

◆ 土砂災害特集 ◆

衛星リモートセンシングによる斜面崩壊等の監視手法の検討

福嶋 彩* 仲野公章** 清水孝一*** 山越隆雄****

1. はじめに

1999年9月台湾集集大地震、2000年9月東海地方豪雨灾害、2001年1月エルサルバドル大地震等、毎年、世界の至る地域で地震や豪雨が発生し、それらに起因する土砂灾害が頻発している。このような灾害は広域にわたることから、散在する崩壊の発生源や被害状況を迅速に把握することは容易でない。土砂灾害を最小限にとどめるには、現場での調査や予測理論の研究等に加え、山地流域全体の状況をモニタリングすることが重要である。また、砂防技術の更なる国際協力の推進という観点からも、今後は、海外における土砂灾害の情報を迅速に把握するとともにその情報を日本から発信する、という新たな支援・協力への取り組みも重要なと考えられる。

従来から行われている灾害調査手法である空中写真判読や現地調査は取得される情報が詳細であり、また、現場の状況に応じることができる。しかし、その反面、山地流域全体を網羅した調査への適用については時間、コスト、安全性等の面において課題がある。そこで、これらの問題点へ対応可能と考えられる技術として衛星リモートセンシングが注目されている。衛星リモートセンシングとは、人工衛星に搭載されたセンサで地表面から反射される電磁波を観測し、地表の状態を計測する技術である。この観測データを利用することで、流域全体のデータ取得にかかる費用の低減、データの定期取得等の利点から山地環境変化の効率的なモニタリングを実施することが可能になると考えられる。そして、宇宙から地球を観測する人工衛星は国内外の情報の取得を容易にするものである。

本報は、山地流域全体における斜面崩壊等の発生状況を調査する手法として、衛星リモートセンシングデータを活用した崩壊地の自動抽出に関する検討結果を報告するものである。検討事例には、広域多発型土砂灾害として1999年9月に台湾で

発生した大地震に伴う土砂灾害を取り上げた。

2. 台湾921集集大地震の概況¹⁾

1999年9月21日に、台湾中部の南投県・集集市の東10km付近でM7.3(台湾中央気象局)の大地震が発生した。この地震により、都市部での家屋倒壊や土木構造物破壊といった被害のほか、山間地でも崩壊や地すべりによる土砂灾害が多発した。中でも、南投県と台中県の県境では、30~50km²の広い範囲内で表層崩壊による禿げ山が発生したり、九份二山、草嶺山などの山岳地帯においては地震による土砂灾害規模としては最大級に相当する崩壊土量10⁷~10⁸m³級の大規模崩壊が発生している。

3. 衛星画像を用いた斜面崩壊等抽出方法

人工衛星に搭載されているセンサは、機能的に



図-1 対象エリア(台湾中部)
枠内が調査範囲、★印は震源を示す

マイクロ波センサと光学系センサの二種類に分類される。マイクロ波センサは、自ら電波を地表面に照射しその反射波から画像を合成するもので、天候に左右されること無く観測が可能なセンサである。RADARSAT衛星等に搭載されている合成開口レーダ(SAR)はその代表的なものである。一方、LANDSAT衛星のTM(Thematic Mapper)に代表される光学系センサは地表面から反射・放射される太陽光の強度を観測するものである。

本検討では、この二種類のセンサデータ各々について下記の方法により崩壊地の自動抽出を行うこととした。

3.1 合成開口レーダ画像を用いた崩壊地の抽出

合成開口レーダ(SAR)の後方散乱強度画像(以下、SAR强度画像)を用いて、災害前後の画像から散乱強度の変化箇所を崩壊地として抽出することを試みた。

SARは衛星の進行方向に対し横斜め下方へ連続的にマイクロ波を照射し、地表面で後方散乱して衛星へ戻ってきたマイクロ波を受信することでデータを取得する。後方散乱したマイクロ波の強度は後方散乱強度といい、これは物体の形状や表面状態等によって変化する。また、センサ自身の仕様や観測時の状況(マイクロ波の波長、地表へのマイクロ波照射角など)によってもその結果は影響を受ける。ここでは、崩壊の発生による地表面粗度の変化に着目し、SAR强度画像中に現れると考えられる画像の濃淡のコントラストを地表の変異箇所として抽出することとした。地表面粗度の変化とは、例えば、山地流域のように森林で被覆された地域で崩壊が発生した場合、崩壊地の表面の粗さは森林の樹冠に比べて滑らかになると考えられることから、森林と崩壊地では後方散乱に大きな差が生じることを想定した。

本検討ではRADARSAT/SAR-Cバンド(波長37.5-75mm、空間分解能27m)データを用いることとした。CバンドSARは植生の樹冠表面から

の表面散乱及び葉、枝などからの体積散乱の強度を観測することが可能である。今回の検討では、特に森林の有無という変化に着目していることから、マイクロ波がある程度樹冠で散乱するCバンドセンサデータを選定した。解析に使用したデータを表-1に示す。

SAR强度画像を用いた崩壊地自動抽出手順は図-2の通りである。使用したデータは実数部と虚数部をもつ複素数の状態(SLC(シングルルックコンプレックス)形式)であることから、データの画像化を行うために整数データへの変換を行った(画像データ化)。次に、SAR画像全体に見られる非常に細かな濃淡のゆらぎ(スペックルノイズ)を低減させるためにフィルタ処理を施した。その後、地震前後の画像同士の位置あわせ(レジストレーション)を行った。

3.2 光学系センサデータを用いた崩壊地の抽出

光学系センサデータを用いて土地被覆分類図を作成し、災害前後の土地被覆状況の変化から崩壊地を抽出することを試みた。

光学系センサは物質表面からの太陽光の反射強度を、可視光域から近赤外域の間を複数の波長帯に分けて観測するものである。物質は物性、含水量、表面粗度、色等によって異なる反射強度を示すことから、この特性を利用してことで、地表の



図-2 SAR强度画像作成手順

表-1 使用衛星画像(1)

衛星/センサ名	観測日	画像モード	ビームタイプ	画像中心緯経度
RADARSAT/SAR	1999年4月9日 (災害前)	WIDE	W2 (31°-39°)	23°52'02"N 120°48'00"E
RADARSAT/SAR	1999年10月18日 (災害後)	WIDE	W2 (31°-39°)	23°51'02"N 120°45'08"E

被覆物を複数の領域(水域、都市部、水田など)に区分することが可能となる。ここでは、災害前後の光学系センサ画像から各時期の土地被覆分類図を作成し、災害後に植生が失われた箇所を災害により発生した崩壊地と見なして、崩壊地分布図を作成することとした。植生の損失を崩壊地として見なす理由は、①崩壊の発生により森林地は裸地化する、すなわち、植生の損失を伴う変化をもたらす、②光学系センサの観測波長帯(バンド)の中で $0.6\sim0.7\mu\text{m}$ の可視光域バンドと $0.75\sim1.0\mu\text{m}$ の近赤外域バンドの存在が植生の有無の評価に対して大きな有効性を示すためである。

崩壊地分布図の作成手順を図-3に示す。衛星データへ幾何補正を施した後、教師付き分類を行う。教師付き分類とは現地に関する情報が存在する場合にそれを参考資料(教師)として、画像を構成する画素をそれぞれの領域へ区分していく手法である。教師付き分類により土地被覆分類図を作成した後、植生の有無を判別した画像を作成する。次に、災害前後の画像から植生の有無の変化を凡例とした図を作成し、これを推定新規崩壊地分布図とした。なお、解析に使用した衛星データは表-2の通りである。

4. 検討結果

4.1 合成開口レーダー画像を用いた崩壊地抽出結果

図-4に1999年4月9日(地震前)及び同年10月18日(地震後)のRADARSAT/SAR強度画像(解析エリアの一部)を示す。SAR强度画像の明暗は後方散乱強度の強弱を表している(物質の表面が粗いほど後方散乱強度は大きくなり、明るい色調になる)。しかし、この2画像の判読による比較から崩壊地を抽出することは困難なため(図-4)、地震前後の変化をより明確に示すために二時期画像の強度の引き算を行い差画像を作成した(図-5左図)。

図-5左図の左側に位置する草嶺付近に暗い箇所、すなわち、後方散乱強度の低下した箇所が見

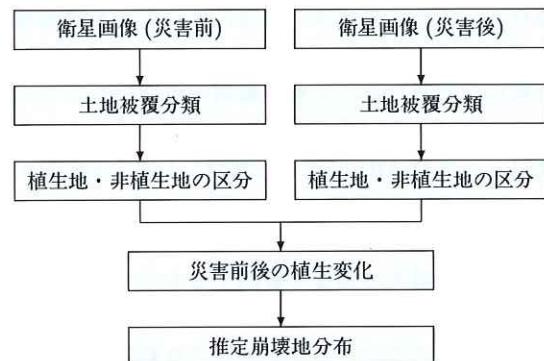


図-3 光学系センサ画像を用いた崩壊地分布図作成手順
られる(矢印箇所)。ここは、大規模な地すべり性崩壊が発生し、その崩土により清水渓が堰き止められて天然ダムが形成された場所である。また、草嶺の北東部にも明るい箇所が見られるが(右側の丸枠内)、ここも崩壊が発生した場所であると考えられる。しかし、光学系センサ SPOT/HRV のフォールスカラー画像(1999年9月27日撮影

図-5右図)と比較したところ、SPOTの画像で確認できる多数の大規模崩壊地(図-5右図破線丸枠内の水色箇所)をSAR差画像からの判読が困難であることがわかる。

以上のことから、崩壊地あるいは地形変化箇所が抽出されなかった原因として以下のことが考えられる。

- ①樹冠の粗度と崩壊地の表面粗度の差異が小さいため、後方散乱強度にも変化が見られない。
- ②大規模崩壊(1km^2)であっても、顕著な地形変化を伴うものでなければ後方散乱強度に変化が現れない。

4.2 光学系センサ画像を用いた崩壊地抽出結果

図-6にLANDSAT/TM(1999年9月1日:地震前)及びSPOT/HRV(1999年9月27日、1999年10月12日:地震後)から得られた土地被覆分類図(解析エリア全域)を示す。そして、これら3画像をもとに作成した推定崩壊地分布図を図-7に示す。

表-2 使用衛星画像(2)

衛星/センサ名	パス/ロウ又はロウ/カラム	観測日	空間分解能
LANDSAT/TM	117/43, 117/44	1999年9月1日(災害前)	30m
SPOT/HRV-XS	299/302, 299/303	1999年9月27日(災害後)	20m
SPOT/HRV-XS	299/302, 299/303	1999年10月12日(災害後)	20m

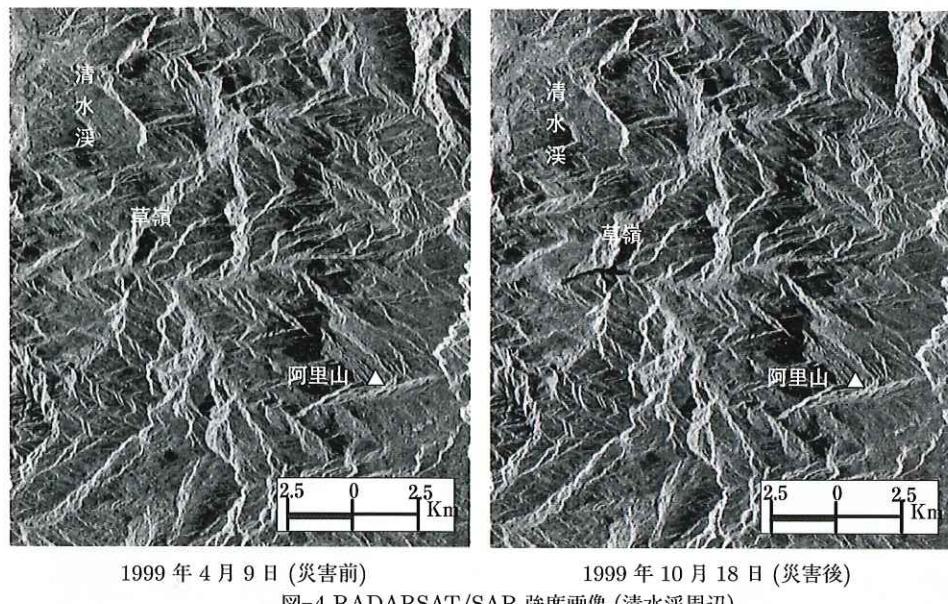
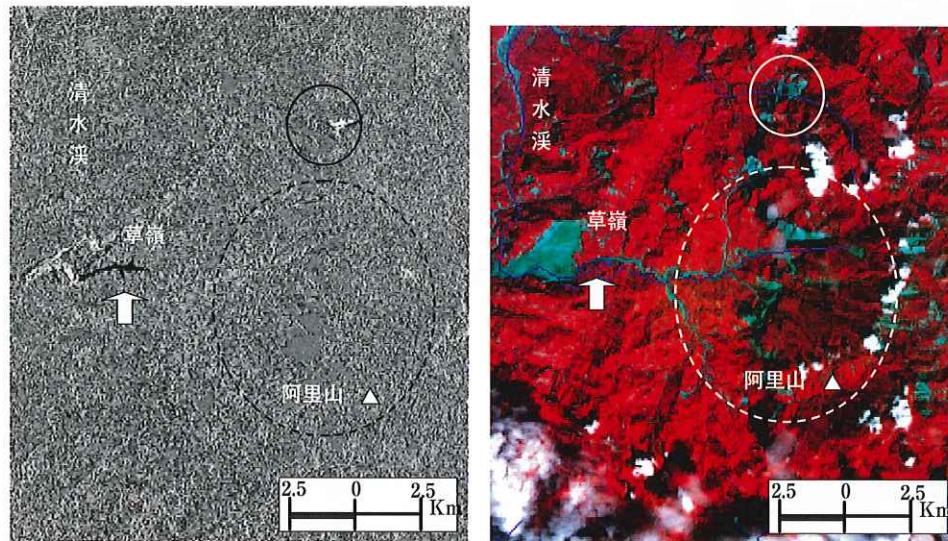


図-4 RADARSAT/SAR 強度画像(清水渓周辺)



2 時期の差 SAR 強度差画像

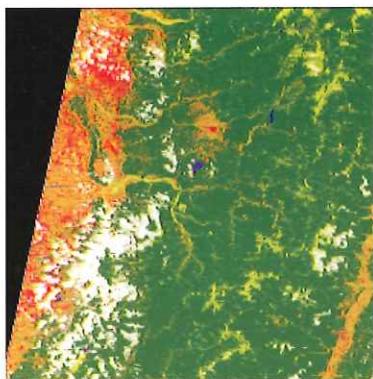
図-5 清水渓周辺の2時期のSAR強度差画像及びSPOT画像

推定崩壊地分布図を既存の崩壊地分布図²⁾に重ねて(図-8)比較したところ、分布状況がほぼ一致するエリアが幾つか見られる(赤い丸枠内)。この図から、九九峰、九份二山、草嶺で発生した大規模崩壊などが抽出されていることが分かる。しかし、一方で、崩壊の発生していない場所が崩壊地として誤分類されている箇所も多く見られる(図-8青色破線○内)。その主な理由として、以下のことが考えられる。

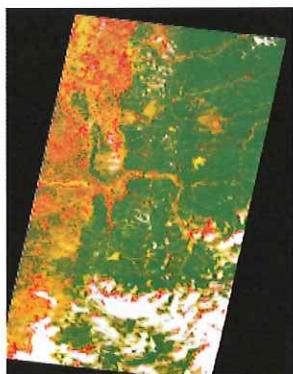
①雲の存在が非植生地として分類されている。

②僅かな画像同士の位置ずれが誤分類を招く。

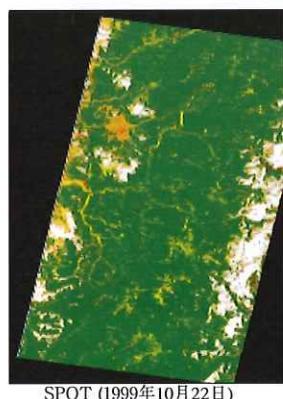
①のケースは、地震前画像の雲の無いエリアにおいて、地震後画像で雲が存在すると、分類上そのエリアは非植生地へ変化したものとみなされるために発生する問題である。例えば、図-8エリアaは、図-7において植生地から非植生地へ変化した場所に該当し、これは図-6のSPOT9月27日分類図の下部に存在する雲域と一致していることが認められる。また、このような誤分類は雲の周辺及び薄雲のかかるエリアにおいても引き起こされ



LANDSAT (1999年9月1日)



SPOT (1999年9月27日)



SPOT (1999年10月22日)

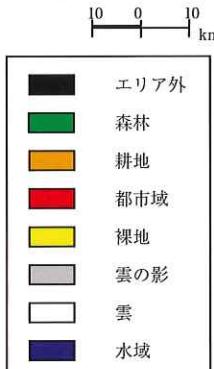


図-6 土地被覆分類図

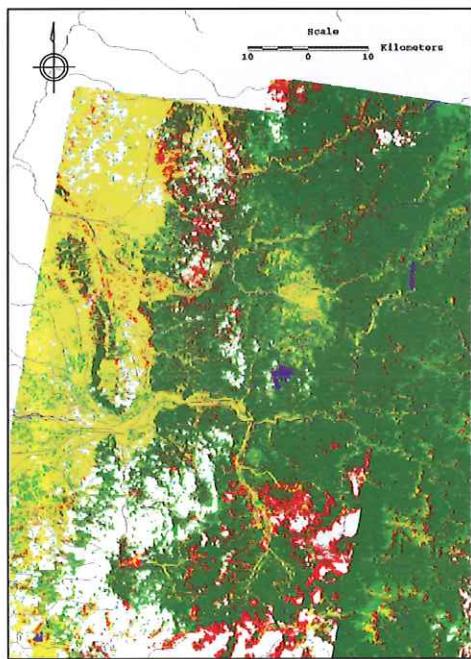
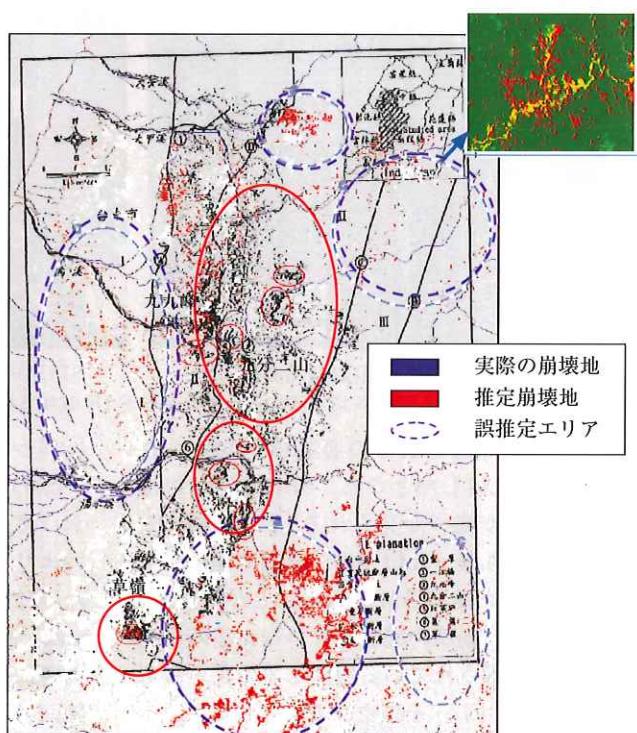


図-7 3 時期の衛星画像より作成した推定崩壊地分布図



る傾向にあることが分かった。

②については、図-8 エリア c に該当する範囲でその兆候が見られることが図-7 でわかる。その一例を図-8 の右上に示す。地震後に植生地から非植生地へ変化した箇所（赤）と、非植生地から植生地へ変化した箇所（黄緑）が線状に並んでいる。本来非植生地として地震前後に変化のない溪流が植生地から非植生地へ変化した箇所として示されている例である。これは、二画像の位置ずれに起因するものである。位置ずれの起こる原因として、地震前画像と地震後画像が仕様の異なる衛星より得られたものであることが考えられる。すなわち、ポインティング機能によりセンサを傾けて観測する SPOT の画像は幾何学的なひずみを含むことから、直下視で観測する LANDSAT の画像と位置の整合をそのままとることができないためである。位置ずれについては DEM (Digital Elevation Model) を用いることで補正が可能であるが、今回調査の対象とした台湾では一般に公表されていないため入手することができず、十分に位置の補正を行うことができなかった。

5. まとめ

本研究では、衛星リモートセンシングデータを活用して、広域にわたって発生した斜面崩壊等の抽出手法について検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- SAR 強度画像は湛水地や顕著な地形変化を伴う大規模崩壊の抽出には適用可能だが、崩壊の規模に関わらず表層崩壊の抽出には適用困難である。

- 光学系センサ画像は土砂災害の監視へある程度適用可能である。しかし、薄雲や画像のひずみ、空間分解能の乏しさ等の原因から誤分類を招く。

流域全体を対象とした崩壊地の抽出は、早急な対策を必要とする渓流の選定や天然ダムの形成や所在の把握等、土砂災害の被害を最小限にとどめるために重要な情報をもたらすものである。今回の調査では崩壊地把握の適用可能性と問題点が示されたが、さらに十分な結果を得るために、今後は、各種センサ画像の合成や波長帯バンドの演算による崩壊地抽出のための指標の検討、また SAR の偏波合成や差分干渉処理技術の活用等、最新の衛星リモートセンシングの動向をふまえながら、崩壊地の抽出精度を高める方法について調査を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 例えば、水山高久、土屋智、山田孝：台湾 921 集集大地震と斜面災害の概要（速報）、砂防学会誌、Vol.52, No.5, pp.41-45, 2000.1
- 2) Wen-Neng WANG, Hiroyuki NAKAMURA, Toshihiko KAMAI, Mu-Ching LEE : A Photogeologic Study on the Earthquake-induced Slope Failure in Central Taiwan on September 21, 1999, 第 39 回日本地すべり学会研究発表会地すべり 2000 講演集, pp.417-420, 2000.8

福嶋 彩*



国土交通省国土技術政策
総合研究所危機管理技術
研究センター砂防研究室
Aya FUKUSHIMA

仲野公章**



独立行政法人土木研究所
土砂管理研究グループ長
Masaaki NAKANO

清水孝一***



国土交通省国土技術政策
総合研究所危機管理技術
研究センター砂防研究室
主任研究官
Yoshikazu SHIMIZU

山越隆雄****



独立行政法人土木研究所
土砂管理研究グループ
(火山・土石流) 研究員
Takao YAMAKOSHI