

第41回地すべりシンポジウム

地すべり災害への新たな取り組み

2013. 5. 17

主	催	(公社)日本地すべり学会新潟支部
共	催	(公社)地盤工学会北陸支部
後	援	新潟県
		(一社)新潟県地質調査業協会
		(社)斜面防災対策技術協会新潟県支部
		新潟県地すべり防止工事士会

目 次

(公社)日本地すべり学会新潟支部第41回地すべりシンポジウムの開催にあたって	1
(公社)日本地すべり学会新潟支部 支部長 川邊 洋	
「新潟県地すべり対策研究会」の発足について	2
新潟県土木部砂防課 藤田 英昭	
治山施設の点検及び老朽化対策の取り組みについて	4
新潟県農林水産部治山課 佐久間 聖	
地すべりにより被災した「清水の棚田」の復旧	6
新潟県農地部農地建設課 川上 峻司・佐藤 太郎	
新潟大学農学部 吉川 夏樹	
測量分野における地上型レーザスキャナーの利用	12
(株)ナカノアイシステム 西條 寛	
探査計測技術を用いた大規模斜面災害の危険箇所の把握に関する最近の研究	16
(独)土木研究所 石塚 忠範・一色 弘充	
国土防災技術(株) 横山 修	
鹿児島大学 地頭 菌隆	
国土技術政策総合研究所 水野 正樹	
新潟県内の最近の積雪・気象状況－積雪・融雪の地すべりへの影響－	24
(独)防災科学技術研究所 上石 勲・山口 悟・平島 寛行	
国川地すべり土塊の運動シミュレーション	30
新潟大学 王 純祥・渡部 直喜・丸井 英明	

(公社)日本地すべり学会新潟支部
第 41 回地すべりシンポジウムの開催にあたって

今回のシンポジウムは、「地すべり災害への新たな取り組み」をテーマに、産官学の連携体制の構築、最先端の探査・計測技術を用いた調査・解析事例などの講演を通して、「新たな取り組み」の一端に触れる機会にしたいと考えています。

昨年 3 月に上越市国川地区で、融雪が原因と思われる地すべりが発生しましたが（幸い人命には被害が及びませんでした）、全国的なニュースになりました）、この地すべりを契機に、産官学の連携を強化する目的で「新潟県地すべり対策研究会」が立ち上げられました。シンポジウムの午前の部では、同研究会の趣旨や今後の方針、現在の取り組みについて、新潟県の三課（砂防・治山・農地建設）から報告していただきます。

午後の部では、3 次元レーザースキャナなど最先端の探査・計測技術とその適用事例について、また、国川地すべりの原因にもなった積雪・融雪の調査と地すべりへの影響、数値シミュレーションによる土塊移動の再現についてお話しいたします。

本シンポジウムが、突発性地すべりの組織的調査の仕組み、新たな探査・計測技術あるいは調査・解析方法の適用を考えるよい機会になることを祈念しております。

(公社)日本地すべり学会 新潟支部

支部長 川邊 洋

「新潟県地すべり対策研究会」の発足について

藤田英昭（新潟県土木部砂防課）
キーワード：地すべり、防災体制、連携

1 はじめに

新潟県では、平成 24 年 12 月に地すべり対策に関する産・官・学の連携を図る組織「新潟県地すべり対策研究会」（以下、「研究会」という。）を発足させました。発足の趣旨、目的、今後の活動予定などについて紹介します。

2 発足の趣旨

本県は、全国有数の地すべり地帯を抱え、今日に至るまで数多くの地すべり防止対策を実施してきました。一方、大学・国の研究機関及び民間企業においても、地すべり防止に関する技術開発や専門的な調査・研究が行われてきました。

平成 24 年 3 月に発生した上越市板倉区国川地区の地すべり災害では、国や研究機関から地すべりに関する知見を頂き対応することができましたが、発災当初から産・官・学が連携し機動的に対応することが、より重要であることが認識されました。

また、本県の地すべり対策技術がさらに発展するためには、各組織がこれまで独自に培ってきた知見を集積することが不可欠です。このことから、産・官・学の情報結節点として研究会を発足し、より一層の地すべり対策技術の発展を図るものです。

図－1 は、研究会の概要をとりまとめたものです。

3 研究会の目的

研究会では、以下を目的として活動を行って行きます。

- (1) 平常時から、大規模な地すべり災害の発生時に機動的に迅速な対応を図れるようにしておくこと。
- (2) 従来、大学・国・民間が独自に行っていた調査・研究などについて、産・官・学が情報共有を図り、地すべり対策技術の一層の向上・発展を図ること。
- (3) 新潟県が培ってきた技術の県内外への普及を図ること。

4 研究会の構成

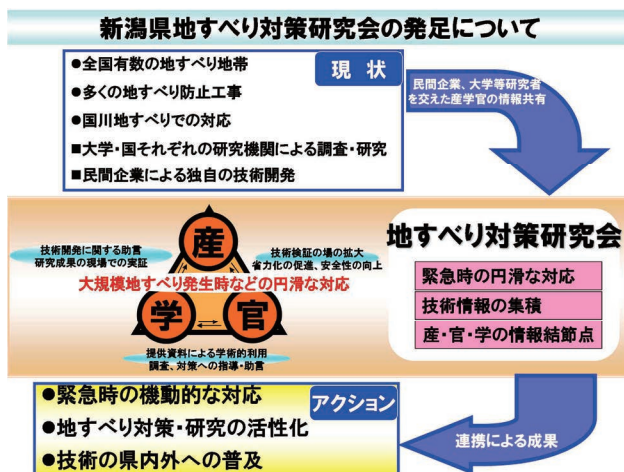
研究会は、以下の組織で構成しています。

- ・（公社）日本地すべり学会新潟支部（学識経験者）
- ・（独）土木研究所雪崩・地すべり研究センター（学識経験者）
- ・新潟県地すべり防止工事士会（有識者）
- ・NPO 法人新潟県砂防ボランティア協会（有識者）
- ・北陸地方整備局河川部（行政担当者）
- ・新潟県（砂防課、治山課、農地建設課、妙高砂防事務所）（行政担当者）

5 研究会の活動

- (1) 第 1 回研究会の開催

平成 24 年 12 月 26 日に構成機関の長及び幹事の参加により開催しました。



図－1 研究会の概要

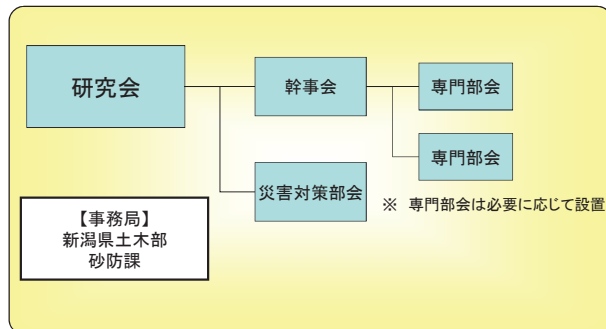


写真－1 第1回研究会の様子

この研究会では、下記について承認されました。

- ・研究会の規約
- ・会長の選出
- ・災害対策部会の活動内容
- ・専門部会として「技術部会」を設置すること、及び活動テーマについて

「新潟県地すべり対策研究会」組織図



図－２ 研究会の組織

(2) 部会の活動について

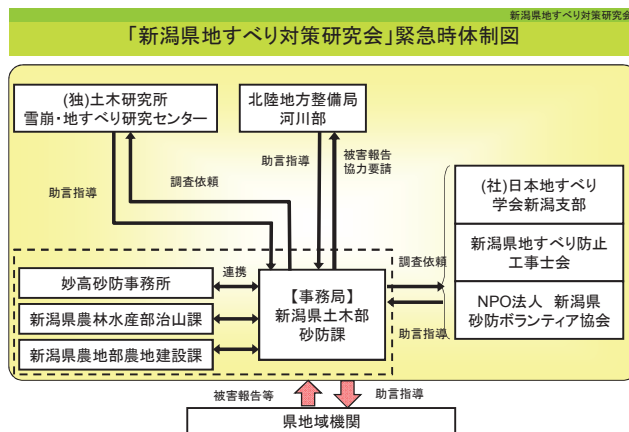
研究会では、図－２に示すように「災害対策部会」と「専門部会」で具体的な活動を行っています。

(3) 災害対策部会の活動

大規模地すべり災害発生時に、事務局の要請により現場調査を行い、対策を行う機関に対し助言・指導を行います。

新潟県では、土砂災害防止法に基づく地すべり緊急調査実施マニュアルにおいて、当研究会へ支援を要請することとしました。

図－３は、災害対策部会の活動イメージです。



図－３ 災害対策部会の体制

(4) 専門部会の活動

専門部会として「技術部会」を設置します。この部会では、近年課題となっている「地すべり防止施設の維持管理に関すること」について意見交換を進めます。

各機関では、地すべり防止施設の維持管理や長寿命化についての調査・検討、維持管理の軽減を目指した工法の開発及び点検修繕手法の開発などが行われていることからこのテーマとしました。

平成 25 年 2 月に最初の技術部会を開催しました。新潟県からは、地すべり防止工事を開始し 60 年が経過したなか、施設台帳が整っていないことや、施設の現地調査が進んでいないことが報告されました。

これらについて意見交換を行い、次の項目について当研究会で検討を進めることとしました。

- ・集水井の内部を安全かつ経済的に点検するため、雪崩・地すべり研究センターで開発した集水井内点検用カメラが利用できるような集水井の天蓋構造の改良について。
- ・地すべり防止区域の対策工事完了後の管理手法などについて。

6 終わりに

この取り組みは、各方面から注目されており県民の安全・安心及び地すべり対策技術の発展に寄与できるよう取り組んで行きたい。

治山施設の点検及び老朽化対策の取り組みについて

佐久間 聖（新潟県農林水産部治山課）

キーワード：災害、施設点検、新たな取り組み

1 はじめに

地すべり等防止法が昭和33年に施行されてから55年が経過し、これまでに数多くの治山施設が施工されてきた。

しかし、治山事業を取り巻く環境は大きく変化し、公共投資可能額の減少などから、既存施設の長寿命化と併せ安全を確保することが求められている。

そこで、これらに対処するため本県では、治山施設の点検や老朽化対策に取り組むこととしており、取り組み内容、今後の課題等について紹介する。

2 趣旨

本県では、戦後の高度経済成長から今日に至るまでに多くの治山施設を整備する一方で、施設維持管理の状況把握や、その後の施設整備台帳への搭載といったソフト対策も重要であると考え、平成18年度より本格的な点検調査を行ってきた。

その結果、写真-1のように、人目に触れることの少ない山間地の施設で、機能が低下したものや破損していた例も多いことが確認されている。

また、平成24年12月に発生した中央自動車道笹子トンネル天井板崩落事故では、定期点検や老朽化対策の不備が指摘され、その重要性が認識された。その後、国の国土強靱化政策により、治山事業が拡充され、既設治山施設等の老朽化・長寿命化対策を実施できるようになったことから、従来の対症療法型の施設管理ではなく、事前防災の観点から点検し機能回復を図ることが可能となった。



【写真-1 谷止工・床固工・護岸工の洗掘状況】

3 取り組み

① 治山施設点検調査

これまでに約2万7千件のうち約2万4千件で実施している。調査内容は、

- ・ 治山施設の位置を現場で確認し、GPSにより位置データの取得
- ・ 施設や周辺の斜面に異常がないか目視により点検し、施設の状況写真を撮影
- ・ 治山施設台帳へ現地情報を追加

などであり、蓄積されたデータは、災害時の確実かつ迅速な現場対応にも役立つものとなっている。

② 老朽化対策

拡充された事業では、集落の孤立化・地震動への備えなど、新たな考え方で計画区域を設定し、通常の維持管理のための点検（目視による破損、漏水、洗掘、堆砂状況等）のみならず、ハンマーによる打音調査やシュミットハンマーによる強度調査等詳細調査も必要に応じて実施する。

その結果、老朽化による異常が判明した施設は機能回復を図る。

4 主な対策・効果

主な対策の実施イメージは、図-1～2と写真-2～4のとおり。

- ・ コンクリート構造物等（谷止工、土留工、モルタル吹付工、法枠工等）のクラックのグラウト充填や欠損部分の補修等
- ・ 鋼製構造物（谷止工、土留工、水路工等）の劣化した鋼製部材の取り替え、施設の再設置等
- ・ 落石防護柵、なだれ防止柵等の経年変化により腐食・劣化した支柱や網、緩衝材の取り替え等
- ・ 集排水ボーリングの目詰まりや孔曲がり、老朽化した集水井の蓋や安全柵の取り替え等

◇対策実施のイメージ



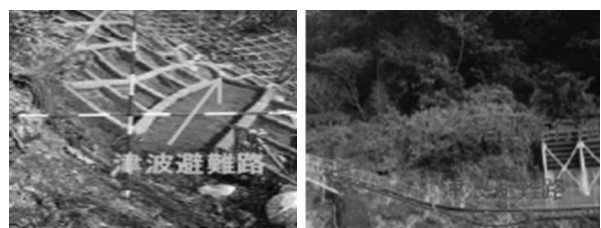
【図-1 対策実施のイメージ】



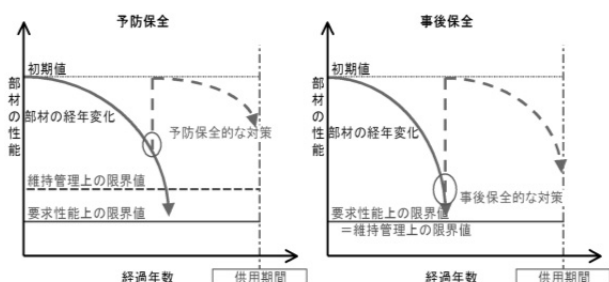
【写真-2 山地斜面对策実施イメージ】



【写真-3 既設施設の老朽化対策イメージ】



【写真-4 避難等の整備イメージ】



【図-2 予防保全と事後保全のイメージ】

5 計画の具体化

治山施設点検によって異常が明らかになった箇所は、拡充された治山事業を活用し、今年度は、写真-5のような法枠工現場の打音調査等を実施し、工事と一体的に進めていくこととしている。



【写真-5 計画予定箇所】

6 今後の課題

おわりに、今後の課題として、次の3点が考えられる。

- ① 今後も増え続ける老朽化施設の点検では、その施設の点検をいつ、どの程度のスパンで実施するのか、また、進められるか。
- ② 施設の老朽化への平準化と費用の最小化において、どのように施設状態を把握・評価し、いつどのような対策をどこで行うか。
- ③ 老朽化施設のデータを蓄積し、施設を新設する段階から建設工事費（イニシャルコスト）と維持管理費（ランニングコスト）の相互関係を明らかにし、計画・設計へフィードバックして行く必要がある。

7 おわりに

施設の点検、老朽化や長寿命化の取り組みは、今後将来に渡って行かなければならない。多くの課題があるが、計画的に施設の機能回復を図り安全確保に取り組んで行く必要がある。

地すべりにより被災した「清水の棚田」の復旧

Recovery of terraced paddy fields “shimizu-no-tanada” damaged by landslide

川上峻司（新潟県農地部）*，佐藤太郎（新潟県農地部），吉川夏樹（新潟大学農学部）

Shunji Kawakami (Department of Agriculture, Niigata Prefectural Government)，Taro Sato (Department of Agriculture, Niigata Prefectural Government)，Natsuki Yoshikawa (Faculty of Agriculture, Niigata University)

キーワード：地すべり，棚田，等高線区画，GIS，景観

Keywords：Landslide, Terraced paddy fields, Contour plot method, GIS, Landscape

1. はじめに

棚田とは傾斜地に階段状を成し、畦畔をつけて拓かれた小区画の水田の総称であり、例えば中島（1999）¹⁾は傾斜 1/20 以上の地域にある水田を棚田と定義している。現在、棚田は農業生産の場として機能のほか、洪水緩和機能、地下水涵養機能、景観等文化的機能等、多面的な機能を有する場として、その重要性が広く認識されている。

一方、棚田は地すべり等の既往の災害地形に造成されたものが多いことが知られている。その理由は崩壊によって緩やかになった地形が水田の造成地として適すること、崩壊した土塊が水分や栄養分を多く含むため水稻の生育に適していたことや、崩壊地を棚田にすることによって更なる地すべりを防ぐことができたことなどが挙げられる²⁾。しかし、中越大震災では中越地方の中山間農村部に多く見られる棚田において、地すべりによる甚大な農業・農地被害³⁾が発生したことからも明らかなように、棚田地形はその造成から現在に至るまでの歴史の中で、地すべり等の災害とは切り離して論ずることはできない。

現在、国土交通省、農林水産省林野庁、同省農村振興局の三者は、地すべり被害の防止を目的として、地すべり防止区域を指定し、都道府県が実施する県営地すべり対策事業などによって、国土保全対策を

講じているところである。このような対策が棚田地帯等、中山間地域農業の継続に向けた農地保全に資するものであることはいうまでもない。

本論では、長野県北部を震源とする地震後、大規模な地すべりが確認された「清水の棚田」の被災状況から復旧に至るまでの概要を報告する。

2. 被害の概要

(1) 長野県北部地震

平成 23 年 3 月 12 日に発生した長野県北部を震源とする地震（以下、長野県北部地震）によって、県内では十日町市及び津南町で震度 6 弱を記録するなど、上中越地方の広い範囲で大きな揺れを観測した。翌 13 日には、東北地方太平洋沖地震（長野県北部地震を含む）による災害が、政令で激甚災害に指定されることとなった。新潟県内の農地、農業用施設および集落排水施設の被害は、県へ被害が報告されたものだけでも、7 市町村で 390 か所、約 25 億円となった。

(2) 清水の棚田とその被害状況

「清水の棚田」は、新潟県十日町市（旧松代町）大字清水に位置する（図-1）。当地は狭小で不整形な区画や畦畔曲線の美しさが評価され、全国から写真愛好家などが集まる有名な景勝地であった。



図-1 被災前の清水棚田



図-2 被災後の清水棚田

地震発生後、積雪が消えた4月19日に、地震の揺れ、ないし融雪等の影響によって発生したと思われる大規模な地すべりが確認され、棚田は跡形も無く崩壊した(図-2)。地すべりの規模は、長さ約500m、幅約100m、流出土砂15万 m^3 (推定)であり、その被害は農地1.6ha、農道100m、市道100mで、さらに市道の被災により農地1.6haが通作不能となった。

3. 地すべり対策の概要

新潟県では、早急に地すべりを安定させるため、農林水産省農村振興局と協議して、本区域を地すべり防止区域に指定し(「清水日影地区」、区域面積74.41ha)、「災害関連緊急地すべり対策事業(以下、災関緊事業)」および「地すべり対策事業」を実施した。

地区の事業内容は、承水路工L=695m、排水路L=494m、暗渠工L=782m、水抜きボーリング工L=450m、集水井工N=3基、排出盛土工N=1.0式、護岸工L=633m、法面工N=1.0式となっている。

4. 農地災害復旧事業の概要

前述の地すべり対策に加え、「清水の棚田」の農地・農業用施設の復旧を目的に「農地災害復旧事業」を実施した。事業対象面積はA=1.6haである。

農地災害復旧事業は、被災した農地・農業用施設を原形に復旧することを基本とする事業であるが、本地区については、土砂流出が大きく、原形復旧が困難であったことから、新たな区画配置の検討が必要となった。くわえて、全国的な景勝地であることを背景として、十日町市などから棚田景観への配慮が強く求められた。こうしたことから、地盤の安定、景観への配慮等の点で優れた平行畦畔型等高線区画⁴⁾による区画配置計画の採用を検討した。

5. 平行畦畔型等高線区画による棚田復旧計画

(1) 平行畦畔型等高線区画の概要

棚田地形の複雑な中山間地域の農地に、長方形区画を配置すると大きな潰れ地や区画間段差が発生し、移動土工量や維持管理労力が増大するほか、地すべり被害等を助長する危険性がある。こうした問題の解決には、平行畦畔型等高線区画(以下、等高線区画)の採用が有効といわれている。等高線区画は、長方形区画の特徴である畦畔が平行な状態を保ちながら、営農に支障がない程度に地形に沿って区画を折り曲げ、等高線方向に区画拡大を図るものである⁴⁾。長方形区画よりも地形になじみやすく、地盤の安定や区画が折れ曲がっていることによる棚田景観への一定の配慮が図れる

ほか、畦畔法面や区画間段差を縮小できるため、維持管理労力の縮減に繋げることができる。特に本地すべりのような放射状に土砂が崩壊した地形においては、長方形区画と比較して等高線区画の適合性は高いと考え、本地区で採用することが決まった。

棚田復旧計画案の作成にあたっては、新潟大学から技術協力を得た。等高線区画の理論構築者の一人である有田博之元教授(現フェロー)によって本事業地区の区画配置の考え方が示された。また、吉川夏樹准教授が開発したGIS(地理情報システム)を用いて傾斜地耕地の区画整理計画案を簡便に作成できる汎用性の高い手法は⁵⁾、復旧計画作成に必要不可欠であった。

なお、本事例は、等高線区画を体系立てて採用した全国初の事業である。

(2) 計画案策定までの時間的制約の存在

新潟大学に計画案策定の協力依頼をしたのは、平成23年6月初旬であった。本地区では前述のとおり、「災害関連緊急地すべり対策事業(災関緊事業)」、「地すべり対策事業」、「農地災害復旧事業」の3事業を同時に進めていた。特に災関緊事業は、緊急的に地すべり対策を行う事業であるため、6月末までに計画原案を決定し、景観の専門家等への意見聴取を終え、地元関係者との合意形成を図ったうえで、8月中旬に事業採択される必要があった。棚田復旧計画案は、復旧後の地形を概ね決定する災関緊事業との整合を図る必要があり、計画決定までの時間的制約があった。GISを用いる等高線区画設計は、被災後の詳細な標高等の地形データを必要とするため、いかに早急にこれらを入手するかが課題となった。

(3) 地上レーザー測量を活用した地形情報取得

通常、地形情報の取得には「地形測量」、「中心線測量」、「縦断測量」、「横断測量」などの各種現地測量を実施する方法のほか、航空写真を判読し、現地補足測量を実施して作成する方法がある。航空写真測量は現地測量による方法と比較して、早期に地形情報を入手することが可能であるが、天候等により撮影時期が制限されることや、雲による地形情報の欠落が生じる可能性がある。そのため、本事例では、地上レーザー測量による方法を採用した。本測量は、レーザースキャナを使用し、地表面の微地形を3次元座標の密集した点群データとして取得する技術であり、現地測量が困難な地区の微地形の把握が可能である⁶⁾。また、測量成果はデジタルデータであるため、その後の設計作業へ円滑に移行することが可能である。本事例のような緊急的対応が必要な状況においてはとりわけ有効である⁶⁾。本技術の導入によって、極めて高い解像度の地形情報が取得できたほか、測

量から図面完成までの期間を大幅に短縮できた。所要日数は8日間程度であった。また、入手した地形情報は、精緻な地すべり安定計算や対策工の設計等を実施するうえでも有効に活用された。

(4) GISを用いた棚田復旧計画案の作成

平成23年6月下旬に完成した地すべり後の地形情報を利用し、新潟大学が開発したGISを用いた区画整理計画設計手法によって、棚田復旧計画案を作成した。設計手法については、有田ら⁷⁾に詳述されている。

設計作業においては、まず、地すべり後の地形情報をGISに取り込み、視覚化した(図-3)。レーザー測量による精緻な地形情報であるため、詳細な地すべり状況を再現できた。次に、切盛土量の最小化に配慮しつつ、最大限、長辺方向への区画拡大を図る区画配置を検討した。この際、支線道路や水田への進入路に急勾配が発生しないよう、田面及び道路標高を調整した。

本地区の特有の事情として、災関緊事業によって形成される地形状況や、地すべり対策施設の位置等と区画配置計画との調整を図る必要があった。災関緊事業では、地すべりの安定化を図るため、区域上部の崩土を排土し、それを区域下部へ盛土することが計画されていた。また、これによって形成された地形に基づいて集水井等の地すべり対策施設を設置することが予定されていた。実際の作業では両者の計画の整合を図るため、区画配置計画の数度の修正が必要となった。しかし、GISの利用によって、こうした作業も簡便かつ迅速に行うことができた。計画原案は、地形情報を入手してから1週間後の6月末には完成した。災害復旧時等、早急な対応が必要な場面で本手法が有効であることを示す事例となった。

6. 合意形成の醸成

(1) 地元説明会の開催

完成した原案をもとに三回の地元説明会を開催した。通常の工事説明会においては、紙ベースの計画平面図等によって工事計画を説明することが多い。しかし、受益農家やときには施工者なども平面図から、工事完成後の区画の区画間段差や法面長の状況を正確にイメージできないこともあり、工事後、予想外の状況が発生することがある。地元説明会ではGISの描画機能によって作成した鳥瞰図を利用し、参

加者が工事完成後の仕上がりイメージを共有できるよう配慮した。その結果、原案に対して、受益農家から概ねの理解を得られた。一方、鳥瞰図を確認した結果、一部の受益農家から現況地盤が不安定な箇所での道路配置や急勾配道路に関する指摘があった。こうした指摘を踏まえた原案の修正後、計画案の最終的な合意が形成された。地元説明会をとおして、GISを活用した設計手法の高いプレゼンテーション能力と計画修正の容易性・即時性が認められ、本手法が合意形成の醸成に対しても有効であることが確認された。その後の詳細設計は設計コンサルタントが行い、数度の再修正の後、実施設計の最終案が確定した(図-4)。

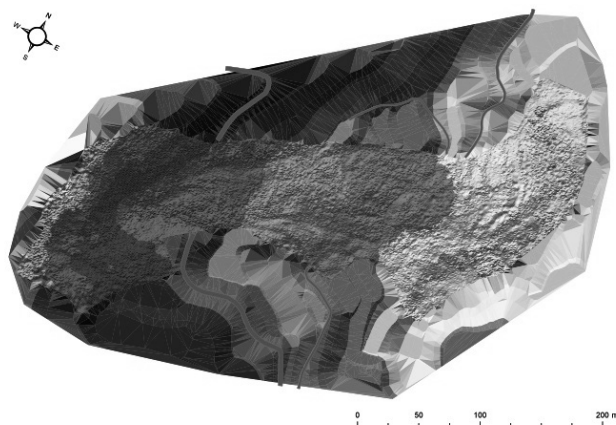


図-3 地すべり発生後の視覚化画像

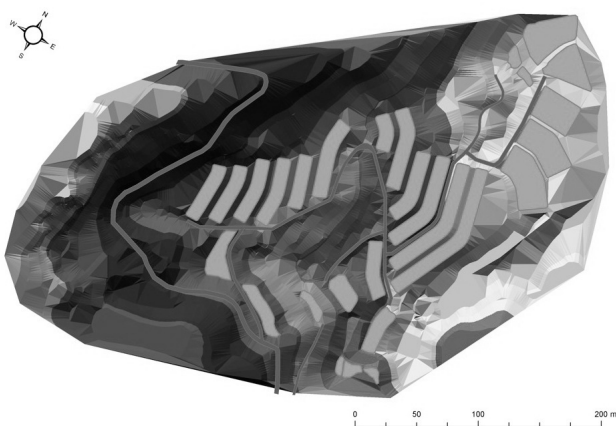


図-4 復旧計画案の視覚化画像

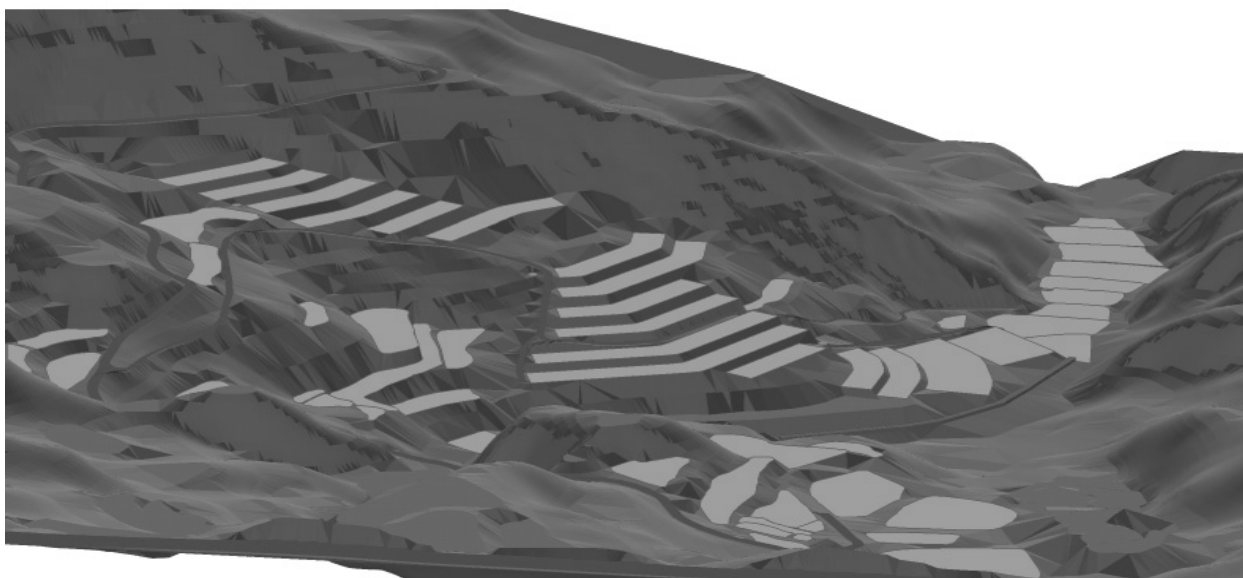


図-5 棚田復旧計画案鳥瞰図（地元説明時）

（2）景観配慮の検討

景観配慮の観点から最終案を検討するため、7月に新潟県農地部が設置する新潟県農業農村整備事業環境情報協議会（以下、協議会）を開催した⁸⁾⁹⁾。本協議会は、農地部が実施する農業農村整備事業における生態系配慮や景観配慮の取組を推進するため、学識経験者や有識者などから、それらの取組に対して指導・助言を受けることなどを目的として設置されている。協議会の委員には景観工学の学識経験者のほか、生態系の有識者等が就任している。今回の協議会は、「清水の棚田・美しい景観を残すために～景観に配慮した復旧計画の検討会～」と題して、委員や新潟県農地部関係者のほか、北陸農政局や十日町市の行政関係者やNPO、受益農家の参画により開催した。検討会では地すべり対策工事も含めた復旧計画の概要や前述の鳥瞰図（図-5）を用いた区画計画の最終案を説明し、復旧計画に係る景観配慮上の留意点等について検討した。区画計画については、区画形状を直線ではなく曲線を基調に構成する案や区画の角に丸みを持たせる案などの意見があったが、等高線状に区画を配置する最終案の骨格については基本的に了承された。また、地すべり対策については、コンクリート製集水井（図-6、図-7）、コンクリート製法枠や鋼製ふとん籠の設置に対して、視点場からの景観に悪影響がある可能性についての指摘がなされた。これをうけて、工事実施においては、施設の設置高の変更により目立たないようにすること、土砂の覆土による遮蔽（図-8、図-9）、緑化が可能な資材の利用等、景観に対して一定の配慮をすること

が確認された。



図-6 コンクリート製集水井施工状況



図-7 集水井からの排水を用水として活用



図-8 鋼製ふとん籠設置状況



図-9 鋼製ふとん籠土砂の覆土による遮蔽

7. 事業採択から事業完了まで

学識経験者や行政関係者、NPO、受益農家との間で「清水の棚田」の復旧計画について合意形成が図られたことから、若干の整備計画の変更を行った後、災関緊事業の採択申請をし、平成23年8月10日に事業採択がされた。その後、同10月中旬の災関緊工事着手となった。

工事は地すべり対策に始まり、平成24年4月に区画整理工事が開始された。降雨による施工時期の不足が懸念されていたが、夏場の晴天にも恵まれ、工事は順調に進捗した。平成24年12月下旬に災関緊事業及び農地災害復旧事業が完了した（図-10）。平成25年4月現在、崩壊した斜面に施工する斜面保護工等の地すべり対策工事を残すのみとなっており、平成25年度に全工程が完了する見込みとなっている。

平成25年5月には、2年ぶりの田植えが予定される。今後には、地元NPO法人等の協力のもと、地域の担い手が営農を継続していく予定である。

棚田景観に配慮しながら、従前よりも生産効率性

および維持管理性が著しく向上した姿で新たによみがえった「清水の棚田」とこれを取り巻く清水集落における今後の営農展開や地域活性化に向けた取組が、十日町市のみならず、新潟県、そして日本の中山間地域の農業・農村の範となるものになることを切に願うものである。



図-10 復旧後の清水棚田（H24. 12. 6撮影）

8. おわりに

「清水の棚田」が位置する中山間地域は日本の国土の約7割を占めるが、近年、農業従事者の高齢化や減少が著しく、農地の耕作放棄地化や農業用施設の管理の粗放化が進行している。米山（2010）¹⁰⁾は、中越地震以降の耕作放棄地の発生状況から、地震のインパクトは中山間地域の耕作放棄トレンドを押し上げることを明らかにしている。農地災害復旧事業は「原形復旧」が原則であるが（図-11、12）、立地条件の劣悪な狭小農地が原形復旧されたとしても、農家の耕作意欲の変化に対応できない可能性があることが指摘されている¹¹⁾。さらに中山間地域における被災では、単なる復旧対応のみならず、農地荒廃化や土地利用の秩序化をも含む復興的視点に立つ計画的復旧対応が求められ、周辺の未被災地も取り込んだ整備も検討する積極的な姿勢が必要との提案もある¹²⁾。

農地災害の復旧において、このような整備を可能とするものとして、災害関連区画整備事業⁵⁾¹¹⁾がある。しかし、本事業は中越大震災や新潟・福島豪雨災害で被災した農地の一部に適用され、復旧の一助となったが、復旧業務が集中する非常時に短期間で計画案の作成が必要なことなど、現場対応が困難な側面をもつ。中越大震災後、長野県北部地震を含む東北地方太平洋沖地震等の地震による大規模な農地災害が頻発し、農業・農村の存立が危ぶまれている中、農業・農村の安定的発展という長期的視点に立った新たな災害復旧施策のあり方が、今、まさに問われ

ている。

今回採用した等高線区画工法は、移動土工量の縮減を図りながら、可能な限り長辺方向への拡大を図ることによる営農効率性の向上や、区画間段差の縮小による除草等の維持管理労力の削減を図ることにより、営農の継続に資する技術である。本技術は現況地形に配慮しつつも、現在の区画や道水路の配置にとらわれることなく区画拡大を行い、かつ、将来の再整備の可能性を考慮し、隣接する田を同標高にすることにより、再区画整理の低コスト化を図ることを技術体系的理論のひとつとしている。現時点における耕作条件の向上により、短中期的な農地保全を図りながら、将来の耕作状況の変化等（例えば、担い手の変更や規模拡大、農業機械の技術革新等）への対応を可能にすることによって長期的な農地保全も図ることを念頭に置いてのものと理解される。そのため、等高線区画工法は、内川ら（2007）¹²⁾が指摘する復興の視点のみならず、中山間地域農業の長期的な存立という観点からも、適合性が高い技術であり、災害復旧事業のみならず、中山間地域の農業農村整備において、その技術的な普及の促進が望まれる。



図-11 被災直後の留守原棚田



図-12 復旧後の留守原棚田（ほぼ原型復旧）

引用文献

- 1) 中島峰広(1999)：日本の棚田、古今書院
- 2) 静岡県農林技術研究所(2009)：静岡の棚田研究～その恵みと営み～、静岡新聞社。
- 3) 新潟県農地部（2006）：新潟県中越大震災～農地・農業・農業用施設の復旧復興に向けて、<http://www.pref.niigata.lg.jp/nochikanri/1198602032324.html>.
- 4) 有田博之・木村和弘(1997)：持続的農業のための区画整理、農林統計協会。
- 5) 吉川夏樹・有田博之・三沢眞一（2009）：GISを活用した傾斜地耕地における区画整理計画作成の簡便化、農業農村工学会誌、77(12)、1009-1013.
- 6) 山科真一・広瀬伸二・龍見栄臣・鈴木亘・江坂文寿・三浦順（2011）：新砥沢地すべりでのレーザプロファイラの活用事例について－災害発生時の迅速な現地調査から対策工計画策定まで－、日本地すべり学会誌、48(2)、33-38.
- 7) 有田博之・木村和弘・吉川夏樹(2013)：未来につなげる圃場の形成 GISを用いた耕地の区画整理計画、農林統計協会。
- 8) 有田博之（2012）：棚田の復旧と景観保全、農業農村工学会誌、80(5)、21-25.
- 9) 佐藤太郎・本間陽子・本間康裕(2012)：平行畦畔型等高線区画整理の計画事例、農業農村工学会誌、80(11)、914-915.
- 10) 米山純(2010)新潟県中越地震が中山間地域の耕作放棄トレンドに与えた影響、新潟大学大学院自然科学研究科修士論文。
- 11) 有田博之・風間十二郎・玉井英一・吉川夏樹・内川義行・三沢眞一(2008)：新潟県中越地震の地盤災害地区における農地災害関連区画整備事業、農業農村工学会誌、76(2)、129-132.
- 12) 内川義行・木村和弘・有田博之・森下一男（2007）：中越大震災における棚田の被害と対応及び課題、農業農村工学会誌、75(3)、193-196.

測量分野における地上型レーザスキャナーの利用

西條 寛 (株式会社ナカノアイシステム)

キーワード：測量、地上型レーザスキャナー

1. はじめに

近年、各分野で 3 次元データが活用されるようになり、測量分野においても「3 次元データ」が重要なキーワードとなっている。測量で通常使用しているトータルステーションや GNSS は、対象物の変化点を「点」として計測し「点」と「線」で表現するのに対し、レーザスキャナーは対象物の全体を計測することによって、従来の「点」と「線」のほかに「面」としての表現を行うことができる。レーザスキャナーで計測した 3 次元データは、表現だけでなく、データの抽出、加工などが容易にできることから汎用性にも優れている。

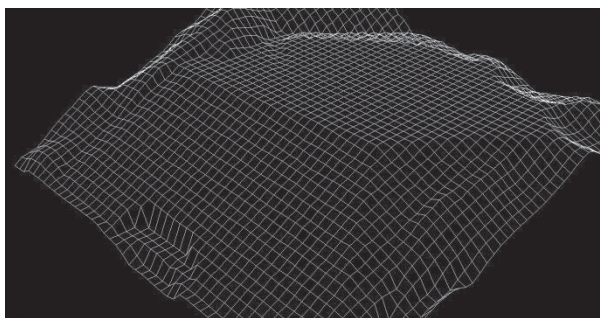


図-1 3次元モデル（面による表現）

測量分野におけるレーザスキャナー計測の始まりは航空レーザ測量であり、平成 10 年頃に日本に導入され、レーザ発射頻度の増大、データ処理・解析技術の高精度化とともに、土木工学、防災、環境保全などの幅広い分野で利用され始めたことから、めざましく発展をした。また、平成 20 年 3 月に改定・施行された「公共測量作業規程の準則」に、航空レーザ測量が規程化され、より一層の利活用が広がっている。

一方、地上型レーザ測量は、技術的な発展から多方面（文化遺産、リバースエンジニアリング）での利活用は増えつつあるが測量分野においては、航空レーザほどの普及はしていない。測量分野で地上型レーザスキャナーを使用する場合の対象物は、自然地形となり他分野での利用時より多くの誤差要因が存在する。そのため精度の安定が難しいことが標準化の妨げになっている。

今回は、当社が精度確保のため留意している点と地上型レーザスキャナーを使用して行った測量の事例について紹介する。

2. 計測の原理・性能

地上型レーザスキャナーには、タイムオブフライト方式（time of flight）と位相差方式（phase based）の 2 種類^(※1)があり、タイムオブフライト方式は、対象物に発射したレーザが反射して帰ってくるまでの時間により距離を算出し、同時に発射した方向を計測することで対象物の 3 次元座標^(※2)を取得する方法。位相差方式は、出射光と反射光の時間的ズレを距離に換算し対象物の 3 次元座標^(※2)を取得する方法で、短時間に大量のデータを取得できることからリバースエンジニアリング等に使用されることが多い。

それに対して前者のタイムオブフライト方式は、位相差方式に比べ長距離の計測が可能で距離精度も比較的に安定していることから、野外での計測に使用されることが多い。

(※1) 代表的なものとして (※2) 計測時はスキャナを中心とした球面座標系であるため、通常は正方座標系に変換し使用する。

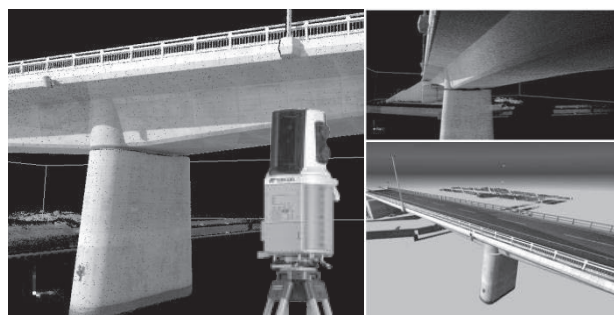


図-2 地上型レーザスキャナーによる橋梁計測

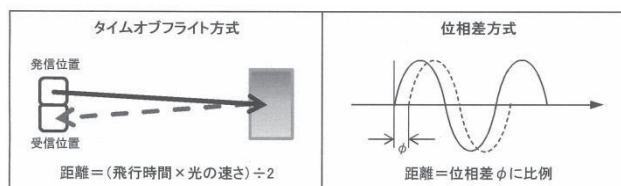


図-3 測定方式イメージ

	タイムオブフライト方式	位相差方式
機 器 名	RIEGL VZ-1000	FARO FOCUS ^{3D} 120
最長測定距離	1400m以内	120m以内
測定速度	29,000 点/秒	976,000 点/秒
距離精度	±8mm	±2mm

表-1 測定方式の性能比較

※上記の値はメーカーの公称値。詳細な情報は各メーカーにてご確認ください。

3. 計測の精度

地上型レーザスキャナーで計測した 3 次元デー

タは、以下の条件が精度に影響を与えると考えられる。

1) 機器性能による影響

レーザスキャナーで取得する3次元データ(X・Y・Z)は、トータルステーションと同様にビームが発射された角度(水平角・鉛直角)と距離から求めるため機器の距離精度、角度精度に依存する。当社のレーザスキャナーと公共測量作業規定で要求しているトータルステーション(2級)の性能を比較した結果、3要素とも同等以上の精度を確保していることが確認できる。(※3)

	レーザスキャナー	トータルステーション(2級)
距離(X)	4mm/100m	5mm/100m
水平角(Y)	6秒	10秒
鉛直角(Z)	6秒	10秒

表-2 トータルステーションとの性能比較

当社のレーザスキャナーを例にすると100m先での座標精度は6mm以下である。

$$\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} = \sqrt{34} = 5.8\text{mm}$$

(※3)全ての機器ではないので、各機器の性能を確認する必要がある。また、ビームの広がりやキャリブレーション等により生じる誤差は含んでいない。

2) 入射角による影響

レーザスキャナーが照射するビームの径(スポットサイズ)は、距離に応じて拡散する。当然、スポットサイズが小さいほど細かい形状を取得することが可能となる。当社のレーザスキャナーを例にすると100m先の正対する対象物に接面するスポットサイズは約1.6cmと小さく、測量で使用するには十分なサイズであるが、地表面を対象物とした場合は入射角の影響によりスポットサイズは図-4のとおり細長い楕円形と変化し、そのスポットサイズは約80cm(※4)と変化する。なお、スポットサイズより小さな凹凸は取得することはできない。(※4)ビーム照射位置は地表面より2mとした場合。

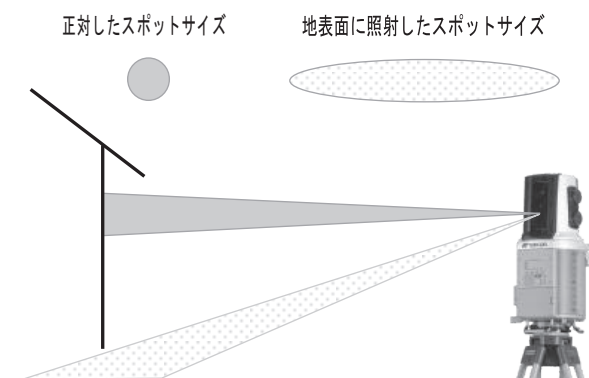


図-4 入射角とスポットサイズの拡散

3) 反射率による影響

計測精度に直接の影響は無いが、対象物の反射率によって取得するデータ量や取得できる距離に影響を与える。色彩の白いものは反射率が高く、黒いものは反射率が極端に低くなる。また、乾湿差にも影響を受け湿った地表面のデータ取得率も低下する傾向にある。

4) 障害物による影響

自然地形を対象物とした場合、対象物以外の障害物(樹木や草)も同時に計測することになる。計測時に障害物を除去することはできないので、解析処理において障害物を除去することになる。また、障害物がある場合には、複数の方向から計測をするなどして、障害物によるデータの欠測をさけるように努める必要がある。



図-5 計測データに含まれる障害物

4. データ解析と地形モデルの精度

自然地形を取得したデータには、対象物以外のデータが多く含まれている。そのため、解析処理を行って不要なデータを除去する必要がある。解析処理の方法として以下の2種類(※5)があるが、対象物が自然地形の場合は両方の処理を行うことが望ましい。この解析処理が、3次元地形データ及び地形モデルの精度を決定と言っても過言ではないので、十分な処理方法の検討と作業に時間を費やす必要がある。(※5) 代表的なものとして

1) 手動による処理

言葉のとおり、取得データから不要なデータを手動で除去する方法で対象物が複雑な形状のときに行う。



図-6 手動による障害物の除去

2) フィルタリング(自動)による処理

フィルタリング処理には、計測時に得られた反射率や色(RGB)から地表面のデータを抽出する方

法や、標高値から地表面のデータ(最低標高)を抽出する方法がある。フィルタリング処理は自動で行うため、必要な地表面のデータも同時に除去する場合や、抽出データに不要データが混在する場合がある。どちらの場合も地形モデルの精度を低下させることになるので、手動による不要データの除去を十分に行ったのち、フィルタリングによる処理を行うことが望ましい。

3) 地形モデルの精度

構造物を対象としたモデルの作成は、最小二乗法等により求めることから使用するデータ量(計測データ量)が多いほどモデルの精度が向上する傾向にある。それに対して地形モデルは、計測したデータから必要なデータだけを抽出し作成する手法のため、使用するデータが多ければモデルの精度が向上するとは限らない。詳細な地形モデルを作成しようとするあまり、却って不要データを多く含んだ精度の低い地形モデルを作成することがあるので、地形モデルの作成では対象地の状況と計測結果を考慮し、適切な質と量のバランスをとることが重要となる。

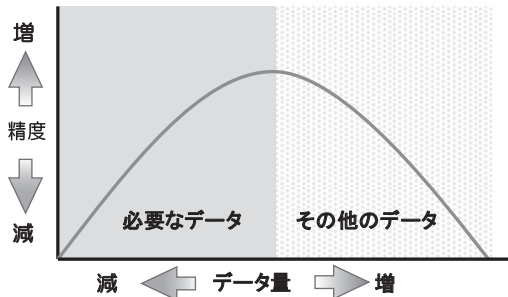


図-7 使用するデータ量とモデル精度



図-8 計測データ(処理前)

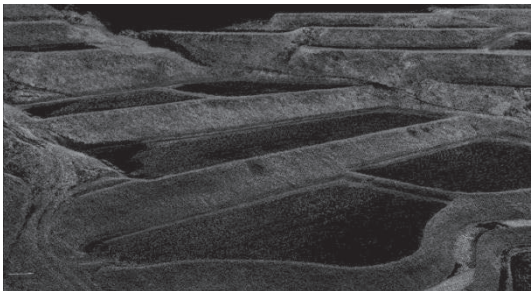


図-9 計測データ(手動処理後)

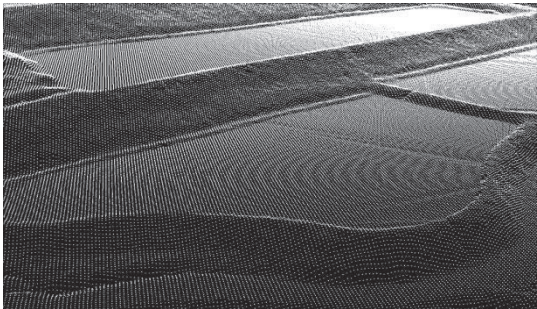


図-10 3次元データ(自動処理後)

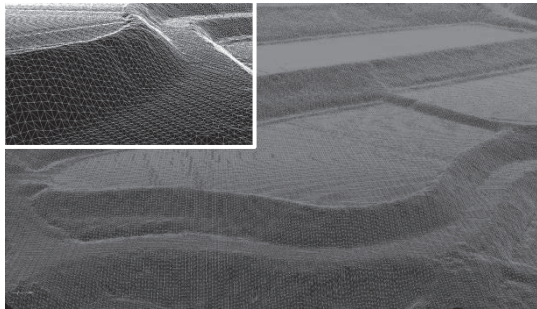


図-11 地形モデル(TINモデル)

5. 測量分野における必要精度

地上型レーザスキャナーの計測に限ったことではないが、データはその目的に応じた精度を確保しなければならない。特に測量分野で使用するときには、従来法の精度は確保するように努める必要がある。地上型レーザスキャナーで行う作業を従来法に当てはめた場合、以下の規程が該当すると考えられる。

TS等を用いる地形・地物等の測定精度

地図情報レベル	地形・地物の測定精度	標高の測定精度
500	15cm	25cm

公共測量作業規定の準則 第3編 第2章 第4節 第2款 第95条

なお、測定距離の標準距離は150mとする。

数値地形図データの精度

地図情報レベル	水平位置の標準偏差	標高点の標準偏差	等高線の標準偏差
500	25cm以内	25cm以内	50cm以内
1000	70cm以内	33cm以内	50cm以内

公共測量作業規定の準則 第3編 第1章 第2節 第80条

横断測量の許容範囲

区分	距離	標高
山地	L/300	5cm+15cm√(L/100)

公共測量作業規定の準則 第4編 第2章 第7節 第362条

地形モデルの作成後には、以下の手法で精度を確認しておく必要がある。

1. 計測データ(生)とモデルから作成した横断データの比較、検証を行う。
2. トータルステーションによる横断測量(実測)を行い、モデルから作成した横断データと比較・検証を行う。

6. 事例

平成 23 年長野県北部地震の発生に伴い、新潟県中魚沼郡津南町辰ノ口地区において発生した土砂崩壊に対して砂防計画に必要なデータを得るために地上型レーザスキャナーによる測量を実施。

- 条件
- ・拡大崩落、土砂除去作業による 2 次災害の防止（立入りエリア規制）
 - ・縦断面図、横断面図の作成
 - ・流出土砂量、状況の把握



図-12 調査箇所全景・崩壊部



図-13 計測点設置 (GNSS)・計測状況



図-14 地上型レーザスキャナーによる計測データ

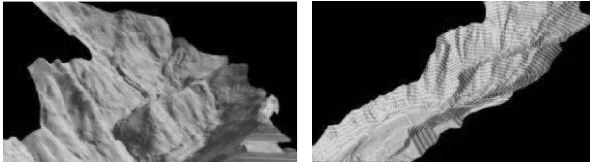


図-15 地形モデル

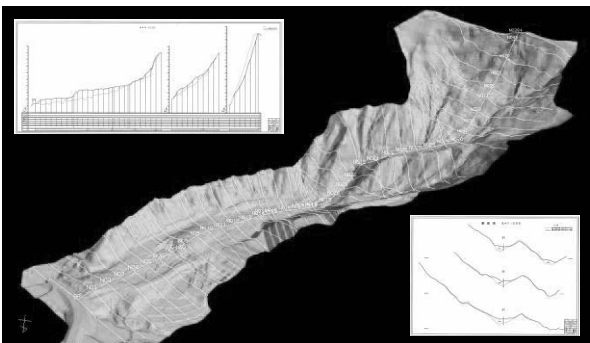
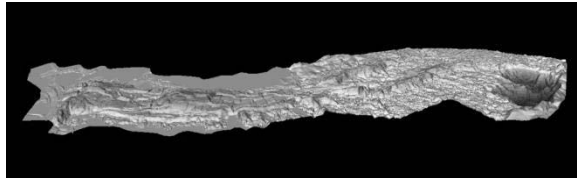
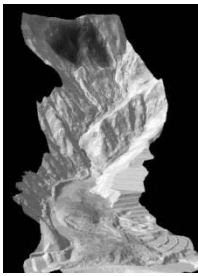


図-16 地形モデルから縦断面図・横断面図の作成

既存航空レーザ測量成果より同一メッシュの地形モデルを作成し、本計測データと差分量を算出。縦断比較図・横断比較図のほか土砂流出分布図を作成。

図-17(右)鳥瞰図と差分図の重図
図-18(下)差分量による鳥瞰図



調査範囲は 0.17km²と地上型レーザスキャナーによる計測としては広範囲であったが、障害となる繁茂した草・木も少なかったため、計測作業は 3 日（計測点 13 箇所）で終了した。また、計測後に従来法による横断測量を実施し、精度確認を行ったが、著しく精度が低下している箇所等は確認されなかった。（調査可能なエリアにて実施）

7. まとめ

地上型レーザスキャナーは、計測状況によって精度が変動してしまうため、手法の標準化（規格化）は、実際のところ難しいと思われる。しかし、表-3 に示すとおり対象地によっては、その効果は飛躍的に伸び、測量分野においても有効な手法であることは間違いない。また、新潟県などの降雪地では限られた期間の中で効率的な測量・設計が必要なこと、情報化施工の推進により測量時からの 3 次元化が求められつつあることなども、測量分野において、地上型レーザスキャナーが普及する要因になると考える。

		地上型レーザ	従 来 法	航空レーザ
効 率 性		○		◎
精 度	横断面(緩)	○	◎	
	横断面(急)	◎	○	
安 全 性		○		◎
汎 用 性		◎		○
費 用		◎	○	

表-3 手法選択とその効果（事例現場の場合）

参考文献

- 1) 国土交通省国土地理院 公共測量作業規程の準則
- 2) 国土交通省国土地理院

航空レーザ測量による数値標高モデル (DEM) 作成マニュアル(案)

探査計測技術を用いた大規模斜面災害の危険箇所の把握に関する最近の研究

石塚忠範（（独）土木研究所）*，横山修（国土防災技術（株）），地頭蘭隆（鹿児島大学）

一色弘充（（独）土木研究所），水野正樹（国土技術政策総合研究所）

キーワード：レーザー測量（LiDAR），溪流水・湧水調査，空中電磁波探査，衛星干渉 SAR 解析

1. はじめに

我が国では、大規模地すべり、深層崩壊などの大規模な斜面災害が繰り返し発生しており、最近でも2011年の東日本大震災や台風12号などにより甚大な被害がもたらされている。このような大規模斜面災害の危険箇所を把握することは、施設によるハード対策やハザードマップ、センサー等の監視情報にもとづく警戒避難を実施していく上で不可欠である。

近年、航空レーザー測量や空中電磁探査、人工衛星リモートセンシングなどの技術を用いて、従来得るのが困難であった詳細な表面地形、面的な地下構造、微小な地表面の変位などの情報が得られるようになってきており、これらの新たな調査、計測技術によって得られる情報を活用した研究が進められている。また、地すべり、深層崩壊の発生には地盤内部の地質構造とともに、それらを反映した水文特性が深く関わっていると考えられ、斜面水文学的なアプローチから深層崩壊等の発生危険斜面を把握することや、それらの情報を警戒避難に活用するための検討が進められている。

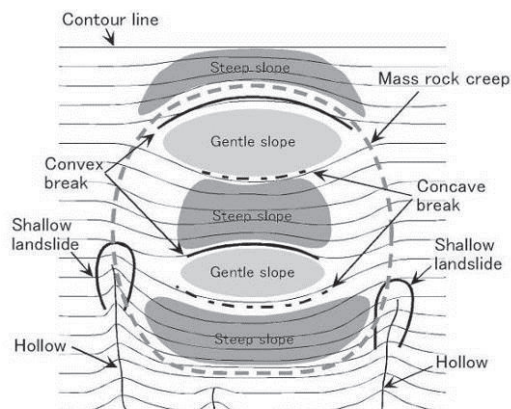
本稿では、こうした観点から進められている最近の研究について概観し、これまでの成果と今後の課題について報告する。

2. レーザー測量データを用いた岩盤クリープ斜面の抽出

岩盤クリープ斜面を抽出することは、斜面の不安定性評価や深層崩壊の予測を行う上で極めて重要であるものの、従来行われてきた空中写真判読では、微小な岩盤クリープの特徴を抽出することは困難であった。航空レーザー測量により得られた地表面の詳細な地形情報を用いて、岩盤クリープ斜面を抽出する手法について検討を行った。

2.1 岩盤クリープ斜面の抽出指標

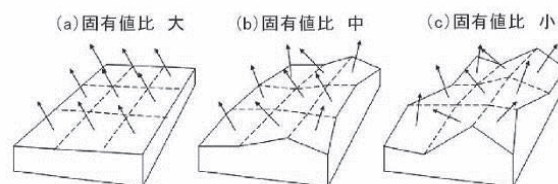
岩盤クリープ斜面は、一般的には、①斜面内に深い谷や沢がない、②斜面内に対をなす遷緩線、遷急線が分布する、③両側の境界に小さな谷や小崩壊が形成されている、④上部の境界付近に谷向きの急崖



図－1 岩盤クリープ斜面周辺の地形的特徴¹⁾

が存在するなどの地形的特徴を有している（図－1）。

横山ら¹⁾は、複数の解析ウィンドウサイズを用いることにより、岩盤クリープ斜面内の地形的特徴①、②を定量的に記述できることを示した。解析ウィンドウサイズとは、1つのグリッドセルに対して地形量を計算する際に使用する隣接点との距離である。ウィンドウサイズを変えることで、標高データの密度は高いまま、大きなスケールの地形情報を表現することが可能となる。地形量には、斜面勾配と固有値比²⁾を用いた。固有値比は、斜面に立てた垂線ベクトルの乱れを地表面の乱れとして評価するもので、値が大きいと平坦で滑らか、小さいと表面形状の変化が大きいことを表現でき、凹凸の程度を表している（図－2）



図－2 固有値比の概念図³⁾

横山ら¹⁾によると、岩盤クリープ斜面では、ウィンドウサイズにかかわらず斜面勾配の中間値は一定であった。（図－3 左上）。一方、非岩盤クリープ斜面では、ウィンドウサイズがおおきくなると、斜面勾配の中間値は徐々に小さくなった（図－3 右上）。

岩盤クリープ斜面の固有値比の中間値は、解析ウ

インドウサイズが谷や遷急線の出現周期 (80m 程度) の 2 分の 1 から 4 分の 1 のとき, 最も小さくなった (図-3 左下)。非岩盤クリープ斜面でも, 岩盤クリープ斜面と同様に谷の出現周期 (80m 程度) の 2 分の 1 から 4 分の 1 のとき, 固有値比の中間値は最も小さくなった (図-4 右下)。ただし, 非岩盤クリープ斜面では, 中間値の最小値は岩盤クリープ斜面よりも小さかった。

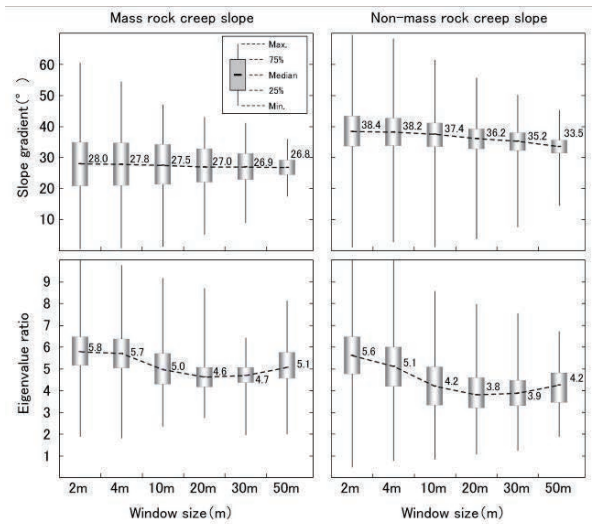


図-3 ウィンドウサイズ毎の斜面勾配と固有値比¹⁾

岩盤クリープ斜面内に深い谷や沢がないといった地形的特徴は, ウィンドウサイズを変化させたとき, 斜面勾配の中間値の変化が小さいかどうか, 最小となる固有値比の中間値が低いかどうかで記述できると考えられる。ここでは, ウィンドウサイズを変化させたときの, 最小となる固有値比の値とそのウィンドウサイズにより検討した結果を報告する。

2.2 検討対象地域と検討箇所

検討対象地域は, 宮崎県の鰐塚山地である。地質は, 四万十帯の付加コンプレックス (古第三系日向層群・日南層群) であり, 主に砂岩, 泥岩が分布している。鰐塚山地では, 2005 年 9 月の台風 14 号により多数の深層崩壊が発生した。その多くは, 岩盤クリープ斜面で発生していた可能性が高い。

鰐塚山 (標高 1,118m) の山頂から北東に伸びる尻無川の左岸側において, 空中写真により, 3 つの岩盤クリープ斜面を抽出した (図-4 点線)。また, 現地踏査により, 前述の岩盤クリープ斜面に一般的に見られる微地形や岩盤の変形に伴う走向傾斜の変化や地質構造を確認し, 岩盤クリープ斜面であることを確認した。

非岩盤クリープ斜面とした地形は, 段丘面・溪床, やせ尾根, 深い谷の 3 種をとした (図-4 の実践)。

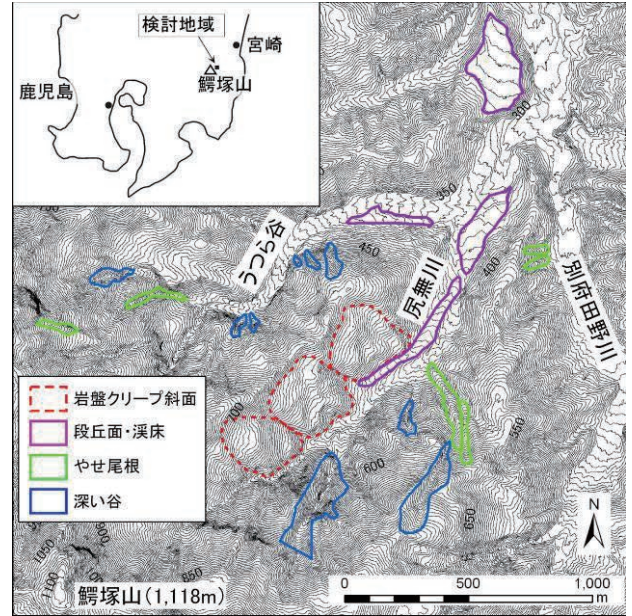


図-4 検討対象地域

2.3 方法

LiDAR データより, 2m グリッドの DEM を作成した。地形量を算出する解析ウィンドウサイズは, 2, 4, 10, 20, 30, 50m の 6 種とした。

斜面勾配は, Burrough and McDonnell⁴⁾の手法に基づき算出した。3×3 のグリッドセルにおいて, 中心セル (座標値 x, y) の標高を $Z_{x,y}$ とすると, 斜面勾配 I (rad) は, 式 1 にて算出される。

$$I = \text{atan} \sqrt{(dz/dx)^2 + (dz/dy)^2} \quad \dots\dots (1)$$

$$\frac{dz}{dx} = \frac{1}{8D} \{ (Z_{x-1,y+1} + 2Z_{x-1,y} + Z_{x-1,y-1}) - (Z_{x+1,y+1} + 2Z_{x+1,y} + Z_{x+1,y-1}) \} \quad \dots\dots (2)$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{1}{8D} \{ (Z_{x-1,y+1} + 2Z_{x,y+1} + Z_{x+1,y+1}) - (Z_{x-1,y-1} + 2Z_{x,y-1} + Z_{x+1,y-1}) \} \quad \dots\dots (3)$$

ここで, I は斜面勾配, dz/dx は中央セルから x 方向への標高値の変化率, dz/dy は中央セルから y 方向への標高値の変化率として, 式 2, 式 3 でそれぞれ表される。 D は, グリッドセルの大きさ (ウィンドウサイズ) である。

固有値比の算出は, Woodcock and Naylor²⁾の手法に従った。3×3 のグリッドセルにおいて, グリッドセル i の方位角を ϕ_i , 天頂角を θ_i とすると, グリッドセル i の法線ベクトル (x_i, y_i, z_i) は, 式 4 で示される。また, 法線ベクトルの方向テンソル T は, 式 5 で示される。

$$(x_i, y_i, z_i) = (\cos\theta_i \cos\varphi_i, \cos\theta_i \sin\varphi_i, \sin\theta_i) \quad (4)$$

$$T = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum y_i x_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum z_i x_i & \sum z_i y_i & \sum z_i^2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5)$$

この行列 T の固有値 (値の大きいものから順に, λ_1 , λ_2 , λ_3 とする) を求め, 式 6 により, S_1 , S_2 を求める。

$$S_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad \dots\dots\dots (6)$$

S_1 , S_2 より固有値比 γ は, 式 7 により求められる。

$$\gamma = \ln(S_1/S_2) \quad \dots\dots\dots (7)$$

2.4 検討結果

ウィンドウサイズを変えた時の固有値比の中間値の最小値と, その時のウィンドウサイズを図-5に示す。岩盤クリープ斜面における固有値比の中間値は, 20~50m ウィンドウサイズの時 4.5 前後で最小となるが, 非岩盤クリープ斜面と比較すると高い値となった。やせ尾根や深い谷では, ウィンドウサイズにばらつきはあるものの, 固有値比が 3.0 前後

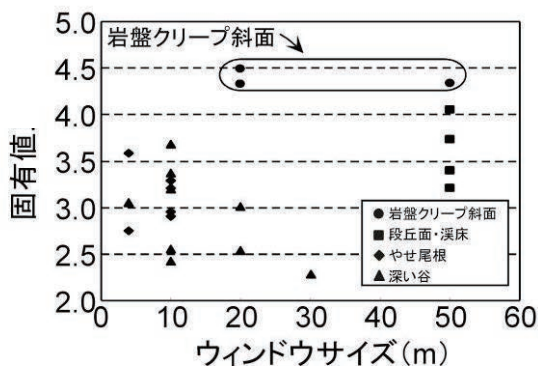


図-5 固有値比の最小値とウィンドウサイズ

であり, 岩盤クリープ斜面の最小固有値比とは大きく違っていた。段丘面・溪床溪床では, 最小固有値比は 50m ウィンドウサイズに集中していたが, 概ね 4.0 以下であった。

ウィンドウサイズを変えたときの最小となる固有値比の分布, およびその時のウィンドウサイズの分布を図-6に示す。固有値比の最小値で見ると, 岩盤クリープ斜面では最小値がおおむね 4 以上であった (図-6 a)。一方, やせ尾根や深い谷では, 最小値は 3 以下の部分が多くあった。段丘面・溪床は, 岩盤クリープ斜面と同様に固有値比 4 以上となっている場合が多い。ウィンドウサイズで見ると, 3 つの岩盤クリープのうち, 南西側の岩盤クリープ斜面は 50m ウィンドウサイズの時最小値となっており, 他の岩盤クリープ斜面とやや差があった (図-6 b)。

2.5 考察

2.4 より, 最小となる固有値比の中間値は, 4 前後であることから, 最小固有値比を用いた指標は岩盤クリープ斜面の抽出に有効な指標と言える。本検討地域では, 対象とした 3 つの岩盤クリープ斜面以外にも, 同様の最小固有値比とウィンドウサイズのパターンが確認でき, 岩盤クリープ斜面の可能性が高い (図-6 の A, B, C, D 箇所)。ただし, 最小固有値比が 4 以上の箇所においてもウィンドウサイズが 2~4m の箇所 (図-6 の E 箇所) が存在し, 非岩盤クリープ斜面の可能性の高い領域も存在していた。このことから, ウィンドウサイズを変えた場合の最小となる固有値比とそのときのウィンドウサイズの組合せが岩盤クリープ斜面の抽出にはより効果的と考えられる。また, 本稿では省略したが, 勾配変化率との組合せることにより, より高い精度での岩盤クリープ斜面の抽出が可能と考えられる。

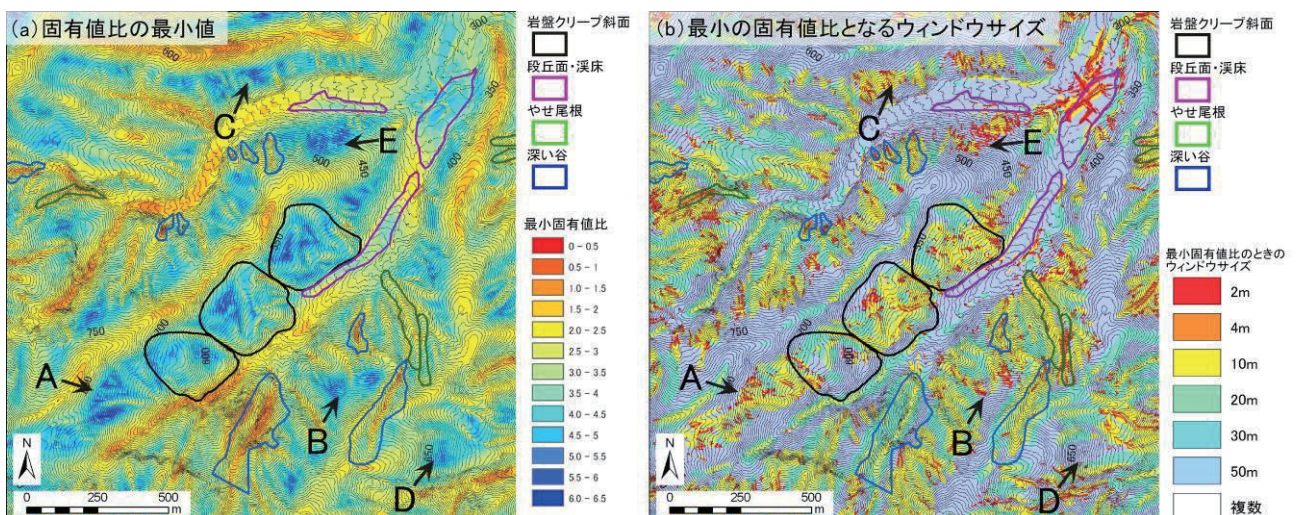


図-6 最小となる固有値比の値 (a) とウィンドウサイズ (b)

3. 流出・水質データを活用した深層崩壊の発生危険斜面の抽出

現在、「深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル(案)」³⁾に基づいて、深層崩壊発生の可能性がある溪流を抽出する作業が進められている。既往の深層崩壊研究によると、多くの深層崩壊地で多量の地下水流出がみられる。基岩内に地下水を貯留している斜面は、大雨や地震によって深層崩壊が発生する危険性が高い。上記マニュアルは深層崩壊発生の危険性がある溪流をおもに地形・地質因子から抽出するものである。これに加えて水文因子を取り入れる手法を提案する(図-7)。

方法：溪流縦断方向において溪流水の電気伝導度(EC)測定とGPS測位
必要に応じて、流量、水質(シリカ濃度、イオン濃度等)の測定
時期：低水時に実施
整理：地形図にプロット

流域レベルでの危険度判定

- 深層崩壊の頻度が高い地域(流域)において溪流流域レベルで危険度を判定
- ① 相対的にECが高い溪流
 - ② 溪流縦断方向においてECが不連続的に高い値を示す溪流
⇒基岩内に地下水を貯留している流域
⇒水文の因子からみた深層崩壊の恐れのある流域

斜面レベルでの危険度判定

- ②のECの高い地点において、斜面レベルで危険度を判定
- ③ ECの高い地点付近の湧水調査(湧水が出ている斜面、湧水の量)
- ④ 斜面脚部からの湧水が多い斜面を抽出
⇒基岩内に地下水を貯留している斜面
⇒水文の因子からみた深層崩壊の恐れのある斜面

図-7 溪流縦断方向の溪流水調査

3.1 流域レベルでの危険度判定

溪流縦断方向において溪流水の電気伝導度(EC)を測定し、その位置をGPSで測位する。ECを地形図にプロットして、①対象地域(流域)内で相対的に溪流水ECが高い溪流と、②溪流縦断方向においてECが不連続的に高い値を示す溪流を抽出する。①や②に該当する溪流は、流域内に深層風化した地層が存在し、そこを滞留した地下水が多量に流出していると推定される。これらの溪流は深層崩壊発生の危険性が高い流域と判断される。

b) 斜面レベルでの危険度判定

前項②の溪流において、ECが高い地点付近の湧水調査を行う。調査項目は、湧水点の位置、湧水が出ている斜面、湧水量である。斜面脚部から多量の湧水がみられる斜面は基岩内に地下水を貯留していると推定され、水文因子からみた深層崩壊発生の危険性のある斜面と判断される。

c) 溪流水・湧水の調査例

図-7に基づいて、2005年台風14号に伴う大雨によって深層崩壊が発生した宮崎県鰐塚山別府田野川流域(地質は堆積岩類)での調査結果を図-8に示す。流域には溪流水ECが相対的に高い溪流(a, b, e)と低い溪流(c, d)が分布している。さらに、溪流

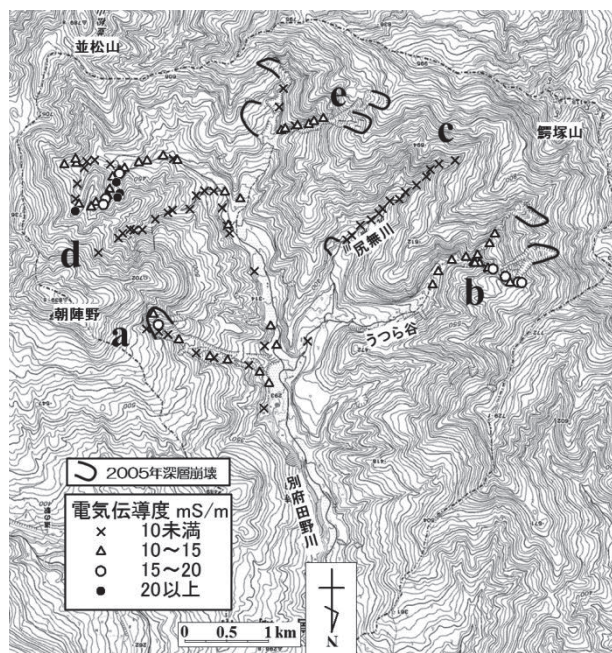


図-8 溪流縦断方向の溪流水ECの変化点と湧水分布
縦断方向において溪流水ECが不連続的に高い値を示す溪流(a, b)がみられる。深層崩壊は溪流水ECが相対的に高い溪流に位置しているものが多い。

図-9は溪流水ECの標高分布である。溪流aは標高300~500m間は溪流水ECが低い、深層崩壊が発生した標高500~600m間で急激に高くなっており、深層崩壊地からECの高い地下水の流出が続いていることがわかる。溪流bは上流に向かって溪流水ECが上昇し、源頭部には深層崩壊地が位置している。溪流cは標高400~650m間の溪流水ECに大きな変化はみられなかった。溪流dは標高350~650m間の溪流水ECは低下傾向にある。

図-10は、鹿児島県矢筈岳山体流域(地質は火山岩類)で実施した溪流縦断方向における溪流水ECおよび湧水調査結果である。図において、矢印の太

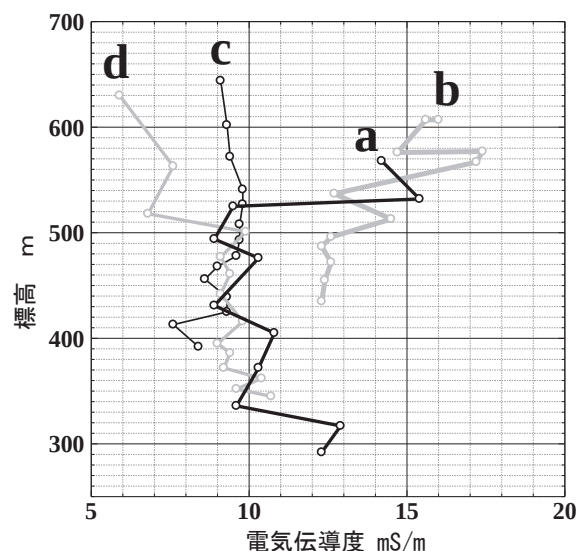


図-9 溪流水ECの溪流縦断方向の分布

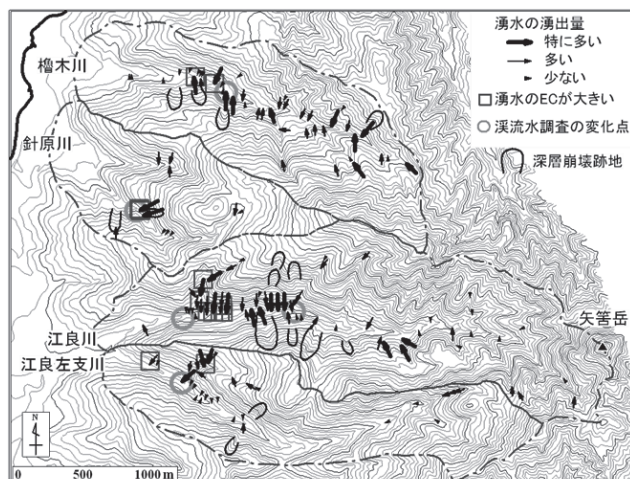


図-1 〇鰐塚山別府田野川流域における渓流水 EC の分布
さと向きは湧出量の区分と湧出している斜面の向き
であり、□印は湧水 EC が特に高かったところ、○
印は溪流縦断方向の渓流水 EC の変化点である。○
印の周辺には湧出量が多く、また EC の高い湧水が
分布しており、渓流水 EC の変化はその付近で湧出
している地下水に起因していることがわかる。さら
にその近くには過去の深層崩壊地が分布している。

4. 空中電磁探査による深層崩壊の発生規模の評価

4.1 空中電磁探査の概要

空中電磁探査は、空中や地上から電磁波を発信し
地下で発生する誘導磁場を測定することにより、地
下の比抵抗（電気の流れにくさ）構造を知ることが
できる。測定は一般にヘリコプターを用いて、バー
ドと呼ばれる送受信機を曳航しながら一定の対地高
度・速度を保ちながら航行する。探査可能深度は 100
～150m であり、面的にヘリコプターを航行すること
で三次元比抵抗分布の把握が行える。

4.2 岩盤の比抵抗値の特性

空中電磁探査により得られる比抵抗値は、岩盤の
種類や飽和度、空隙率、粘土鉱物の含有によって変
化する値である。飽和度と比抵抗の関係として、岩
石の種類に関わらず、飽和度が減少するにつれて比

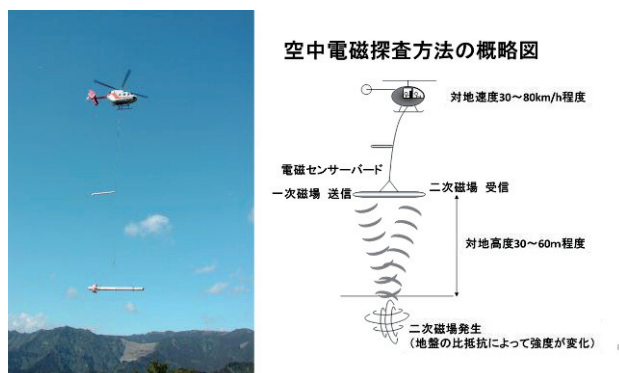


図-1 1 空中電磁探査の概要

抵抗値は大きくなる傾向にある（図-1 2）。特に、
飽和度が 40%より減少すると、比抵抗値は加速度的
に大きくなる。また、岩盤の間隙率と比抵抗値の関
係として、間隙率が増えると比抵抗値は小さくなる
傾向にある。このことから、新鮮な岩盤は相対的に
比抵抗値が高く、亀裂の発達した岩盤や風化し間隙
が大きくなった岩盤は比抵抗値が低くなることが考
えられる。

これらの物理量を用いて比抵抗値の定量的な評価
が古くからなされている。有名な経験式として、砂
岩などの堆積岩に対してアーチーの式が挙げられる。

$$Rt = a \cdot \phi^m \cdot Sw^n \cdot Rw \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 Rt ：岩石の真の比抵抗（ $\Omega \cdot m$ ）、 a ：地
層に関連した定数、 ϕ ：間隙率、 m ：膠結係数（岩
石固有の値）、 Sw ：水飽和度、 n ：地層係数の飽和
指標、 Rw ：地層水の比抵抗（ $\Omega \cdot m$ ）

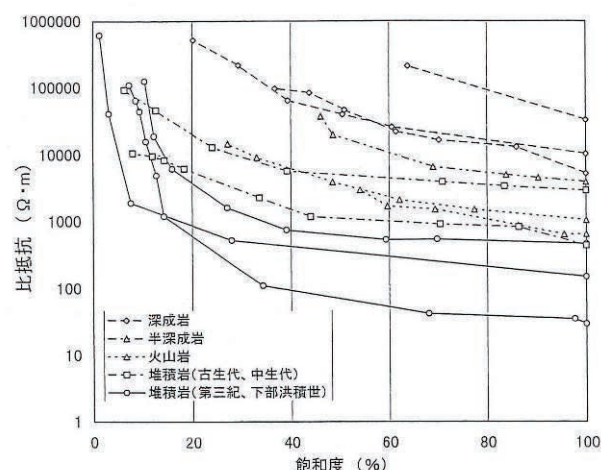


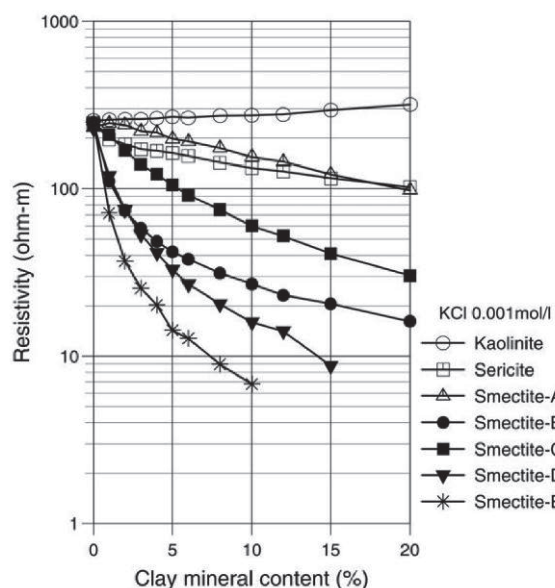
図-1 2 飽和度と比抵抗値の関係

しかし、アーチーの式は間隙率が 10～40%の砂岩
を対象として適用された経験式であり、間隙水の比
抵抗が海水程度に低い条件に基づいて得られたもの
である。このため、全ての岩石や測定条件に対して
成り立たない。一般に、粘土鉱物を含有する岩石の
比抵抗は、アーチーの式から推定される値より低く
なる。図-1 3 に粘土鉱物の含有と比抵抗の関係を示
す。カオリナイトを除いてセリサイトやスメクタイ
トを含む岩石は比抵抗値が下がる傾向にあり、含
有量が多くなるほど比抵抗値の低下が認められる。

このように、岩盤の比抵抗値を測定することで地
質の状況や、飽和度、間隙率、粘土鉱物の含有量を
推定する指標となり得る。

4.2 深層崩壊地への空中電磁探査を用いた調査事例

空中電磁探査を用いた深層崩壊箇所の調査事例と
して、宮崎県宮崎市の鰐塚山の調査結果を示す。空



図－１３ 粘土鉱物の含有と比抵抗値の関係

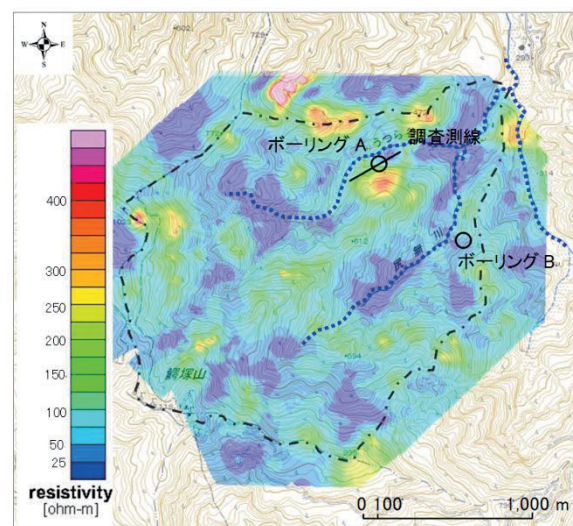
中電磁探査は平成 17 年に発生した深層崩壊斜面を含む約 4km²を対象に実施した。ボーリング調査を実施し、地質情報の取得と電気検層による比抵抗値の補完を行った。図－１４に深度 20m の比抵抗平面図と図－１５に深度 80m の比抵抗平面図、図－１６にボーリング箇所を通る比抵抗断面図を示す。調査地の比抵抗値は数 10～500Ω・m で、大局的には深度が増すにつれて比抵抗値が大きくなる傾向を示す。深度 20m までの比抵抗値 50Ω・m 程度に相当する層は崖錐堆積物にあたり、深度 80m に広く分布する比抵抗値 200Ω・m 以上の箇所は不動岩盤と推定される。表－１にボーリングにより確認された地盤状況と比抵抗値の対比を示す。②層に区分される風化岩と破碎帯は概ね 30～60Ω・m である。③層は比較的亀裂も少なく風化も見られない。地下水位の変動を示す褐色風化や湿潤密度の違いにより、①②層が不安定となった可能性が高いとし、不安定層と不動岩盤の境界は 50Ω・m 程度と推定された。これにより、比抵抗

表－１ 地盤状況と比抵抗値の関係

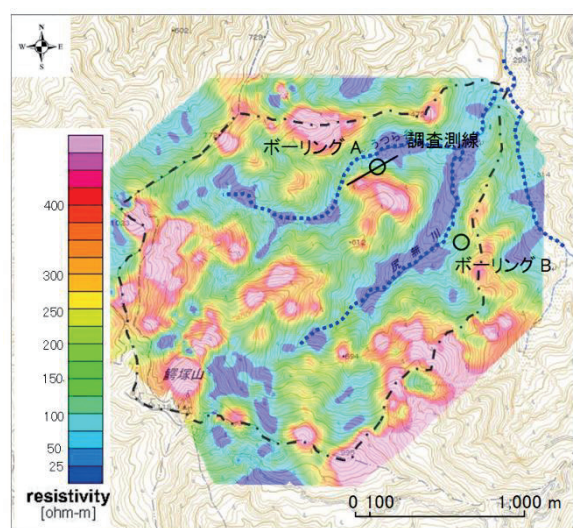
層区分	土質区分 地盤状況	深度(m)		比抵抗値 (Ω・m)	湿潤密度 (g/cm ³)
		A 地点	B 地点		
①	表土層, 崖錐堆積物, 礫質土(土砂)	0.00 ～6.50	0.00 ～9.30	—	2.18～ 2.22
—	塊状砂岩(褐色風化)	6.50 ～26.15		60～100	
②a	砂岩優勢(褐色風化)	—	9.30 ～20.05	30～40	2.16～ 2.58
②b	断層破碎帯 破碎部を持つ泥岩	26.15 ～67.90	20.05 ～22.60	40～60	
③	泥岩優勢層 (亀裂: 多)	67.90 ～75.00	22.60 ～29.35 34.60 ～41.00	50～80	2.64 2.58
	砂岩優勢層 (亀裂: 小)	—	29.35 ～34.60	60～	2.64

値が 50Ω・m 以下となる土層部分が深層崩壊の発生の恐れのある不安定層(風化層)に相当するとした。

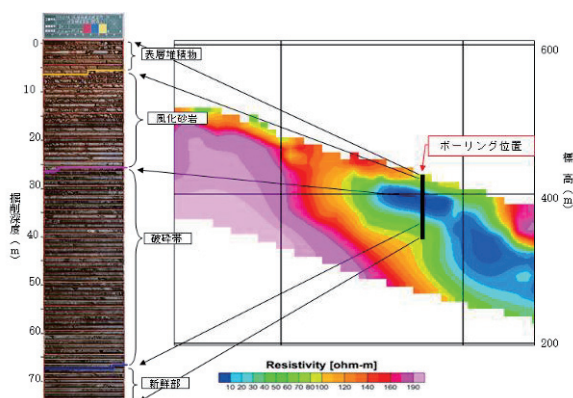
以上のことから、比抵抗値を指標(しきい値)とすることにより不安定層と不動岩盤の境界を推定することができた。空中電磁探査により、斜面内部の情報が面的に得られ、深層崩壊の発生する恐れのある斜面の抽出ができる可能性が示された。



図－１４ 深度 20m の比抵抗平面図



図－１５ 深度 80m の比抵抗平面図



図－１６ 比抵抗断面図

5. 衛星干渉 SAR 画像を用いた大規模土砂災害監視

衛星合成開口レーダー画像を用いた干渉 SAR 解析は、地震や火山活動等に伴う地盤変動の把握に用いられている技術であり、土砂災害への応用が期待されている⁷⁾。この手法では2 時期以上の合成開口レーダー画像を用いて位相差を計測することで、広域に地盤変動の生じた地域が面的に把握される。本報告では、災害状況把握を目的の一つとした日本の陸域観測衛星 ALOS (だいち) の合成開口レーダー画像を使用して、干渉 SAR 解析を用いた土砂災害予兆監視手法の有効性を確認した。なお、使用した衛星データは、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) より共同研究の一環として提供を受けた。

5.1 解析対象地域と検討方法

解析対象地域は、土塊移動が確認され変動量が観測されている福島市塩の川地すべり、及び地盤が変動した可能性がある福島市土湯温泉付近の2 地域とし、衛星干渉 SAR 解析を用いた地盤変動の把握を行った。植生に覆われた斜面が対象となるため、SAR データは植生域の影響の少ない L バンドの ALOS PALSAR を使用した。解析対象地域を、図-17 に示す。

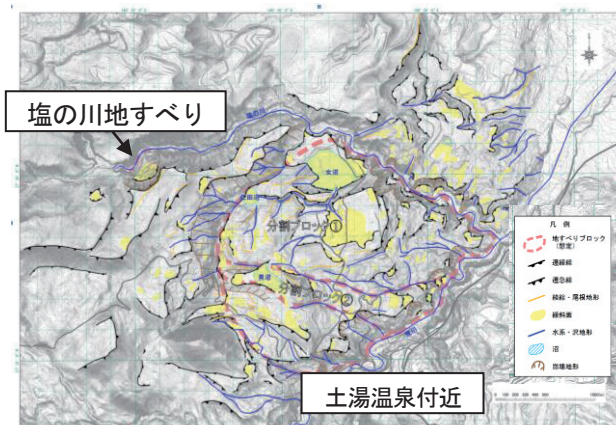


図-17 解析対象地域

(福島市塩の川地すべり・土湯温泉付近)

5.3 衛星干渉 SAR 解析を用いた地盤変動の把握結果

干渉 SAR 解析処理では、マッチング処理の精度を確保するために、処理過程でマッチングの精度を確認し、精度が低い場合には、処理パラメータ等を見直し、手動でタイポイントを取得する等の再処理を行った。また、干渉処理の過程で作成されるコヒーレンスの画像を利用して、地すべり地域の干渉状況を確認した。

塩の川地すべりと土湯温泉付近を含む SAR 画像のペアを選定し、ディセンディング (南向軌道) 3 ペア、アセンディング (北向軌道) 4 ペアの計7 ペア

で干渉処理した結果、土湯温泉付近で1 ペアが良好に干渉した。さらに、塩の川地すべり地域に対象を絞り、東日本大震災前の追加4 ペアで干渉処理した結果、塩の川地すべりで1 ペアが良好に干渉した。塩の川地すべり地域における2009 年9 月20 日と2009 年5 月5 日の解析結果を、図-18 に示す。塩の川の移動杭の変動量10cm 前後の鉛直変位に対して、3cm 程度の変動を確認した。

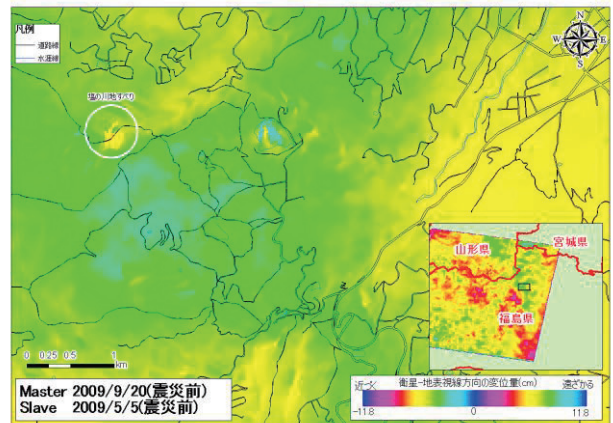


図-18 干渉 SAR の解析結果

また、土湯温泉付近の既存地すべり分布図 (ブロック図)⁸⁾と LP データ等より地すべりブロックを想定し、2011 年2 月2 日 (震災前) と2011 年3 月20 日 (震災後) の干渉 SAR 処理結果と重ねた図を、図-19 に示す。既存研究で報告⁹⁾されているように、良好に干渉した土湯温泉付近では干渉縞が確認できた。

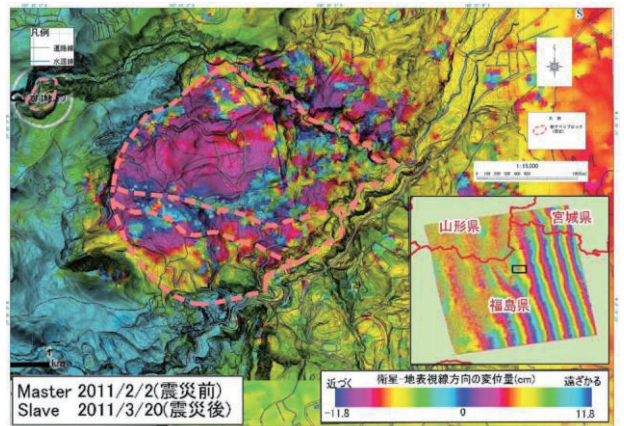


図-19 干渉 SAR 解析結果と地すべりブロック (想定)

干渉の成功確率は、好条件下で1/3 の確率となった。使用した画像ペアから干渉性低下の要因整理を行った結果、①軌道間距離の垂直成分は短いほど干渉性が高く1000m 以内が望ましい、②天候は降雨や降雪の影響を受けないことが望ましい、③観測季節は農地等の季節変化、落葉で干渉性が低下する可能性がある、④水蒸気等の影響がないよう観測時気象

条件を確認する、⑤斜面方位・勾配について、山間地は平坦地よりも軌道間距離の影響が大きい、⑥衛星側の斜面の方が、干渉性が高い、⑦電離層擾乱について、電離層の減少時に発生するプラズマの変動、電離層の緯度方向への伝搬影響があることなどが分かった。

5.5 衛星干渉 SAR 画像活用の課題と展望

土砂災害予兆監視手法の有効性について検討した結果、干渉 SAR は、調査手法が確立されてきたものの、定量的な変動量の把握は難しく、定性的な変動有無の把握、10cm 程度のオーダーでの変動量把握は可能であった。特に、①干渉可能性の高い条件でのペアの選定が重要であること、②複数ペアで調査すること、③変動有無の確認は微地形分布図、土砂災害危険箇所マップ、地すべり分布図などの他のデータと組み合わせた判断が必要であること、に留意が必要である。ただし、必ずしも理論通りに干渉する訳ではなく、良好な干渉 SAR 解析画像は好条件下で 1/3 程度の確率であり、4 ペア程度以上の複数処理が望ましい。

今後、ALOS-2 が運用されれば、観測周期の短縮や高分解能化、軌道制御技術の向上などの改善による干渉精度向上が図られ、高頻度かつ高精度な干渉 SAR が可能となり、数 cm オーダーの変動量の把握が期待される。

6. まとめ

近年の探査計測技術の進展により、地表面の形状や変動に加えて、地盤内部のゆるみや風化を反映していると考えられる比抵抗などの物性値などの情報が、広域的あるいは面的に入手できるようになってきた。また地盤内部の水文プロセスを、ボーリング孔を用いた直接的な地下水位観測だけではなく、渓流水等の水質分析から明らかにし、表面地形に関わる結果と結びつけて議論をする取り組みが行われている。本稿で取り上げたような手法からのアプローチにより、深層崩壊をはじめとする大規模斜面現象の対策を行っていく上で、有益な情報が得られるものと考えられる。

一方、これらは広域的、面的に情報を得る上で有効であるものの、計測方法や解析方法の特性からその精度と適用範囲には制約があると言え、それらを十分に勘案した上で、結果の解釈、利用を行っていく必要がある。現地調査等も含めた複数の計測手法を組み合わせることで、例えれば斜面の変動状況などに

ついて、総合的に判断することが可能となると思われる。適用事例が蓄積され、さまざまな条件での知見が明らかにされることと合わせて、より精度の高いデータ取得が可能となるよう、今後とも計測技術のさらなる高度化が図られることが期待される。

引用文献

- 1) 横山 修・内田太郎・中野陽子・石塚忠範・笠井美青・鈴木隆司 (2012) : レーザー測量データを用いた岩盤クリーブ斜面の表面形状把握, 砂防学会誌, 64-4, p. 13-24
- 2) Woodcock, N.H and Naylor, M.A. (1983) : Randomness testing in the three-dimensional data, Jour. Struct.Geol. 5, 539-548
- 3) 内田太郎・中野陽子・秋山浩一・田村圭司・笠井美青・鈴木隆司 (2010) : レーザー測量データが表層崩壊発生斜面予測及び岩盤クリーブ斜面抽出に及ぼす効果に関する検討, 地形, Vol. 31, No. 4, p. 383-402
- 4) Burrough, P. A. and McDonell, R. A. (1998) : Principles of Geographical Information Systems, Oxford University Press, New York, p. 190
- 5) (独) 土木研究所 : 深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル (案), 土木研究所資料, 第 4115 号, 2008
- 6) 地頭菌隆・下川悦郎・寺本行芳 : 深層崩壊発生場予測法の提案ー鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にしてー, 砂防学会誌, 59(2), 5-12, 2006
- 7) (財) 砂防・地すべり技術センター / 独立行政法人宇宙航空研究開発機構、ALOS/PALSAR を用いた山形県月山周辺部における土砂移動懸念箇所の抽出と現地状況との対照 (自主研究)、sabo Vol. 105 Jan. 2011 P28-33
- 8) 防災科学研究所地すべり分布データベース、http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/lsweb_jp_new/gis/map_blue.html
- 9) 北海道大学理学研究院 村上亮ほか、資料 8 東日本大震災に係る PALSAR 解析事例～土砂災害危険箇所抽出の試み～、(平成 23 年度第 1 回) 第 6 回土砂ワーキンググループ会合、July. 2011

新潟県内の最近の積雪・気象状況－積雪・融雪の地すべりへの影響－

上石 勲、山口 悟、平島寛行(防災科学技術研究所雪氷防災研究センター)

Isao KAMIISHI, Satoru YAMAGUCHI, Hiroyuki HIRASHIMA

キーワード: 積雪と気象変化、融雪、地すべり

Keyword: change in weather and snow conditions, snow melt, landslide

1. はじめに

地球の温暖化に伴って、雪の量は相対的に減少しているのではないかとわれてきた。しかし、2004-05年(中越地震後の大雪)、2005-06年(平成18豪雪)、最近3年間(2010-11、2011-12、2012-13年)のように、大雪が断続的または、連続的に発生しており、雪害が多発している。また、激しい寒暖の差や集中的な降雪によって雪崩の発生や吹雪による障害も多い。

2. 冬期の気象と雪の変化

図1は新潟地方気象台、図2は上越市高田(気象庁高田特別地域気象観測所)における季節全体と冬(12月～3月)、春(3月～5月)の平均気温の変化である。1980年以降の温度の上昇傾向は顕著であったが、最近では2005-06年の冬期や2012年の春の極端な低温のように、とくに冬と春は年による気温の上下動が激しい傾向にある。

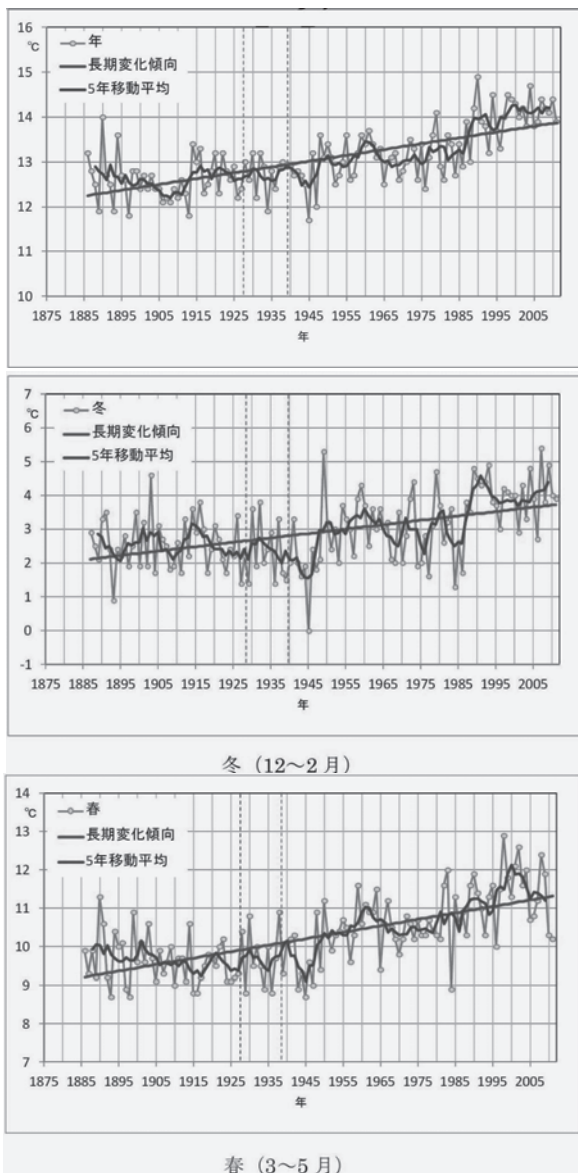


図1 新潟地方気象台における年平均気温(年, 冬, 春)の経年変化
(気候変化レポート2012 気象庁)

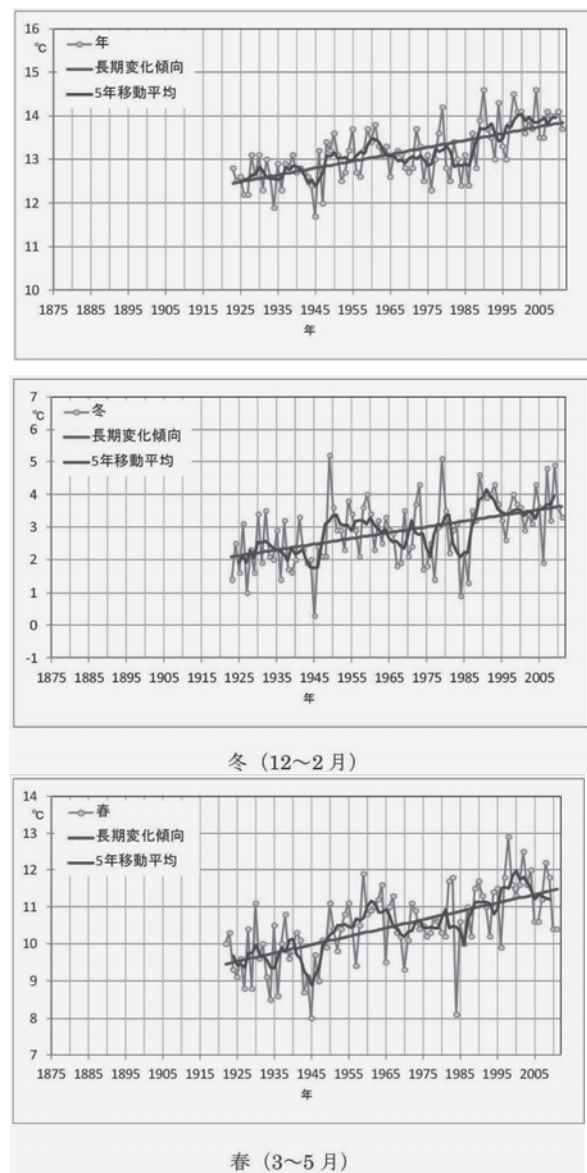


図2 上越市高田(高田特別地域気象観測所)における平均気温(年, 冬, 春)の経年変化
(気候変化レポート2012 気象庁)

図3は上越市高田(気象庁高田特別地域気象観測所)における年最大積雪深の1889年から今冬までの変化である。1986年以降少雪の年が続いていたが、最近では150cm前後となっており、一斉雪下ろしも実施されている。

図4は同様に上越市高田(気象庁高田特別地域気象観測所)の年間降水量の変化、図5は1923年から今年までの最大積雪深と冬期の降水量、平均気温の変化である。気温は1950年と1990年に上昇し、降水量は気温とは逆に減少傾向にある。しかしその減少の割合は積雪深ほど小さくなく、また、その変動は極端ではない。冬期の降水が雪になるが、雨になるかは気温に影響されると考えられる。

また、昨冬のように最近では12月中旬ごろに大量の降雪がある年や、1月中旬に積雪のピークが来る年(2009～10、2010～2011年)があるなど、雪の降り方が季節的に早くなる冬もある(図14参照)。日本海側の雪は季節風が日本海を渡る時に海水と気温との温度差が大きいほど供給される水蒸気の量が多く降雪量も多くなる。12月から1月の冬の初めは日本海の海水温が高いため、同じ寒気が流入しても、海水温が下がる2月よりも降雪量が多くなる能性も言われている。

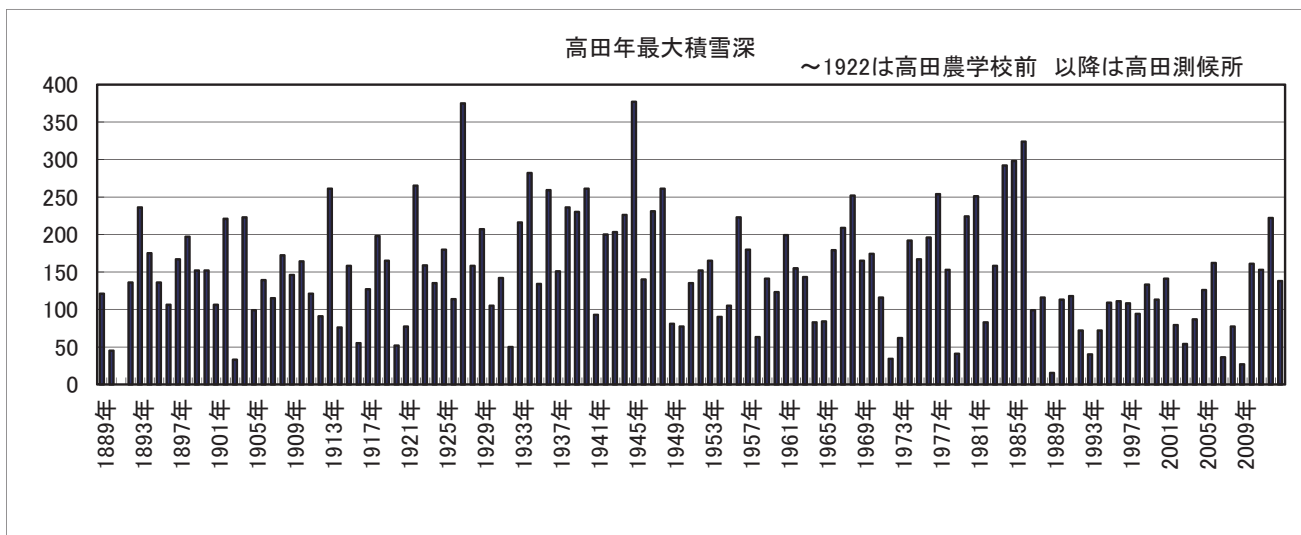


図3 上越市高田における年最大積雪深の経年変化

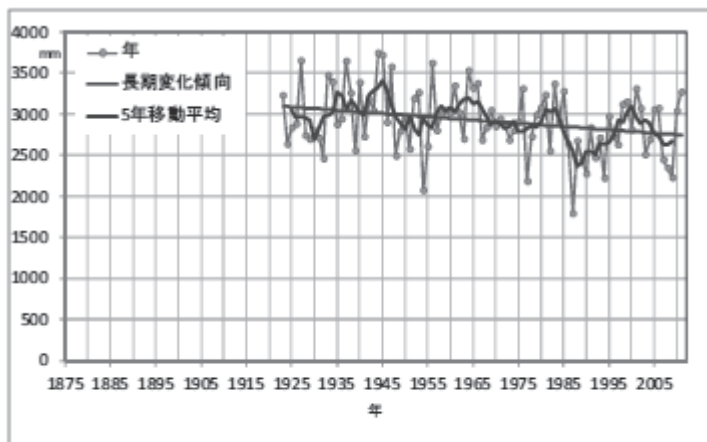


図4 高田特別地域気象観測所の年降水量経年変化
(気候変化レポート2012 気象庁)

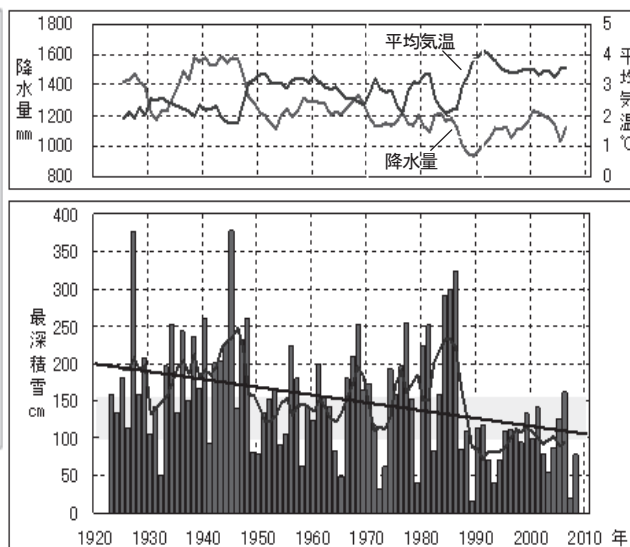


図5 高田特別地域気象観測所における
年最大積雪深と冬期平均気温・降水量の変化
(気候変化レポート2012 気象庁)

図 6、表 1 に示すように海水温も同様に年々上昇している。気温と海水温の微妙な関係で、先述のように降雪量を増加させる要因になり得る。

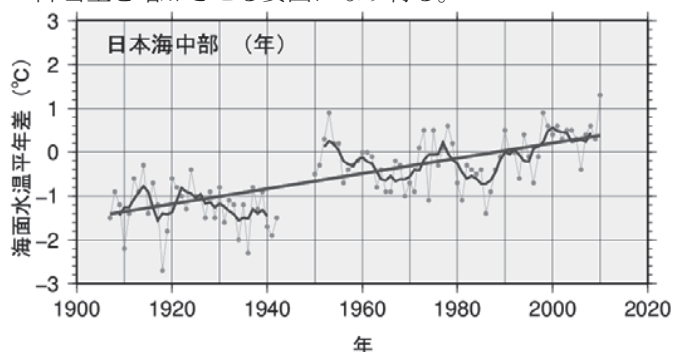


図 6 日本海中部の海域平均 海面水温平年差 (年平均)
(気候変化レポート 2012 気象庁)

表 1 日本海の海域平均海面水温(年平均及び季節平均)の長期変化傾向(°C/100 年) (気候変化レポート 2012 気象庁)

海域 上昇率	日本海中部	日本海南部
年	+1.74±0.37	+1.26±0.37
冬(1-3月)	+2.44±0.55	+1.60±0.55
春(4-6月)	+1.84±0.47	+1.30±0.44
夏(7-9月)	*	*
秋(10-12月)	+2.00±0.53	+1.65±0.39

図 7 は長岡市の気象庁観測点と雪氷防災研究センターにおける年最大積雪深である。1990 年以降は最大積雪深が 2m 以上になること最近までなかったが、ここ 3 年連続で積雪深が 2.0m を越えた。

図 8 は雪氷防災研で測定している年最大積雪深と最大積雪重量の関係を示したものである。今冬 2012-13 年の積雪重量は観測開始以来 2 番目の大きさとなった。

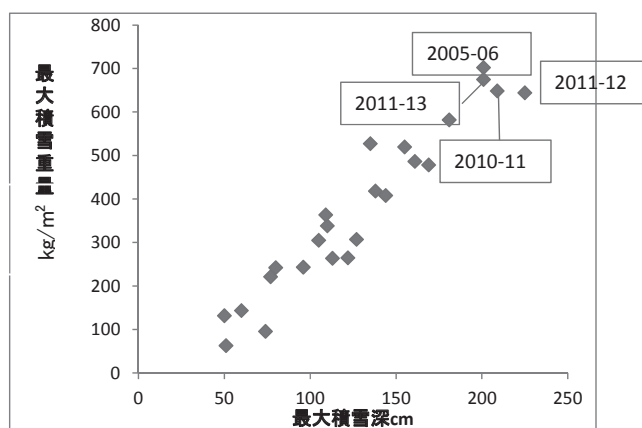


図 8 最大積雪深と最大積雪重量の関係
(雪氷防災研：長岡)

図 9 は雪氷防災研究センターで展開している積雪観測点の年最大積雪深の経年変化である。長岡市田代観測点では今冬 4m50cm と過去 23 年の中では最大となった。また、山間部の積雪深の年変動は平地部よりも小さい。このことも地すべりなどの土砂災害と積雪との関係を考える上で重要な現象であるとも考えられる。

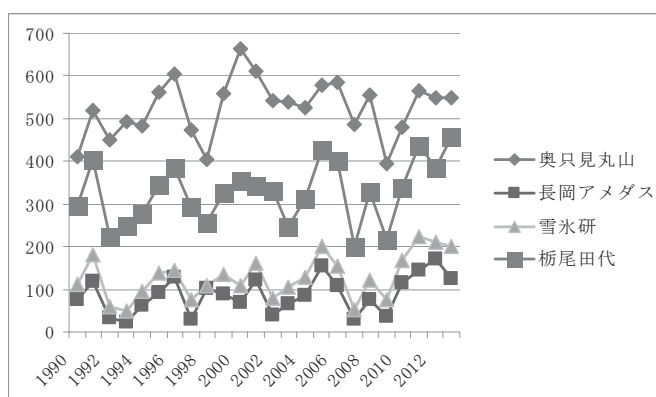


図 9 雪氷研積雪観測点における年最大積雪深の変化

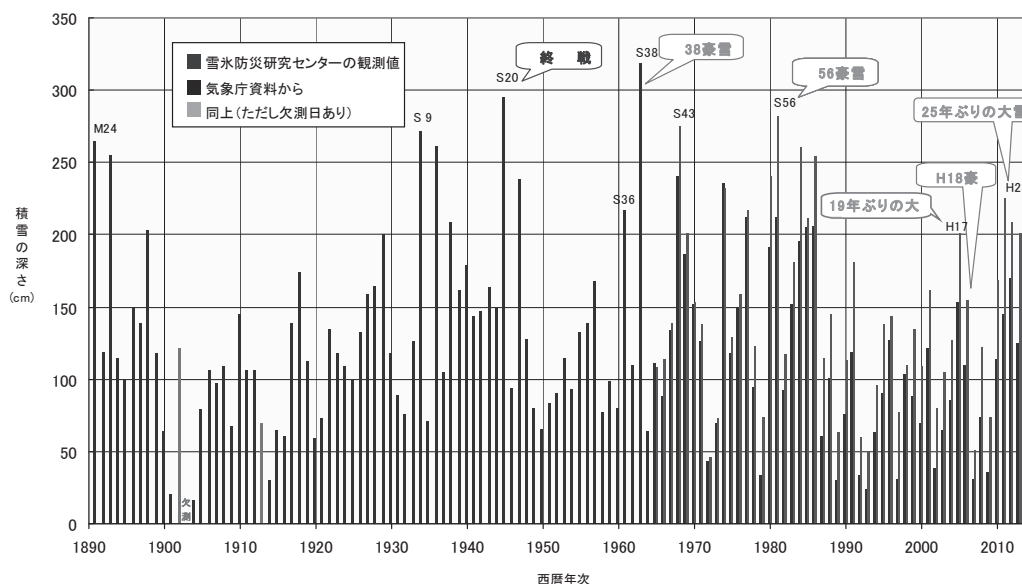


図 8 長岡における年最大積雪深の経年変化

3. 積雪と地すべり

図 10 は、2010-11 年、2011-12 年の 11 月～5 月に新潟県内で発生した積雪・融雪期地すべり（新潟県砂防課データ）と、雪氷防災研究センター構内で測定して積雪深、気温、積雪重量（地上に置いた水枕状の容器にかかる雪の重たさを容器内の圧力で測る）、ならびにライシメーター（3m×3m）で測定している底面流出量との関係を示している。2010-11 年、2011-12 年とも 4 月の地すべり発生件数は多い。しかし、1 月、2 月の厳冬期や 3 月に発生した地すべりは、2010-11 年は少ないが、2011-12 年は多い。これには、寒暖の差や積雪深の変化が関係している可能性も考えられる。

図 11 は同様に新潟県砂防課で集計している地すべりのうち、3～5 月に発生した件数と雪氷防災研究センターで測定している年最大積雪深、年最大積雪重量との関係を示したものである。積雪深、積雪重量が大きいほど、地すべり発生件数は多いが、今年（2013 年）の地すべり発生件数は 4 月現在少ない傾向にある。これも積雪の多少、気温変化の状況、融雪状況などが影響している可能性が考えられる。

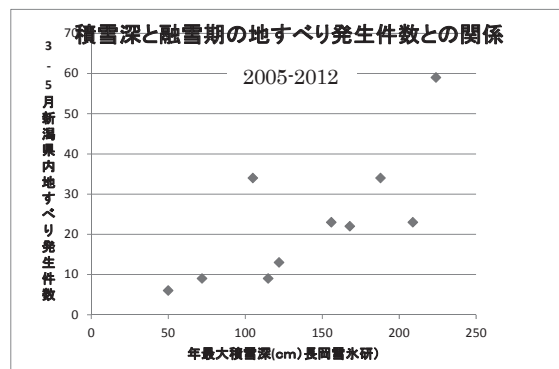
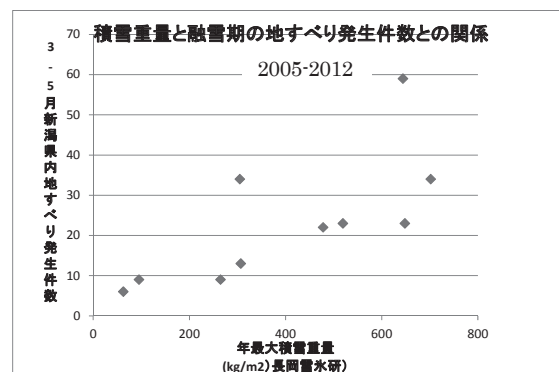


図 11 積雪深、積雪重量（雪氷防災研）と冬期地すべり発生件数(新潟県砂防課)

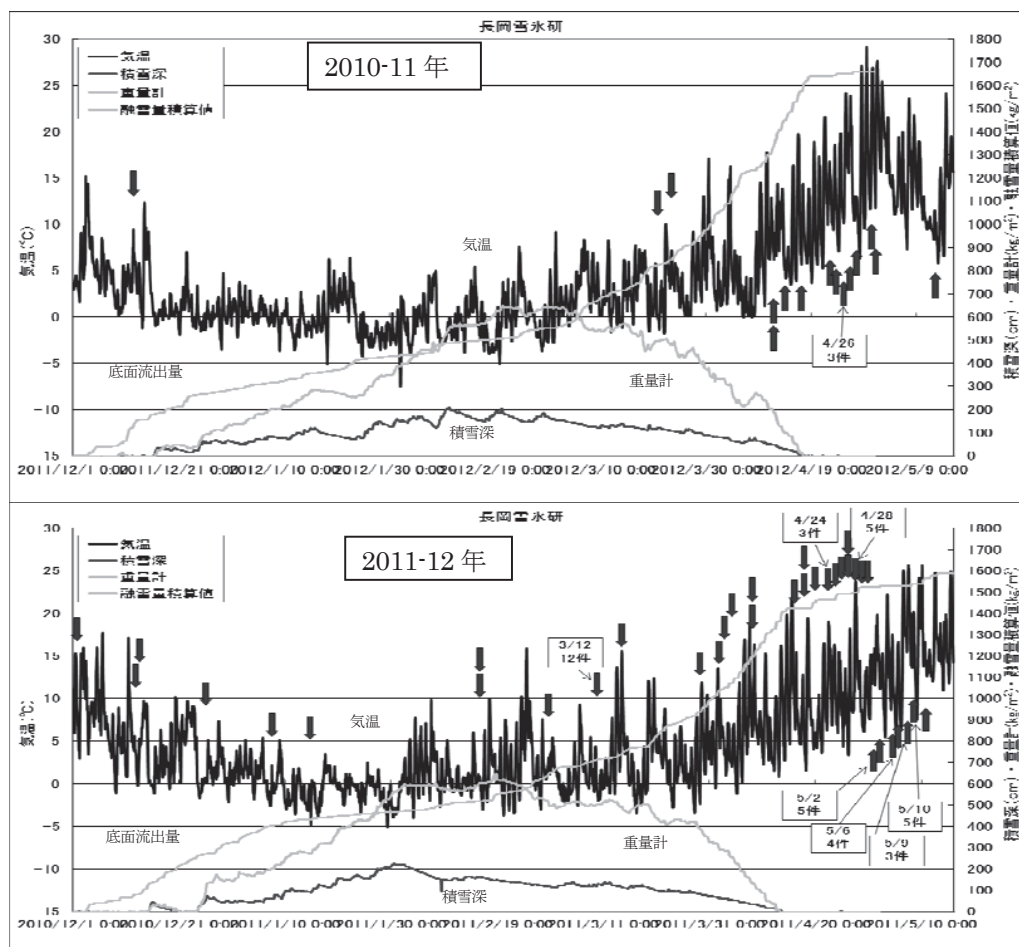


図 10 2010-12 年、2011-12 年冬期の新潟県内の積雪・融雪期地すべり（新潟県砂防課）と雪氷防災研の積雪深、気温、積雪重量、底面流出量

図 12 は雪氷防災研究センターの HP で公開している積雪重量情報で、積雪重量計の値からある期間内の重量の増加と減少量を観測点ごとに計算するようになっている。これは屋根雪処理の実施の目安に使用されておりが、融雪災害に役立てていただければと考えている。

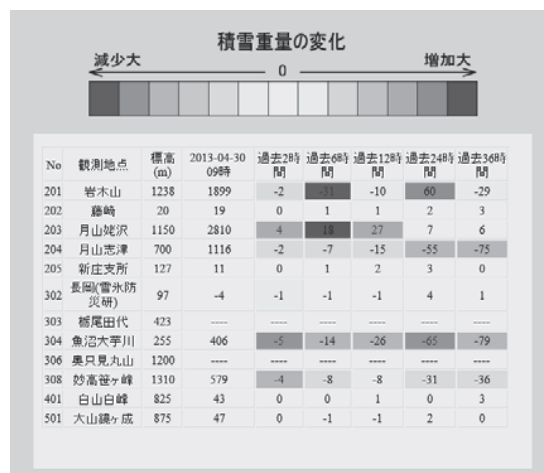


図 12 積雪重量の変化
(雪氷防災研)

図 13 は雪氷防災研究センターで研究開発を進めている積雪変質モデルを用いた積雪含水率の積雪内での変化で、積雪内部の水のしみこみを考慮して解析している。雨や融雪水の積雪内部の浸透と積雪底面から地面への供給水量を求めることができるため、将来的に地すべりなどの土砂災害への応用もできればと考えている。このモデル計算には、日射、放射収支、気温、風向風速、雨量などの気象データが必要で現地に気象観測点を設置すればより正確な解析が可能であるが、気象庁アメダスの観測データ等を用いて観測値を補間すれば、面的に底面流出量を求めることも可能であると考えている。

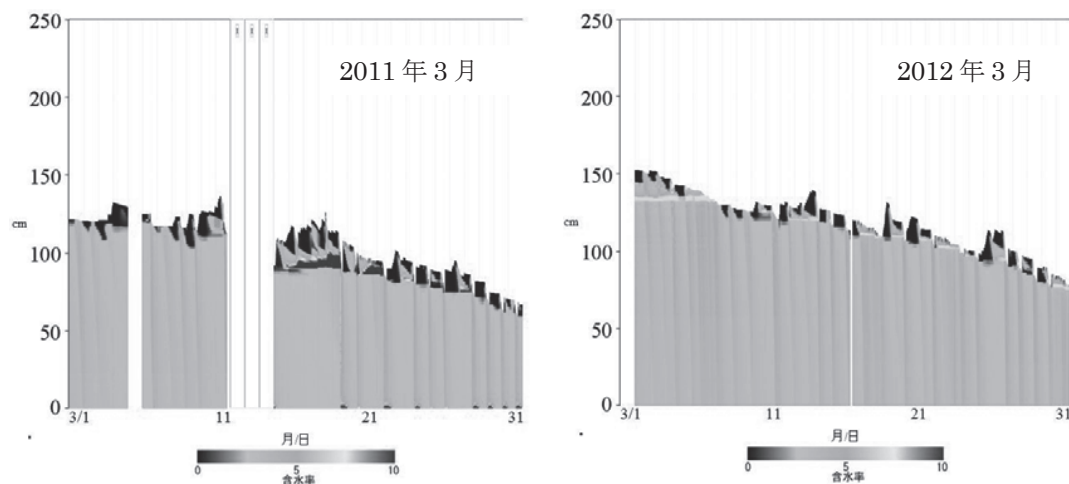


図 13 雪氷防災研で研究開発中の積雪変質モデルを用いた積雪含水率の変化

4. 最近の雪崩発生状況

当研究センターでは、6 年継続して山古志地区を中心として WEB カメラによる雪崩発生状況を観測している。表 2 は、山古志トンネル付近と長岡市田代地区の雪崩発生月の別の 6 年間の雪崩発生データである。発生件数では雪の多い冬に多くの雪崩が発生しているわけではなく、ある程度積雪があれば寒暖の差が激しいと、雪崩の発生件数も多くなることがある。地すべりと同様、積雪や気温などの気象変化が雪崩の発生状況にも大きく影響している。

表 2 最近 6 冬期の雪崩発生件数

観測点	標高 (m)	シーズン	全層雪崩発生回数						
			12月	1月	2月	3月	4月	5月	合計
山古志トンネル	350	07-08	3	3		15			21
		08-09		21	6	6			33
		09-10	28	41	53	8			130
		10-11	16	8	4	7	4		39
		11-12	17	23	14	5			59
		12-13	39	4	13	5			61
田代	550	07-08		1	2	6			9
		08-09		13	5	3			21
		09-10	17	28	23	2			70
		10-11	2	3	13	12	5		35
		11-12	4	8	10	8			30
		12-13	8	13	14	7			42

5. まとめ

図 14 は当雪氷防災研究センター開所以来の積雪深の変化を 1964-65 年から今冬まで示したものである。平地部の積雪深の年変動は大きい。最近の傾向を見れば、すぐに新潟県内では雪が降らなくなる可能性は低いものと想像したい。今後とも地道な観測を継続し、積雪底面流出量などの情報を地すべり災害防止に活かすためにも、情報交換して頂ければ幸いである。

謝辞：地すべり災害の集計には新潟県砂防課より情報提供いただいた。また、気象庁の過去の積雪・気象データについては気象庁新潟地方気象台長峰氏より情報提供いただいた。ここに感謝いたします。

長岡の積雪深

観測：(独)防災科学技術研究所
雪氷防災研究センター

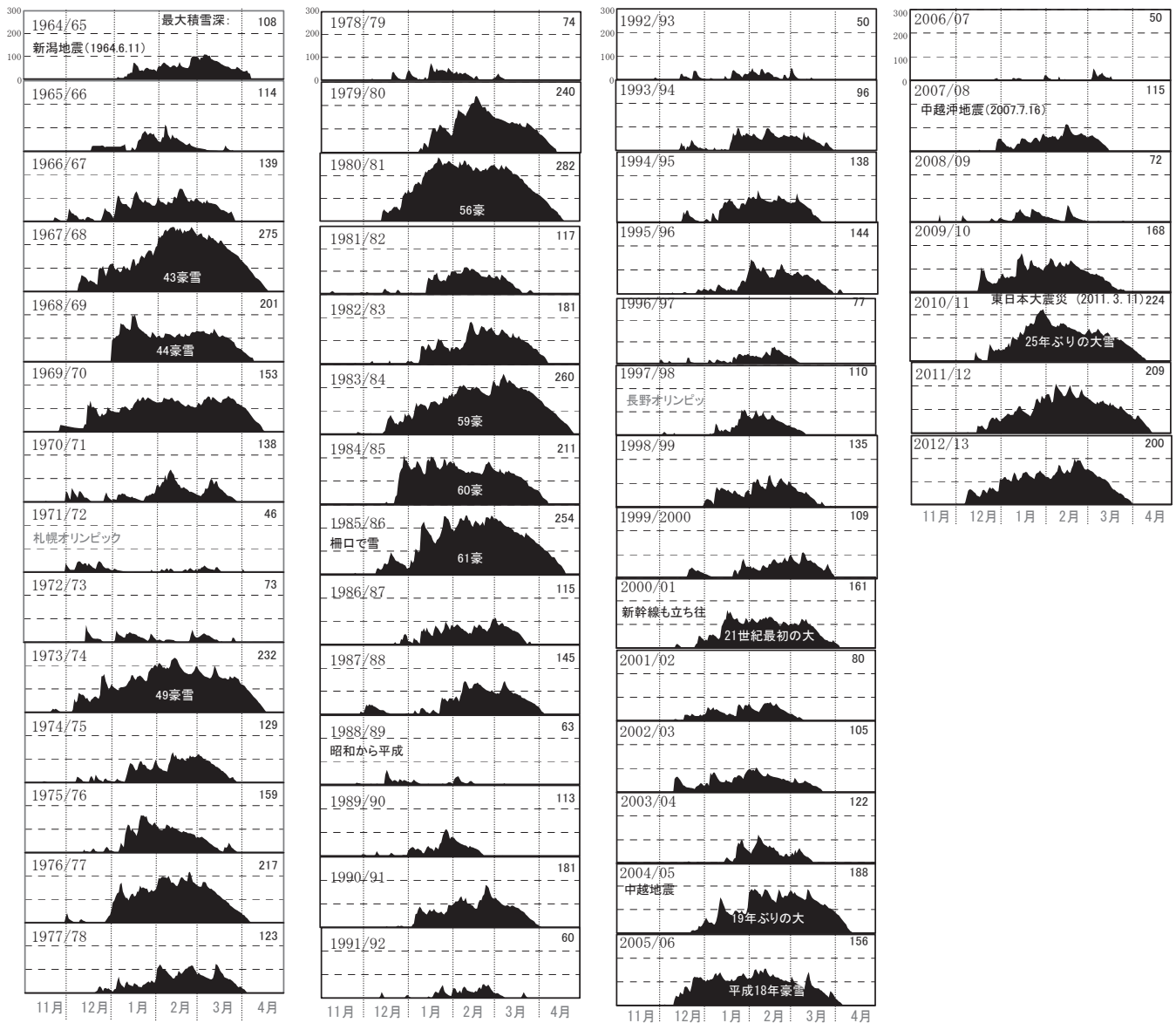


図 14 雪氷防災研の積雪クジラ図

国川地すべり土塊の運動シミュレーション

Mobility simulation of Kokugawa landslide

王 純祥, 渡部直喜, 丸井英明 (新潟大学災害復興科学研究所)

Chunxiang WANG, Naoki WATANABE, Hideaki MARUI

(Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University)

キーワード: 国川地すべり, 融雪, 土塊の運動, シミュレーション

Keywords: Kokugawa landslide, snowmelt, mobility, simulation

1. はじめに

平成24年3月7日に新潟県上越市板倉区国川地区において発生した大規模地すべり（以下国川地すべりとする）は、人家4棟と非住家7棟を全壊したほか、県道への土砂堆積と用水路を土砂埋没させる被害をもたらした。

国川地すべりは、幅約150m、長さ約500m、深さ20～30m、推定崩壊土砂量約750,000m³、移動距離が約250mに達する流動化した地すべりである。

堀尾（2012）、木村ら（2012）、畠田（2012）および新潟県の資料による国川地すべりの移動状況は以下のとおりである。地すべり発生の兆候である頭部斜面の亀裂が発見されたのは3月7日午後である。発見された当時、亀裂の落差は5cm程度であったが、7日夕方には落差が約10mに拡大し、8日には落差約30mの滑落崖が形成された。8日16時頃には斜面山脚部で土塊の押し出しによる積雪の隆起が確認された。その後、地すべり土塊は当時2m近くあった積雪を押し出しながら前方へ移動を続け、10日未明には斜面脚部から約200m離れた家屋に到達した。図-1（堀尾、2012）は、発生翌日の3月8日15:00から建物に到達した3月10日2:00まで期間における地すべり移動土塊の末端部から建物までの距離を計測したグラフである。活発な時は1.5時間で165m移動し、移動速度はおよそ時速15mであった。家屋へ到達した後も土塊の移動は継続し、末端では押し出された雪塊や破壊された家屋が県道と用水路へと乗り上げた(写真-1)。その後、土塊の移動速度は低下し、20日以降には0.2～1.8mm/日に減速した。

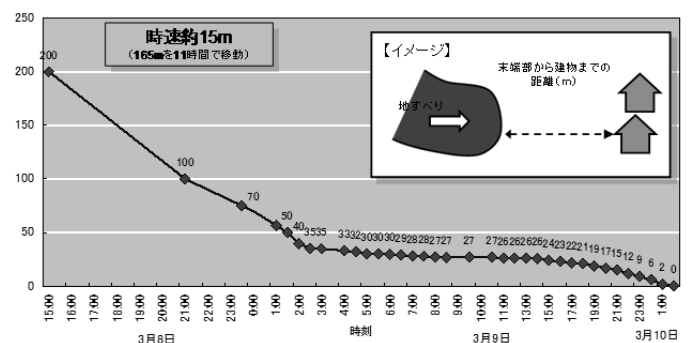


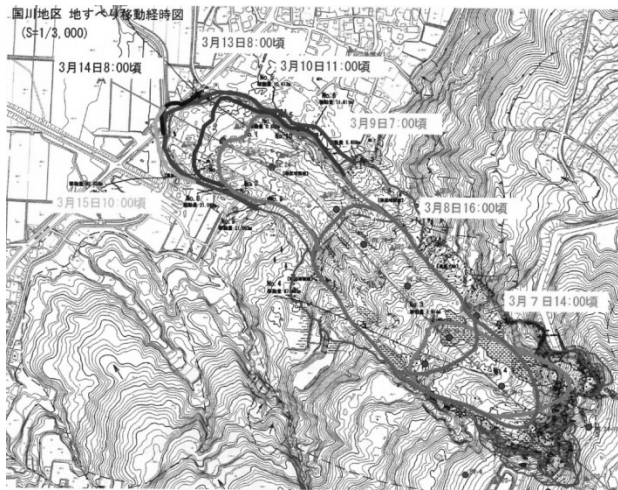
図-1 地すべり土塊移動状況（堀尾、2012）



写真-1 2012年3月15日9時頃に土塊の末端部は破壊された家屋とともに県道へ到達

移動土塊は平野部に出た後も側方へ拡散することではなく一方向へ移動した。この理由として、移動層の土質が比較的固結した土砂であったこと、積雪が側面に押し出されることで側方リッジの機能を形成

したことが考えられる。扇状地の微地形から最大傾斜が北西傾斜であったことから、移動土塊は北北西の国川集落方向へは移動せず、西北西方向に動きを変えたものと考えられる（図－２）。



図－２ 地すべり移動状況の推移(3月7日～15日) (参考文献「5」)

地すべり末端部が長距離移動した原因としては、
 (1) 地すべり移動層を構成する粘土および強風化泥岩が融雪水や地下水を多量に含み飽和したこと、
 (2) 起伏がなく滑らかな扇状地形の上を移動したことが考えられる。

新潟県では、同様に移動距離の長い地すべりの事例が多く報告されている。地すべり土塊が流動化すると、土石流に類似した土砂移動形態へと移行し、被災範囲が広範囲に及ぶ可能性がある。したがって、これらの運動形態等を解明することは、土砂災害防止・災害軽減といった観点からも重要である。近年、新しい手法としてGISを用いた土砂災害の評価も多く提案されるようになった。GISは異なる種類の空間的な情報を統合して管理および解析するツールとして、様々な分野において高度に利用できる。GISの空間解析機能を用いることにより、地形、地質、地下水、降雨量等データを容易に統合でき、土砂災害予測に関わる様々な空間情報の定量把握、さらにはシミュレートすることが可能となる。本研究では、斜面崩壊後、土塊運動の形態を次の2つのパターンに分けて取り扱う。

パターン 1：土塊は変形するものの内部構造が完全に破壊されていない。土塊は斜面下方へ変形運動し、やがて停止する滑動現象である。

パターン 2：大量の水が土塊の内部にしみ込んで、土塊の内部構造は完全に破壊され、流動化する現象である。

以上2つパターンを考慮し、GISを用いて国川地すべり土塊の移動距離、影響範囲及び緊急対策としての地下水排除工の効果についてシミュレーションを試みた。

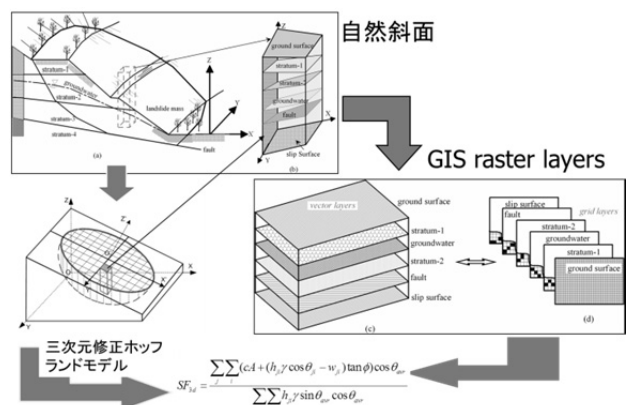
2. 国川地すべり土塊の運動シミュレーション

2.1 GISを用いた三次元地すべり土塊運動モデル

図－3に示すように、まず、地形、地層、地下水位などの空間情報をGISラスタデータに変換し、各ラスタレイヤーを作成する。次に、すべり体の範囲内の各セルに対して、それぞれのラスタレイヤーが持つ空間情報を下式に代入し、すべり方向に作用する各セルのすべり力と抵抗力を計算する。さらに、すべてのセルのすべり力と抵抗力をそれぞれ合計し、その比を三次元すべり安全率として求める。

$$F_{3D} = \frac{\sum_j \sum_i (cA + [(Z_{ji} - z_{ji})\gamma' \cos \theta - u_{ji}] \tan(\phi)) \cos \theta_{Avr}}{\sum_j \sum_i (Z_{ji} - z_{ji})\gamma' \sin \theta_{Avr} \cos(\theta_{Avr})} \quad (1)$$

ここで、 I, J はすべり体範囲内のセルの行と列数、 c はすべり面の粘着力、 ϕ は内部摩擦角、 A は柱状要素のすべり面の面積、 θ は各柱状体のすべり面の傾斜角度、 θ_{Avr} はすべり体の主傾斜角度、 Z_{ji}, z_{ji} は (i, j) 番目の各柱状体の表面と底面の標高、 u_{ji} は



図－3 三次元地すべり土塊運動モデルの概念図

(i, j) 番目の柱状体底面に作用する間隙水圧、 γ' は柱状体の単位重量である。式(1)は修正ホフランド法の式である。必要なデータを三次元安定解析モデルに代入し、安全率を計算した。安全率が1より低いとき、土塊は運動を開始し、運動中の安全率はステップ毎に計算し、1を超えた場合、運動は停止するように設定した。図-4 に運動シミュレーションのフローチャートを示す。また、COM(Component Object Model)技術を用い、GIS 機能を実現するコンポーネント集合体によって、ArcGIS™ 上で地すべり土塊の運動シミュレーションのツールを開発した(参考文献「7」)(図-5)。

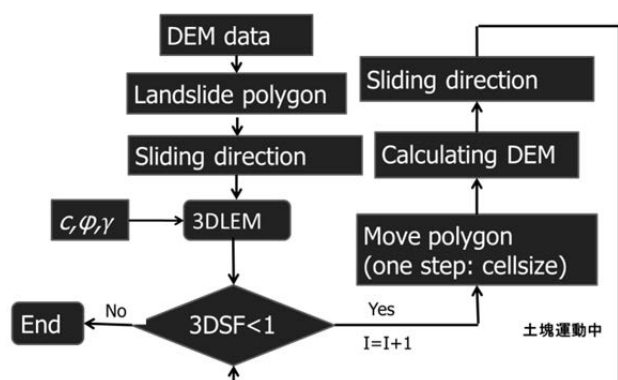


図-4 地すべり土塊滑動シミュレーションのフローチャート

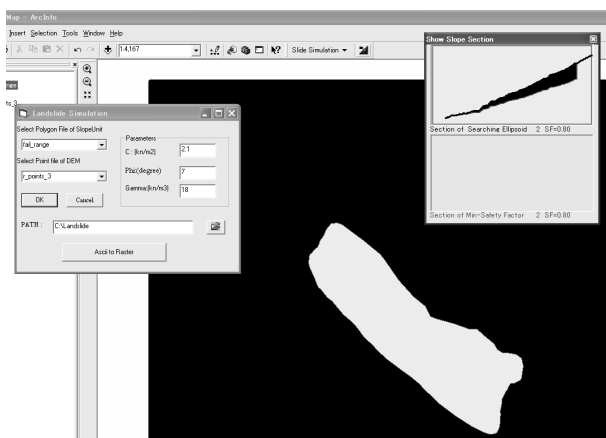


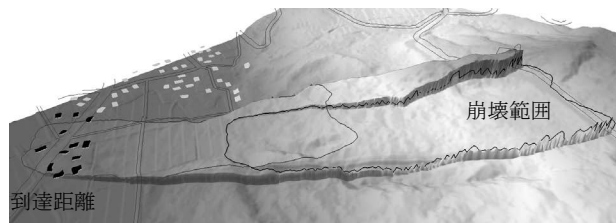
図-5 ArcGIS™ 上で開発した土塊運動シミュレーションツール

融雪による多量の水が地下に浸透したとき、土質の単位重量は増加し、粘着力および内部摩擦角は減少することによって土塊のせん断強度が低下し、崩

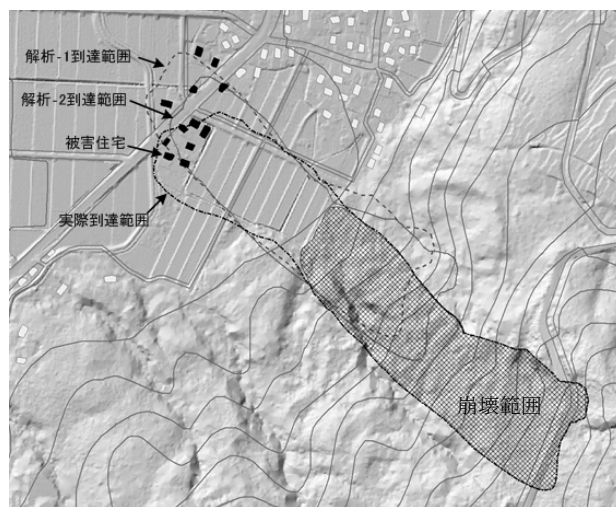
壊に至る。入力データとしての土塊の物性値は、参考文献「6」の土質試験結果および参考文献「5」の逆算で求められた値を用いることにした(表-1)。地下水位は、地表面と等しいと仮定し、滑り面はボーリングデータおよび各断面図に基づいて作成した。解析-1 は、斜面崩壊後排水工を行わない場合であり、そのときの土塊到達距離(図 6(a))は約 313 メートルとなった。解析-2 は、緊急対策として地下水・表面水の排除が行われ、粘着力および内部摩擦角の値が少し増加した場合であり、そのときの土塊到達距離は約 267 メートルとなった。図-6 (b) に解析-1、解析-2 および実際の到達範囲の比較を示す。排水工の作用により、地すべり土塊の移動距離が約 46 メートルを短縮されたことが分かる。

表-1 地すべり土塊の物性値

	粘着力 C (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)	単位重量 γ (kN/m^3)
解析-1 (崩壊後)	2	6	18.1
解析-2 (排水工後)	2.1	7	18.0



(a) 解析-1 土塊の移動状況の三次元ビュー



(b) 排水工の効果のシミュレーション
図-6 地すべり土塊到達範囲の解析結果

2.2 流動化する地すべり土塊運動モデル

地すべり土塊の流動化に関する解析には準三次元地すべり流動解析モデルを使用する。参考文献「8」により、地すべりの土塊の運動を非圧縮粘性流体の運動と仮定し、崩壊土を構成する土粒子がそれぞれ内部摩擦角を持つ流体と見なして、崩壊の発生過程から堆積が終了するまでの過程を追跡する。そのために以下の準三次元連続方程式および運動方程式を用いる。

連続方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha \frac{\partial M}{\partial x} + \alpha \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \alpha \frac{\partial (M\bar{u})}{\partial x} + \alpha \frac{\partial (M\bar{v})}{\partial y} = & -\frac{\partial H}{\partial x} gh + \frac{\mu\beta}{\rho_d} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \\ & - \mu gh \cos \theta_y \tan \phi \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \alpha \frac{\partial (N\bar{u})}{\partial x} + \alpha \frac{\partial (N\bar{v})}{\partial y} = & -\frac{\partial H}{\partial x} gh + \frac{\mu\beta}{\rho_d} \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \\ & - \mu gh \cos \theta_y \tan \phi \end{aligned} \quad (4)$$

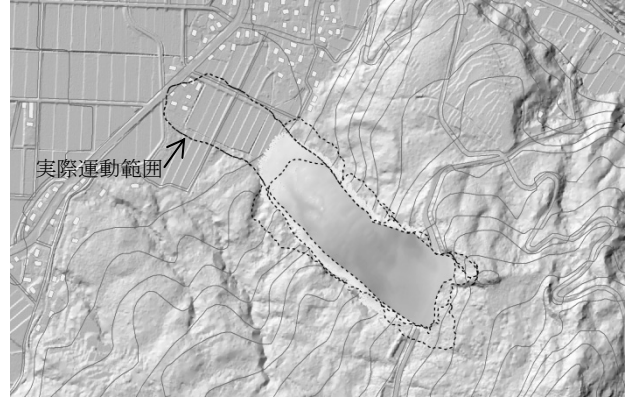
ここで、 t は時間、 M と N は x 、 y 方向の単位幅当たりの流量、 $\bar{u}$ と $\bar{v}$ は x 、 y 方向の平均流速、 α と β は運動量補正係数、 g は重力加速度、 h は流動深、 H は標高+ h 、 μ は動粘性係数、 ρ_d は等価密度、 $\tan \phi$ は摩擦係数である。

運動方程式および連続方程式の離散化は有限差分法によって行う。GISのグリッドメッシュ (grid mesh) を有限差分法のメッシュとし、連続流体の連続式と運動方程式の基礎式は差分法により離散化を行ない、計算プログラムを開発した。

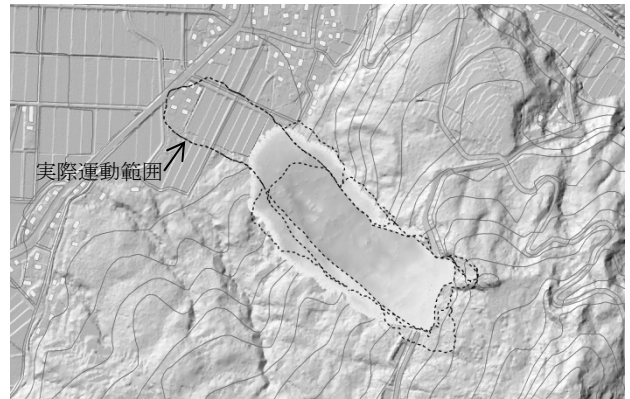
入力パラメーター (表-2) は土塊運動の期間を通して一定と設定した。計算による土塊移動の時系列結果と実際の移動経過を合わせて、図-7に示す。地すべり末端部が平野部へ抜け出た後、地すべり本体部分が下方へ移動し、両側への拡散が少なくなる結果となった。

表-2 流動化する地すべり土塊の物性値

$\rho(\text{kg/m}^3)$	α	β	$\mu(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$g(\text{m/s}^2)$	$\tan \phi$
1800	1.25	1.0	0.15	10	0.13



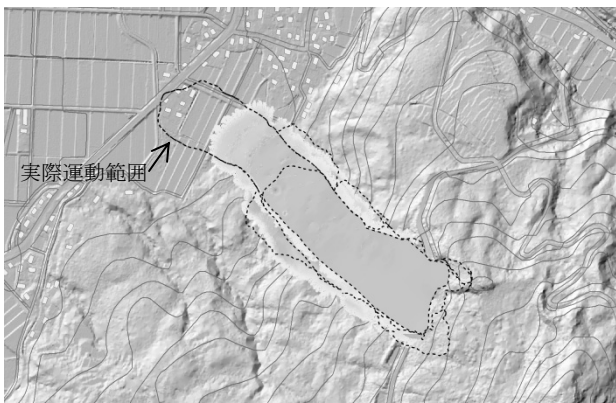
(a) 地すべり末端部のはみ出し (3月8日午後運動状況相当)



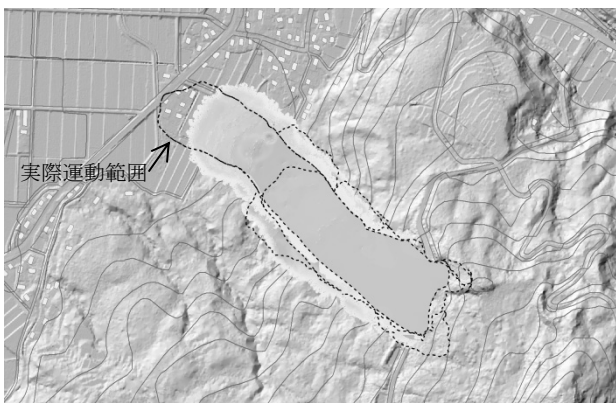
(b) 地すべり土塊の両側へ移送



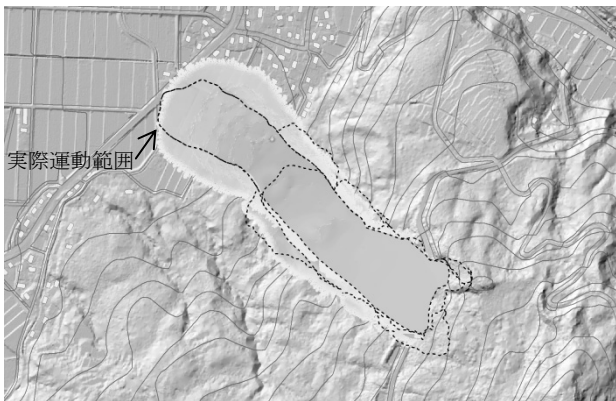
(c) 地すべり本体の平野部への移動



(d) 土塊運動中（3月9日の運動状況相当）



(e) 運動土塊の住宅への接近（3月10日の運動状況相当）



(f) 県道への到達（3月13日の状況相当）

図-7 流動化する国川地すべり土塊運動シミュレーション

3. まとめ

以上、本研究では、国川地すべり土塊運動について2つの運動形態を設定して運動距離および影響範囲のシミュレーションを行った。パターン1の解析結果、緊急対策としての排水工の作用により、地す

べり土塊の移動距離は約46メートルを短縮されることが分かった。

また、流動化する地すべり土塊の運動モデルを用いた解析結果は、実際の土塊の運動状況をほぼ正確に再現していた。

しかし、国川地すべりは斜面下方の水田に達すると、当時2m近くあった積雪を押し出すことによって、地すべり末端部に小高い雪塊を形成した。積雪による拘束作用が土砂運動に及ぼす影響についても検討する必要がある。

謝辞

新潟県砂防課には、DEMデータ、調査平面図等、各種データを提供していただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 堀尾昌宏：新潟県上越市板倉区国川地内で発生した地すべりの概要．日本地すべり学会誌，vol. 49(5)，P52-55，2012.
- 畠田和弘・木村 誇・丸山清輝・野呂智之・中村 明：地すべり土塊の移動を規制する要因 - 新潟県上越市板倉区国川地区で発生した融雪地すべりでの事例．第51回日本地すべり学会発表会講演集，P246-247，2012.
- 畠田和弘・木村 誇・丸山清輝・野呂智之・中村 明：平成24年3月7日新潟県上越市板倉区国川地区で発生した融雪地すべり．日本地すべり学会誌，vol. 49(6)，P24-29，2012.
- 木村 誇・畠田和弘・丸山清輝・野呂智之・中村 明：2012年3月新潟県上越市で発生した融雪地すべりの特徴．土木技術資料，vol. 54(7)，P36-41，2012
- 国川地すべり－融雪期に発生した高速地すべり－．（社）日本地すべり学会新潟支部第40回地すべり現地検討会資料，2012. 11.
- 新潟県農林水産部治山課：地すべり調査総括書 III－中頸城地域・東頸城地域（1）編一，1980.

- 7) C. Wang, H. Marui, G. Furuya, N. Watanabe,
Two integrated models simulating dynamic
process of landslide using GIS, Proceedings of
the Second World Landslide Forum, Landslide
Science and Practice, C. Margottine et al eds,
p.6, 2013.
- 8) 王 純祥・古谷 元・渡部直喜・丸井英明 : GIS を
用いた土砂災害予測およびハザード評価. (社) 日
本地すべり学会新潟支部第 39 回地すべりシンポ
ジウム「土砂災害に関わる危険度評価とリスクマ
ネージメント」, p28-35, 2011.

第41回地すべりシンポジウム
地すべり災害への新たな取り組み
2013. 5

編集・発行 公益社団法人日本地すべり学会新潟支部
印 刷 株式会社 文 久 堂

(公社) 日本地すべり学会新潟支部のホームページ
<http://www.landslide-niigata.org>