

## 論文の内容の要旨

論文題目 高解像度衛星画像を用いた3次元定量地形解析技術に関する研究

氏名 筒井 健

近年、異常気象、多発する地震、そして人口増加による宅地開発に関連して、世界各地で多発する自然災害が深刻な問題になっている。また、地球温暖化の進展は、今後更に多くの異常気象に伴う自然災害を引き起こすと懸念されている。我が国が属するアジア地域は、地形特性の一つとして急峻な山地が多く、多くの山地で社会基盤が形成されている。その地形特性に起因して、地震や豪雨に伴う地すべり、斜面崩壊、土石流等の斜面における地質災害が増加している。例えば、我が国では2004年10月23日に、新潟県中越地震(M6.8)が発生し、1,000箇所以上の地すべり・斜面崩壊が発生し、住居、交通機関、インフラ施設に甚大な被害を与えた。また、豪雨に伴う斜面災害も深刻であり、我が国では、最近数年間に渡り大型台風の上陸が相次ぎ、各地で斜面崩壊、土石流等の被害が頻発している。

大規模かつ多発する斜面災害の被害は、急峻な山地で広域に分布するため、現在、広域に対応した災害調査技術の実現が期待されている。従来、災害発生時には、復旧計画策定のための現地測量や航空写真を用いた局所的な地形調査が行われてきた。しかしながら、大地震や台風に伴う広域災害では、全体を網羅するために多くの時間と費用が必要であり、また、人を寄せ付けないような急峻地や海外では調査の実施が困難な問題があった。また、全体視野的な調査が欠落しているため、将来の災害予測にとって貴重な地域固有の地形特徴を十分に分析できない問題があった。その問題解決のための広域調査技術の一つに、近年、宇宙を航行する人工衛星を用いたリモートセンシングの活用が期待されている。衛星リモートセンシングは、数百km<sup>2</sup>以上に及ぶ情報の広域性と、数日～数十日間隔の情報の周期性に利点があり、この2つの利点は災害監視への応用に適合する。しかしながら、従来、衛星リモートセンシングを用いて取得される情報の多くは2次元定性情報であり、3次元定量的な地形情報が取得できないため、復旧計画策定で用いる崩壊土量や危険度評価で用いる斜面形状等の取得が不可能であった。そのため、利用は概要把握段階に留まり、計画策定等の実用段階に至っていない。その課題解決には、高精度の高さ情報を含む3次元地形情報の取得とその利用技術の開発が急務である。

このような背景から、本論文では、自然災害で実用可能な広域地形調査技術の確立を目的に、高解像度衛星画像を用いた高精度の3次元定量地形解析技術を提案する。提案技術を用いれば、従来に10m以上の高さ誤差があった広域の3次元地形データをおよそ5m誤差で効率的に収集可能であり、大規模斜面災害の評価へ応用できる。災害評価では、①災害発生箇所の検出、②発生規模の定量評価(崩壊体積等)、③災害地形の特徴評価

(地形勾配等)へ適用できる。提案技術は、以下の3つの要素からなる。一つ目の要素は、高解像度衛星画像からの山地斜面に対応した高精度DEM (Digital Elevation Model : デジタル標高データ) 抽出手法である。従来に斜面で発生していたDEMの高さ誤差を減少させ、樹高補正により森林地での地盤高さ推定を可能にした。二つ目の要素は、高精度DEMを用いた地形変化の検出手法である。崩壊発生箇所や土石流堆積箇所を検出できる。三つ目の要素は、高精度DEMを用いた災害規模の定量評価である。地形崩壊の深さや崩壊体積量の定量算出が行える。

以下に、各要素に関する研究内容を述べる。

(1) 山地斜面での性能向上を目的に、斜面と植生に対応した高解像度衛星ステレオ画像からの高精度DEM抽出手法を新しく提案した。斜面と植生で従来発生していた計測誤差を減少させた方法である。斜面への対応では、従来発生していた急斜面での計測エラーを減少させるため2つのアプローチを検討した。一つ目は、初期地形モデルに基づく画像探索であり、誤探索に起因する大きな標高エラーの発生を減少させた。二つ目は、地形連続性の条件化であり、近似面を用いて地形連続性をモデル化し、斜面で発生する細かな誤差を補正した。植生への対応では、平均樹高と画像分類に基づく樹林境界からの距離係数に基づく樹高補正を検討した。

研究手法に基づくDEMの基本性能と実用性能を3種類の最新計測機器を用いて評価した。精密GPSを用いて基本性能を平地で検証した結果、2.5m解像度のSPOT-5衛星画像を使用した場合、RMSE (Root Mean Square Error) 約2mの誤差で標高計測が可能であり、その値が理論精度と同等であることを実証した。実用評価では、斜面崩壊地と森林山地で精度検証した。斜面崩壊地では、2箇所の大規模崩壊地で地上設置型レーザ計測データと比較した結果、RMSE 約4~5mで標高推定が可能であった。森林山地では、航空機搭載レーザ計測データと比較した結果、樹高補正を行った場合にRMSE 約4~5mで標高計測が可能であった。これらの結果は、提案手法の山地斜面での標高推定への適用性を示している。

(2) 高解像度衛星画像から抽出した高精度DEMを地震に伴う斜面災害と豪雨に伴う斜面災害の検出へ実証的に適用した。災害前後の2時期の高精度DEMの抽出、差分に基づき標高変化を観測する方法を提案し、その手法は誤差領域を相互相関と面積によって正誤判定して、誤検出を低減する機能をもつ。地震に伴う斜面災害の例として、2004年新潟県中越地震を解析し、豪雨に伴う斜面災害の例として、2004年ミンドリ台風に伴う台湾中部大甲溪の豪雨災害を解析した。高さ差分の検出精度を検証したところ、2.5m解像度のSPOT-5衛星画像を用いた場合、傾斜角30度以内ではRMSE 約3~4mであり、傾斜角30度以上では地形種類により異なり、急斜面が点在する中越地域では約4~6mで、急斜面が連続する大甲溪地域では約5~10mであった。これらの傾向を踏まえて、両地域で発生した斜面災害を解析したところ、両地域で共に、大規模災害箇所が精度良く検出された。10m以上の高さ変化かつ100m幅(または長さ)以上で定義した主

要な発生箇所の検出率は 100%であった。また、解析結果に含まれる真の地形変化の面積割合を検証したところ、中越地震の場合に 84%、ミンドリ台風豪雨の場合で 65%であり、精度良い検出が実証された。これらの結果は、提案手法の災害検出への高い適用性を示している。

(3) 高精度 DEM を用いて大規模斜面災害の発生規模の定量化を試み、その推定精度を明確化した。実験では、2 時期 DEM の差分に基づく『深さ』と『体積』の定量化指標を設定し、10m 以上の高さ変化の大規模な斜面崩壊、土石流で指標推定を行い、その推定精度を検証した。その結果、『平均深さ』は RMSE 約 2m、『体積』は約  $100 \text{ m}^3 \times 10^3$  の精度で推定可能であった。一般に、大規模崩壊では数 10 万～数 100 万  $\text{m}^3$  の土砂体積が発生するため、提案手法はこれらの定量評価に十分適用できる。また、土石流災害を例に、定量評価を災害要因に関連する地形特徴分析へ応用した。土石流規模と河床勾配の関係に着目して、堆積と侵食の境の勾配、大規模土石流が堆積した勾配の特徴を抽出した。抽出した特徴勾配は検証データと良く整合し、災害要因究明への応用可能性を示した。

これらの本論文の成果は、提案した DEM 作成手法および DEM を用いた斜面における地質災害の定量評価手法の高い実利用性を示している。提案技術を用いれば、高解像度衛星画像を用いて遠隔から大規模災害の定量的かつ網羅的な事後評価を精度良く行うことが可能である。