段の子機 3、中段の子機 2、上段の子機 1、天端の親機の順に記録されており、崩壊が斜面下方から始まったことを示している。なお、傾斜を感じた時刻は、子機 3 で 12 時 50 分 50 秒、親機で 12 時 53 分 13 秒(2 分 23 秒後)となっている(表-2、図-3)。なお、降水開始時刻は 10 時 00 分である。

表-2 加速度センサ傾斜計の計測結果

機器名	傾斜感知時刻	基準値( $2.0^\circ$ )超過時刻	基準値( $2.0^\circ$ )超過時傾斜方位※	最大傾斜角度	最大傾斜時方位※
親機	12:53:13	12:53:42	357.6°	85.700°	42.6°
子機 1	12:51:58	12:52:48	156.3°	12.425°	163.7°
子機 2	12:51:02	12:52:39	149.0°	4.450°	164.4°
子機 3	12:50:50	12:51:18	341.3°	19.025°	346.2°

※傾斜方位は北  $0^\circ$ 、東  $90^\circ$ 、南  $180^\circ$ 、西  $270^\circ$  で表現

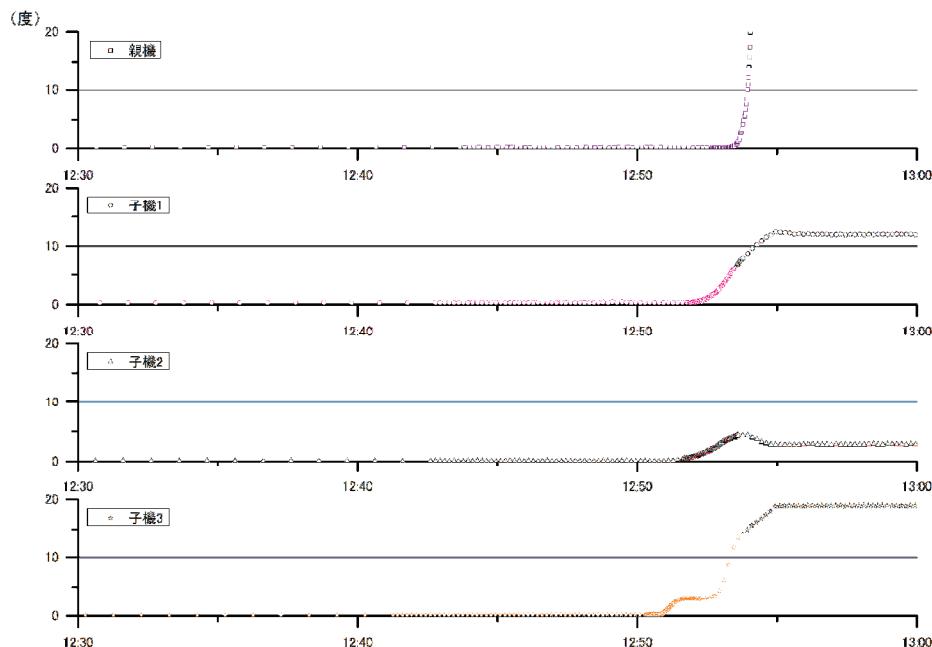


図-3 加速度センサ傾斜計の計測傾斜角度変動図

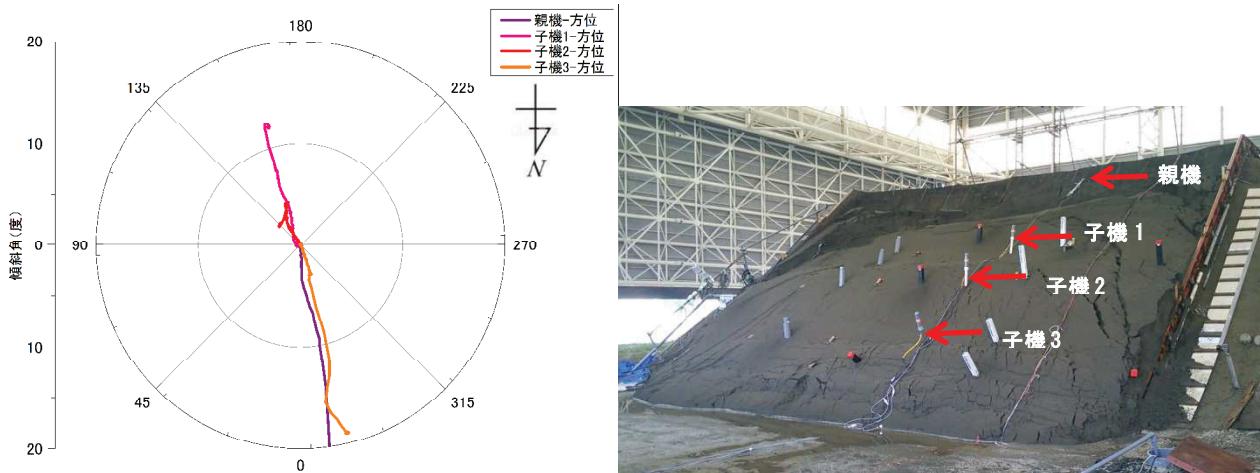


図-4 加速度センサ傾斜計の計測傾斜方位変動図

写真-2 斜面崩壊後の状況

# 斜面崩壊実験報告

株式会社オサシ・テクノス 大川内 正樹

## 1. 実験概要

2014年8月22日に実施した斜面崩壊実験において、当社は斜面崩壊の前兆現象を捉えることを目的として、開発中であったばらまき型傾斜センサのプロトタイプを設置し崩壊時のデータを取得した。

## 2. センサ概要

このセンサは無線型の地表面傾斜センサであり、MEMS 傾斜センサと 920MHz 帯特定小電力無線の無線通信機能を内蔵し、かつ電池駆動のため、ケーブルレスで設置が可能である。無線通信はメッシュ型ネットワークのため経路設定は不要、現場環境変化により電波状況が悪化しても迂回経路を自動構築するため、より確実にデータを取得できる。降雨実験中は、5秒インターバルで各センサの傾斜データを無線伝送し、データロガーに集約・記録した。

表 1. センサ仕様

外形寸法	φ76mm×300mm
重量	約 0.8kg
計測データ	X 軸傾斜、Y 軸傾斜 ※本実験では X 軸が山谷方向
傾斜角度	±30°
測定精度	±0.1°
分解能	0.01°



図 1. 外観写真

## 3. 設置概要

斜面を下から見て中心から左 1.5m の位置を測線とし、斜面上段に 2 台、中段・下段に 1 台ずつ設置した。設置位置を図 2、図 3 に、設置方法を図 4 に示す。

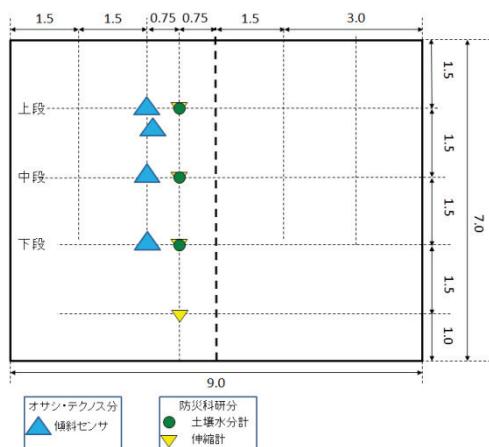


図 2. 設置位置平面図



図 3. 設置写真

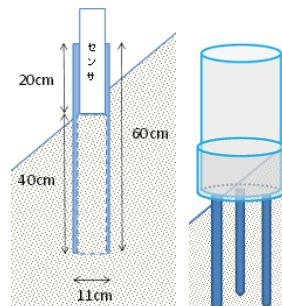


図 4. 設置方法

人工斜面は川砂で強度が弱いため打ち込みは避け、簡易的な設置方法とした。水抜き穴をあけた塩ビパイプを埋設して固定するタイプと、金属棒をスパイクのように差込み固定するタイプの 2 種類の設置方法を上段に設置したが、どちらの設置方法もデータの傾向に大きな違いはなかった。

#### 4. 計測結果

図 5 に示すように、上段 A、B および中段のセンサは山側へ、下段は谷側に傾斜し、傾斜量は中段が最少である。このことから、この崩壊は円弧すべりの形態を示している可能性が推定される。

また、中段センサが、変動初期には谷側に傾斜してその後山側傾斜に転換したこと、その後他のセンサよりも早く傾斜運動が収束したことなども、円弧すべりを裏付ける特徴かも知れない。

この一例だけでは断定できないにしても、比較的簡易に設置できる本センサのデータから、斜面変動の前兆を捉え、かつ変動の形態まで推定できる可能性が期待できる。今後も同様の実験を重ねたい。

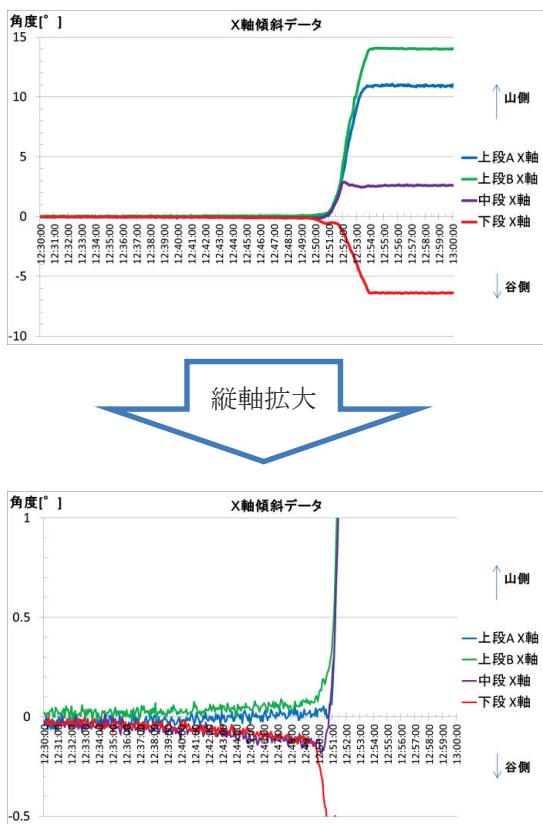


図 5. X 軸（山谷方向）の傾斜変動図

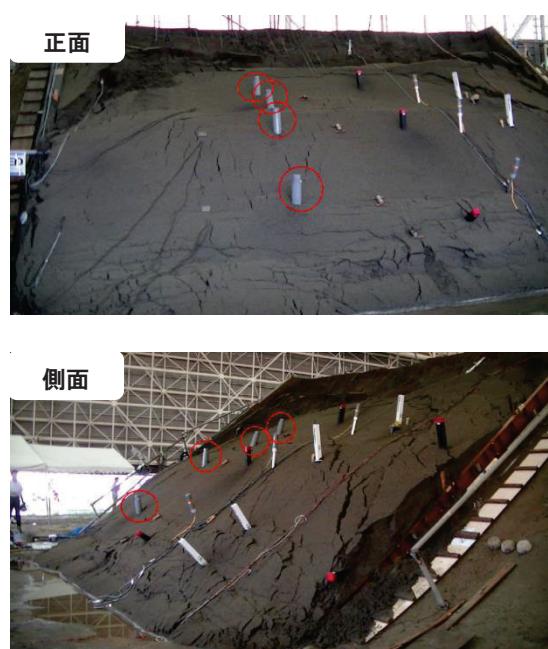
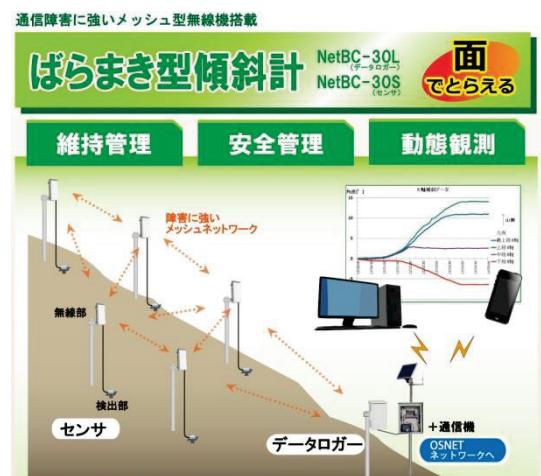


図 6. 崩壊後の斜面状況

#### 5. その後の展開

本実験で有益なデータがとれたこともあり、その後も製品開発を進め 2015 年 8 月に製品としてリリースした。翌年の斜面崩壊実験には製品を使用して参加している。

本センサは、広範囲に多数設置し面的に変状を把握することにより、法面・自然斜面の維持管理や、施工の安全管理、変状箇所の調査、対策工後の経過観察など幅広い使用用途を想定している。



# 大型降雨実験施設における斜面崩壊実験 － 比抵抗モニタリングによるモニタリング結果 －

Mechanism of shallow landslide collapse due to heavy rainfall using large scale rainfall simulator  
(Result of resistivity monitoring using electric resistivity exploration method)

小林 剛 (応用地質株式会社)  
Tsuyoshi Kobayashi (OYO Corporation)

キーワード：斜面崩壊、降雨、比抵抗  
Keywords : slope failure, rainfall, resistivity

## 1. はじめに

平成 26 年 8 月 21～22 日に防災科学研究所の大型降雨実験施設において、地盤の水分挙動および変形挙動の把握に向けたモニタリング技術の向上ならびに崩壊予測技術を目指して、大型模型を用いた斜面崩壊実験が行われた。

本実験において、斜面に浸透する水の挙動把握を試みることを目的として、電気探査手法を用いた比抵抗モニタリングを実施した。

## 2. 比抵抗モニタリングの概要

比抵抗モニタリングは、電気探査を経時的に繰り返して行い、土構造物中の比抵抗変化を観測する手法である。本モニタリングでは、電気探査手法として、2 極法電気探査（比抵抗映像法）を用いた。比抵抗映像法の測定原理を、図 1 に示す。

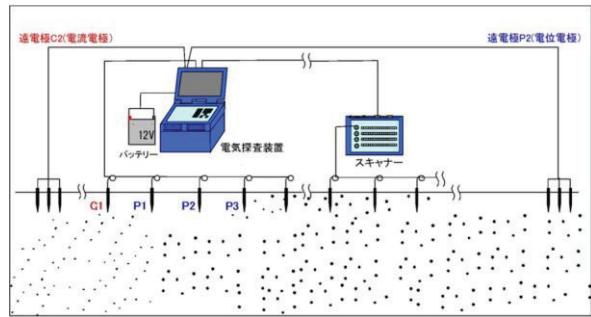


図 1 比抵抗映像法の測定原理

比抵抗映像法は、一つの電流電極 (C) に対して、多点の電位 ( $P_1, P_2, \dots, P_N$ ) を計測することで、高速に計測を行うことができる<sup>(1)</sup>。

データ処理としては、繰り返し計測で得られた見かけ比抵抗データと基準データ（散水前のデータ）を用いて変化率を算出し、見かけ比抵抗変化率断面図を作成した。

## 3. モニタリング仕様

本モニタリングの仕様を表 1、写真 1～2 に示す。

表 1 モニタリング仕様

項目	仕様
縦断測線	測線長 10m、電極間隔 20cm (電極 48 本)
横断測線	測線長 9m、電極間隔 20cm (電極 46 本)
繰り返し 計測間隔	10 分
電極の構造	長さ 50mm の釘を使用
電線	VSF1.25sq×1c (97 本)
遠電極	2 本を模型範囲外に設置
計測システム	応用地質社製



写真 1 縦断測配置状況



写真 2 比抵抗モニタリングシステム

#### 4. モニタリング結果

ここでは、平成 26 年 8 月 22 日 10 時より開始された、散水開始から斜面崩壊までのモニタリング結果を紹介する。散水開始 5 分前のデータを基準データとして、10 分間隔で取得したデータの内、散水開始から 25 分後、1 時間 5 分後、2 時間 45 分後のデータを用いて作成した縦断測線の見かけ比抵抗変化率断面図を図 2 に示す。この図では、黄緑色は変化率 0% を示し、降雨により黄緑色から青色・藍色へと色の変化した範囲は、相対的に見かけ比抵抗が低下（すなわち、水が浸透）した状況を示している。散水量が増えるとともに天端で水分量が多くなり、斜面の下方に向けて徐々に水分量の多い部分が拡大していることがわかる。崩壊直前（図 2 の④）においては、天端の直下に一部、緑色から暖色系の色に変化しているところがあり、崩壊直前に表層に発生した亀裂により、設置した電極が浮いたことで異常データとなった可能性がある。この現象も斜面崩壊の予測に役立つ情報になる可能性がある。

以上の結果から、電気探査手法用いた比抵抗モニタリングにより、斜面に浸透した水の浸透状況を可視化できることを確認した。また、散水量が増えるとともに、表面から地盤内に水が浸透する状況やその浸透範囲が徐々に拡大していく状況が動的に捉えられており、斜面に浸透する水の挙動を把握することができたと判断した。

#### 5. おわりに

現状、比抵抗モニタリングのモニタリング結果は、斜面に浸透する水の挙動を定性的（視覚的）に把握しているものであり、他機関が設置した各種センサーから得られたデータとの対比・検証を行うなど、定量的な評価を行う必要がある。

今後は、実現場での適用事例を増やすとともに斜面崩壊の予測に適用できるかどうかの評価・判断を行い、斜面崩壊予測技術の発展につなげていきたい。

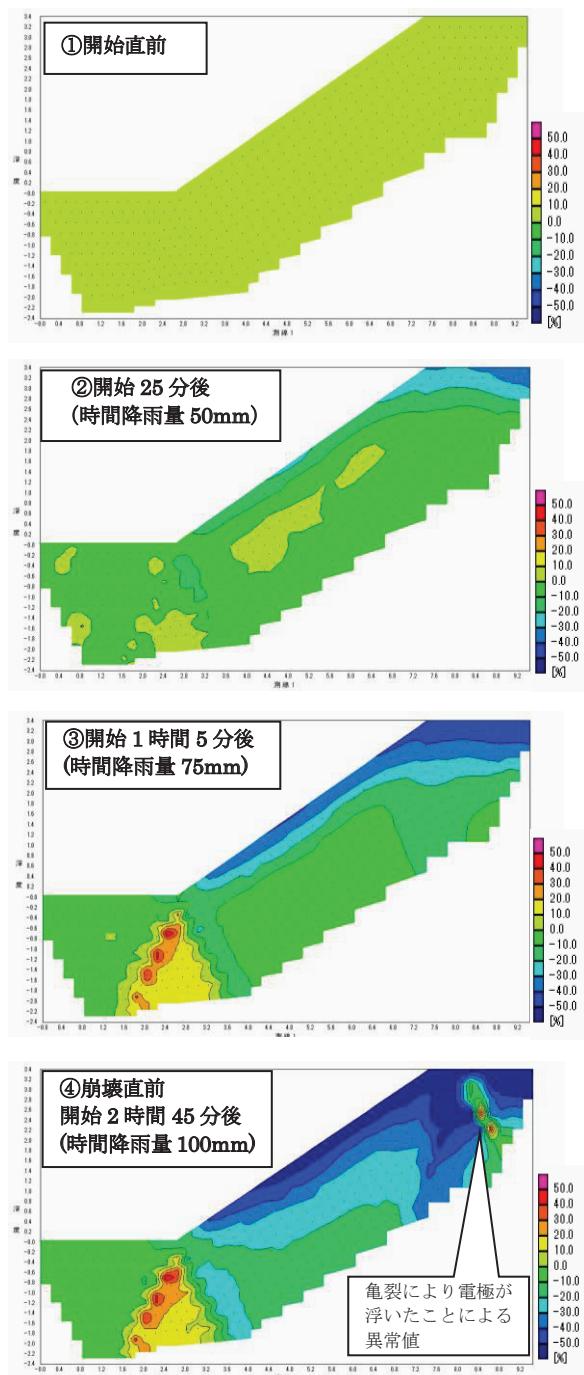


図 2 モニタリング結果  
(縦断測線の見かけ比抵抗変化率断面図)

#### 参考文献

- (1) 小林 剛(2013)：地盤の水分変化モニタリング技術—比抵抗モニタリングシステムの概要—、応用地質技術年報 No.32、69-75、2013

平成 28 年度 公益社団法人日本地すべり学会関東支部 総会・シンポジウム・意見交換会  
平成 28 年 5 月 12 日 東京大学（東京都文京区）

スケジュール

11 時 00 分～12 時 00 分	総 会（武田先端知ホール）
12 時 45 分～17 時 00 分	シンポジウム（武田先端知ホール） ＊一般に公開
17 時 30 分～19 時 30 分	意見交換会（山上会館）

会場案内図



平成 28 年度 公益社団法人日本地すべり学会関東支部 創立 10 周年記念シンポジウム  
変わりゆく豪雨災害

平成 28 年 5 月 12 日発行

発行者：公益社団法人日本地すべり学会関東支部（支部長：落合博貴）

〒105 - 0004 東京都港区新橋 5-26-8 新橋加藤ビル

公益社団法人日本地すべり学会事務局内

TEL : 03 - 3432 - 1878 FAX : 03 - 5408 - 5250

©2016, Printed in Japan ISBN: 978-4-902628-05-0



ISBN: 978-4-902628-05-0  
公益社団法人日本地すべり学会  
The Japan Landslide Society



Kanto branch

平成 28 年度 公益社団法人日本地すべり学会関東支部創立 10 周年記念シンポジウム  
変わりゆく豪雨災害

平成 28 年 5 月 12 日 公益社団法人日本地すべり学会関東支部発行