

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 葛 平 兰

2018 年 9 月 6 日に発生した北海道胆振東部地震（Mw6.6）は、震源の北側で広範囲の地滑りを引き起こした。また、43 人の死者、782 人の負傷者（48 人の重傷を含む）、全壊家屋が 469 棟、半壊家屋が 1,660 棟、一部破損被害は 13,849 棟に上った（2019 年 8 月 20 日時点、消防庁集計）。また、被災地域の電気・交通・通信に大きな支障をきたし、295 万戸の家屋に停電が発生し、3,675 億円以上の被害をもたらした。

この地震によって引き起こされた地滑りは、この地震災害における死者と被害の主な原因となっている。厚真、むかわ、安平の町の周辺では、地震動、事前の降雨量、火山性堆積物（軽石を含む火山灰や火砕流などによる堆積物）による特殊な地盤条件の複雑な相互作用を原因として、約 400 km² の範囲に約 6,000 箇所の地滑りが発生したが、この数や面積は日本においては、明治以来最大といわれている。厚真地域で発生した地滑りにより、全死者数 43 人の中の 36 人が死亡した。さらに多くの家屋が流され、いくつかの道路や橋、川や水田が地滑りによって運ばれた土砂で埋まるなど、社会基盤施設にも被害を与え、大きな経済的損失をもたらした。

今回の地滑りは多数の死傷者と被害を引き起こしたが、一方で将来の地滑り対策に有用なデータと経験、そして教訓ももたらした。例えば、災害プロセスに対応する適切な対応手順が準備されていれば、発生する犠牲者と被害量を軽減できる可能性がある。災害の前に、各地の地滑りの危険性を予見するモデルやシステム、ハザードマップなどがあれば、地元の人々は早期に避難注意や警告を受け、災害に備える準備ができるであろう。一方、災害の後に、発生した地滑りの状況を素早く評価する方法があれば、救助活動をはじめとする緊急対応の時間を短縮でき、土砂に閉じ込められたより多くの人々を救うことが可能になるだろう。

本研究では、これらの考察に基づいて、北海道胆振東部地震で発生した地滑り災害から得られたデータと経験を利活用した分析結果を行い、将来の地滑り災害対策の立案と対応に役立つ方法を提案することを目的とした。まず、地滑り現象の理解促進のために、地滑りに関する空間データと過去の研究成果をレビューした。そして、地滑りの発生前の地理情報システム（GIS）を用いた地滑りの発生危険度評価法と、地滑りの発生後の SAR データを用いた地滑りの検出手法を提案した。提案手法は地滑りの発生前後の地滑り災害の対策と対応に役立つものであり、これを用いた分析から、教訓を導き出すとともに、将来の地滑り災害のマネジメント手法を提案した。以上の一連の研究活動と成果を、以下で説明する 7 つの章から構成される博士論文として体

系的にまとめた。各章の概要は次の通りである。

第1章では、研究の背景、問題点の記述、研究の目的や方法、研究全体の構成などを紹介している。

第2章では、地滑り、地理情報システム (Geographic Information System: GIS)、リモートセンシング (Remote Sensing: RS)、合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar: SAR)、災害、災害管理など、この研究で使用される重要な用語や概念について解説している。具体的には、地滑りの定義、原因、種類、影響について紹介するとともに、GIS、RS、および SAR の基本知識や概念、重要な用語、および利点などを提示して、本研究に用いた主要な技術とツール、およびそれらを採用した理由を説明している。

第3章では、本研究で研究対象とした 2018 年北海道胆振東部地震による地滑りの特性について解説している。具体的には、発生した地滑り空間データと地滑りの発生に影響を及ぼしたと考えられる要因 (地形、地質、土壌、地表の植生、降水量、地震動) に関するデータを収集するとともに、今回の地滑りに関するこれまでのレポートと研究をレビューした結果をまとめている。今回の地滑りは、震源地から 25km 以内の震源域北部で、日高山から石狩窪地への遷移帯の領域に密に分布している。またそのほとんどは、地下の複合体の上にすべり面を備えた小さなサイズの浅い地滑りであり、長いランアウトと高い移動性を備えた厚さ数メートルの火山性堆積物の堆積層を境界として移動している。これらの地滑りは、主に谷の地形といくつかのタイプの平坦な斜面で発生し、地滑りの上面は茶色がかったパッチとして露出した。地滑りの傾斜勾配は、一般的な他の地滑りに比べて小さかったが、これは主にこの地域の特殊な土壌の特性 (多孔質火山性堆積物) によるもので、これが以前の降雨による水を多く含んでいたためと考えられる。地震動は地滑りの直接的な引き金となっているが、いくつかの要因 (特に土壌、降雨量、地震動) の複合的な影響が地滑りの真の原因である。今回の地滑りの一般的な発生メカニズムは、硬い岩盤の上に存在していた多孔質の柔らかい火山性堆積層が地震前の降雨の水を多く含んでおり、これが地震の揺れによって破壊されたためと考えられる。

第4章では、地滑りが発生する前に行う地滑り対策や避難指示の効率化のために、収集した空間データを使用して GIS を用いた地滑りの危険度分析を紹介している。地滑りの空間的な統計データと地滑りの発生に影響を及ぼすと考えられる要因 (地形、地質、土壌、地表の植生、降水量、地震動) の関係を分析した。具体的には、収集されたすべてのデータを、ラスタ形式またはベクター形式で、分析用に同じ形式の 10m ラスタセルに変換するとともに、条件付け係数指標の有効性、相関、多重共線性の問題を、ROC 曲線 (Receiver Operating Characteristic Curve)、ピアソンの相関、TOL、および VIF で分析し、効果的な指標を見つけてモデル化した。地滑りが発生したセルよりも発生していないセルの方がはるかに数が多いため、地滑りの有無の比率の異なる幾つかのデータセットを用意してテストを行い、分析精度が高くなる比率を検討した。地滑り危険度評価モデルは、ロジスティック回帰によって決定された比率の下で選択された指標を使用して最終的に構築した。そして、入手したデータの 70% をトレーニングに使用し、そのトレーニングで構築した評価モデルを、残りの 30% のデータを用いて検証した。その結果、本研

究で調査地域を対象として構築した地滑り危険度評価モデルは、実際の地滑りを高い精度で評価できることがわかった。

第5章では、地滑り発生後に対象地域を撮影した SAR データを利活用した各種の分析から、早期に精度の高い地滑りの検出を可能とする手法について解説している。これは、地滑り発生後の効率的な災害対応に資することを目的としたものである。具体的には、地滑り発生前の2つと発生後の1つの高解像度 ALOS-2 SLC SAR データを用いて、地表の変化を測定可能なパラメータをレーダー反射メカニズムに基づいて選択し計算した。選択したパラメータは、強度差の絶対値 (d_{abs1} および d_{abs2})、相関係数 (r)、相関係数差 (Δr)、コヒーレンス (γ)、およびコヒーレンス差 ($\Delta \gamma$) であるが、地滑り/非地滑りエリアの各ピクセルこれらのパラメータとの比較分析を行い、地滑りエリアを検出する方法を提案した。また、ROC 曲線を用いて決定した最適なしきい値によって、地滑りピクセルを特定するために適切なパラメータを調査した。さらにオープンソース Sentinel-1 C バンド SAR データを用いた調査との比較も行った。

第6章では、SAR データを用いた地滑り検出への地滑り危険度マップ（または地滑り条件付け係数）の適用について調査した結果を紹介している。地滑り危険度マップは、一連の地滑り条件因子を組み合わせることで構築され、各地の地滑りの発生危険度を提供できる。このようなマップを事前に用意し、SAR を用いて検出した地滑りに適用すると、地滑りの検出精度が向上するのみならず、処理する SAR 画像の範囲が制限されるので、時間の短縮も可能となることが確認された。ゆえに、事前には地滑りの発生危険度が高いエリアを示すことができるし、発災後には迅速に高精度な地滑りエリアの情報提供が可能になり、救助活動を含めた効率的な事後対応が可能となる。一方で、そのようなマップのないエリアに関しては、提案する地滑りの発生危険度マップよりは効果が低い、個別の地滑り条件を利用することで、SAR による地滑り検出効率を改善できる。例えば、外的要件としての地震動や降水量と各斜面が有する内的要因としての勾配や土地利用などを用いることで、地滑りが発生する危険性が低い領域を除外できる。

第7章では、本研究のまとめとして、主な結論、提案する手法の推奨される利用法と適用限界、および今後取り組むべき研究などをまとめている。本研究で提案した事前の GIS を用いた地滑り危険度の分析結果と事後の SAR を用いた迅速で精度の高い地滑り検出法の組み合わせにより、事前にはより良い対策の立案と地域住民への啓発、事後には救助活動を含む迅速な災害対応が可能になる。さらに、光学リモートセンシング画像が利用可能な場合は、これらも合わせて分析することで、より詳細な情報を得ることが可能になる。一方で、今回の地滑りは、火山性堆積物の動的な特徴に注意を払うべきことに注意喚起している。また、単体として重要性の高くない要因がいくつか組み合わさった場合に、地滑りの発生に深刻な影響を及ぼす可能性があるため、降雨量や地震動が相対的に低い場合にも、特別な地域特性を有するエリアでは注意が必要である。なお、提案手法では、火山性堆積物の動的特性など、地滑りが発生する詳細な物理的メカニズムや、地滑り検出用の SAR データの偏光測定情報などを考慮できておらず、これらは今後の課題である。

以上のように本研究では、2018年6月に発生した北海道胆振東部地震によって発生した地滑

りを対象に、事前の GIS を用いた地滑り危険度の分析結果と事後の SAR を用いた迅速で精度の高い地滑り検出法を提案した。この提案手法により、事前にはより良い対策の立案と地域住民への啓発、地滑り発生後には救助活動を含む迅速な災害対応が可能になり、今後の地滑り災害の被害軽減につながるものである。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。