

学 位 論 文 内 容 の 要 旨	
学位論文 題目	Application of Satellite Radar Interferometry to Monitoring Subsidence and Slope Displacement Induced by Mining Activities (鉱山採鉱活動に伴う地盤沈下および斜面変位監視に対する干渉 SAR の適用に関する研究)
氏 名	I Nyoman Sudi Parwata
Summary of the Contents of the Doctoral Dissertation	
<p>Mining activities, i.e. excavation of the ground, extracting the resources from the surface and underground, are human action which may affect the natural ground to become unstable. Monitoring ground behavior is important to assess the stability of the ground. There are several useful methods can be used to measure the ground surface displacement, for example, geotechnical instruments, surveying methods and GPS. Those methods are useful. However, those measure the ground surface displacements only at certain points installed the sensors or targets. If the monitored area is huge, the number of required devices become increase very much. It leads high-cost and inefficient. To solve these problems, an alternative methods/tools are required.</p> <p>The Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) has the potential to solve the above limitation. On the other hand, there are still issues in practical applications of this method for monitoring displacement in rock and geotechnical engineering projects, although the fundamental DInSAR technology has been basically established.</p> <p>This study aims to investigate the applicability of DInSAR to monitoring surface ground displacements induced by mining activities.</p> <p>The main purposes of this study are 1) to investigate the effect of Digital Elevation Model (DEM) to the displacement measurement results obtained by DInSAR. 2) to evaluate the applicability of DInSAR to monitor land subsidence induced by salt mining activities, and 3) to assess the advantages and limitations of DInSAR in the cases related to landslide phenomena.</p> <p>The dissertation is composed of seven chapters as follows;</p> <p>Chapter 1 explains background, motivations, problem statements, and objectives of this study. Theoretical background and literature reviews relevant to this study are given in Chapter 2.</p> <p>In Chapter 3, the applicability of DInSAR to monitor the slope stability in open-pit mine is investigated. DInSAR has the potential to be a cost-effective method for monitoring surface displacements in such areas. DInSAR requires an appropriate DEM for its analysis. However, since the topography of the ground surface in open-pit mines changes year by year, measurement errors can occur due to the lack of an appropriate DEM. The effect of different DEMs on the displacement results by DInSAR is investigated at a limestone quarry. And, the accuracy of DInSAR is examined by comparing the DInSAR results with the results obtained by GPS monitoring.</p> <p>It is verified that the uncertainty of DEMs induces large errors in the displacement monitoring results if the baseline length of the satellites is long. After comparing the monitoring results of DInSAR and GPS, it is found that the root mean square error (RMSE) of the discrepancy between the two sets of results is less than 10 mm. DInSAR can be applied for</p>	

monitoring the displacements of mine slopes with centimeter-level accuracy by using an updated DEM and the selection of SAR data with short perpendicular baselines of less than 100-150 m (for L-band SAR data).

In Chapter 4, an advanced time-series analysis, Small Baseline Subset DInSAR (SBAS-DInSAR) proposed by (Berardino et al., 2002) is applied for monitoring subsidence induced by extracting salt water from underground salt deposits in Tuzla city, Bosnia and Herzegovina. The main purpose of this chapter is to enhance the former studies of subsidence in this city and to investigate whether the SBAS-DInSAR could be a better method for monitoring the subsidence. The SBAS-DInSAR results are evaluated by the results of GPS survey. It was found that subsidence obtained by GPS and SBAS-DInSAR are coincide within a few cm.

SBAS-DInSAR can be used as a cost-effective tool and sustainable ground subsidence monitoring method. Recently, Sentinel-1A and -1B satellites provide the SAR data continuously every 6-12 days. The main limitation of Sentinel-1 data is high decorrelated in the vegetated area. It can be solved by combining the SAR data with longer wavelength provided by ALOS-2 data. However, the number of ALOS-2 data is very limited and only 3-5 SAR data covers this area in a year. This is a limitation at present.

In Chapter 5, SBAS-DInSAR is applied to two cases of monitoring landslide displacements located near residence area. In the first case, it was found that this method showed a good applicability to monitor slow displacement behavior with a few centimeters in a year. However, due to a geometrical relationship between the Line of Sight (LOS) of satellite and the displacement direction, it has low sensitivity to measure the displacement of the North-South direction. It was explained through comparison of displacements measured by SBAS-DInSAR and GPS. In the second case, the SBAS-DInSAR is applied to a slope which the landslide failure occurred, in order to investigate whether a sign of the slope failure could be detected. It is found that the SBAS-DInSAR could not detect a sign of the sudden large displacement and any sign of the failure. The main reason of this limitation is that the amount of the displacement before the slope failure was too small to be detected by DInSAR in this case.

In Chapter 6, a new fundamental equation of InSAR derived by the authors is presented and it is verified by using a SAR data. The equation is newly formulated based on a different concept from one of the original InSAR. A practical application will be a future work.

General conclusions of this study and recommendations for future researches are given in Chapter 7. It includes the significant findings of this study and the remaining issues which become future researches.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博甲 第 0773 号	氏 名	I Nyoman Sudi Parwata
最終試験担当者	主 査 清 水 則 一 審 査 委 員 麻 生 稔 彦 審 査 委 員 中 田 幸 男 審 査 委 員 鈴 木 素 之 審 査 委 員 長 井 正 彦		
【論文題目】 Application of Satellite Radar Interferometry to Monitoring Subsidence and Slope Displacement Induced by Mining Activities (鉱山採鉱活動に伴う地盤沈下および斜面変位監視に対する干渉 SAR の適用に関する研究)			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】 <p> 鉱山における資源採掘が周辺地盤に影響を与えることがあるため、地盤の挙動を監視するための変位モニタリングは重要である。一般に地盤変位計測には、伸縮計などの地盤計測機器、測量手法、GPSなどが用いられるが、いずれの手法によっても変位が求められるのはセンサー設置点（あるいは標点）のみである。広範囲に地盤挙動を注意深く監視するために、変位を空間的にも時間的にも連続して計測できる新しい方法が望まれる。 </p> <p> 人工衛星搭載合成開口レーダに基づく差分干渉（Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar: DInSAR）による変位計測は、対象とする地表面にセンサーや標点を設置することなく、上記の要求に応えることが可能な技術である。DInSAR の基礎理論や方法はおおむね確立されているが、地盤・岩盤工学上の実務的な問題への適用性については、適用方法も含めてまだ十分に明らかでない。本研究は、資源採掘に伴う斜面や地表面の変位計測に対する DInSAR の適用性を検証し、その性能や限界について考察するものである。 </p> <p> 第 1 章では、本研究の背景、位置づけ、取り組む課題と目的、並びに、本論文の構成を示した。第 2 章では、合成開口レーダ（SAR）、干渉 SAR（InSAR）、差分干渉 SAR（DInSAR）、時系列 DInSAR 解析の基礎理論の概要を述べ、InSAR/DInSAR の適用に関する研究事例について文献調査をした。 </p> <p> 第 3 章では、数値地形モデル（Digital Elevation Model: DEM）の DInSAR 結果への影響について、露天鉱山斜面を対象に考察した。露天鉱山では資源採掘により地表形状が年々変化するため DEM の良し悪しの影響を受けやすい。一般に入手できる数種の DEM と著者が更新した DEM を用いて実働下の鉱山を対象に DInSAR 解析を行った。その結果、掘削による斜面形状の変化を少なくとも数 m 程度の精度で反映した DEM を用いること、さらに干渉させる 2 時期の衛星間の垂直基線長が 100～150m 以下とするとよいことが示された。この条件に基づいた DInSAR 解析による斜面の計測変位は、GPS による高い精度の計測結果に対して 1 cm 以下の差で求められ、本章で得られた条件の妥当性が示された。 </p> <p> 第 4 章では、地表面変位を時間・空間的に連続して計測する手法としての DInSAR の性能について調べた。対象は地下岩塩層から塩水採取をすることにより広域的な地盤沈下が長期継続して問題となっている都市である。ここでは、SBAS（Small Baseline Subset）と呼ばれる時系列解析法を適用した。得られた沈下の空間分布と時間推移を GPS による高い精度の計測結果と比較したところ、空間分布は GPS の結果と整合し、また、時間推移についても同一計測個所で両者の差は 1 cm 以内となり、時系列 DInSAR 解析結果の妥当性が示された。さらに、得られた結果を分析して、沈下分布の中心は市街地北東領域にあること、市街地域で沈下は年間 3 mm 以下とほぼ収束していること、一方、北東の丘陵地ではなお年間 10 </p>			

～40 mmあることなどが明らかにされた。以上により、時系列 DInSAR は、連続的に沈下の空間分布を実用レベルで計測できることが明らかとなった。

第5章では、2つの地すべり斜面、すなわち、継続的に変位が増加している斜面、および、崩壊に至った斜面、について時系列 DInSAR を実施し、DInSAR の斜面変位計測手法としての適用性と限界について考察した。年に1～数cm程度の比較的速度の小さい変位に対しては、DInSAR は変位計測手法として適用性は高く、GPS による計測結果とよく整合した。ただし、SAR の電波の照射方向と変位の方向との幾何学的関係によっては感度が低くなることが示された。一方、崩壊時の大変位は追従できず、また、崩壊に至る前兆も必ずしも十分にとらえることはできなかった。これは、SAR の原理上の問題、運用上の問題（衛星の再帰期間など）に加え、誤差補正の方法に起因していることが指摘された。

第6章では、InSAR の基本式を新しい視点で誘導した。これまでの基本式は地表の1点について導いていたが、ここでは2点を利用した幾何学関係を用いている。この式に基づくと SAR データから標高が求まるが、従来の方法に比べてアンラップのプロセスが必要ない点に特徴がある。基本式の妥当性は認められたが、その実用性の検証については今後の課題である。

第7章は、本研究で得られた結果を取りまとめて結論とした。

公聴会はインドネシアにも中継し、国内外から60名を超える出席があった。主な質問は、露天掘り鉱山変位監視に対して、1) DInSAR 適用の意義の確認、地下岩塩採取に起因する地盤沈下監視に対して、2) 地盤沈下変位と DInSAR による LOS 変位の関係および水平変位に対する仮定の妥当性、3) 計測変位に基づく将来挙動予測の可能性、4) アセンディングデータを使った理由、地すべり斜面変位監視に対して、5) 崩壊前後の地表面の条件変化のコヒーレンスに及ぼす影響、基礎的な事項に対して、6) 解析に必要な衛星に関するパラメータの詳細、などであった。いずれの質問に対しても的確かつ十分な回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、新規性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文等の発表状況は以下の通りである（関連論文：計5編）

【関連論文】

1. I. N. S. Parwata, S. Nakashima, N. Shimizu, and T. Osawa: Effect of digital elevation models on monitoring slope displacements in open-pit mine by Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (2020年10月掲載決定)
2. T. Tanaka, I. N. S. Parwata, and P. E. Yastika: Synthetic Aperture Radar Interferometry utilizing Radar Principles, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* (2020年6月掲載決定)
3. I. N. S. Parwata, N. Shimizu, B. Grujić, R. Čeliković, S. Zekan, and I. Vrkljan: Validity of SBAS-DInSAR Monitoring of Subsidence Induced by Salt Mining in Tuzla, *Proceedings of ISRM Specialized Conference "Geotechnical Challenges in Karst"*, Croatia, pp. 311-316, 2019.
4. L. Podolszki, I. N. S. Parwata, N. Shimizu, D. Pollak, and I. Vrkljan: Landslide in Hrvatska Kostajnica—collected data and analysis in progress, *Proceedings of ISRM Specialized Conference, Geotechnical Challenges in Karst, Croatia*, pp. 323-328, 2019.
5. I. N. S. Parwata, N. Shimizu, S. Zekan, B. Grujić, and I. Vrkljan: Application of DInSAR for Monitoring the Subsidence Induced by Salt Mining in Tuzla, Bosnia and Herzegovina, *Proceedings of 10th Asian Rock Mechanics Symposium, Singapore, G2*, p.8, 2018.