

学 位 論 文 内 容 の 要 旨	
学位論文題目	APPLICATION OF MULTI-TEMPORAL DIFFERENTIAL INTERFEROMETRY SAR TO LONG-TERM MONITORING SUBSIDENCE IN SEMARANG, INDONESIA AND VOLCANIC DEFORMATION IN SAKURAJIMA, JAPAN (インドネシア・スマランの地盤沈下, および, 桜島の火山変形の長期監視に対する時系列差分干渉 SAR の適用に関する研究)
氏 名	PUTU EDI YASTIKA
Summary of the Contents of the Doctoral Dissertation	
<p>Monitoring of ground surface displacement that related to geological hazard is an important task in order to understand their behavior. Geological hazard, in this case, can be land subsidence, landslide, and/or volcanic activities. Displacement monitoring result is one among others information that required to make a countermeasure, mitigation plan, and risk reduction over those hazard areas. A monitoring method that able to provide a spatial distribution of displacement and its transition over time is highly required. That method should be low cost and effective, which can continuously provide accurate measurements over extensive areas. Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR) has the potential to be a powerful technique that can meet the above demands.</p> <p>The first objective of this thesis is how to utilize the DInSAR method for long-term spatio-temporal displacement monitoring. This study aims to overcome the limitation of SAR satellite lifespan by utilizing multi-sensor SAR dataset. Utilization of Hyperbolic Method (HM) with multi-temporal DnSAR is conducted in this thesis. Long-term subsidence monitoring in Semarang in Indonesia is taken as a research area for that objective.</p> <p>In addition to that, improvement of DInSAR accuracy is a key issue for practical applications. DInSAR is severely affected by the tropospheric delay when applied for the area with rugged topography. Two methods to remove tropospheric delay from multi-temporal DInSAR results are proposed in this thesis. Sakurajima volcano in Japan is chosen for this purpose. This is the second objectives of this thesis.</p> <p>In the end, its need to know the reliability of DInSAR methods and its results' characteristic for various application with various geotechnical issues. Therefore, the monitoring results over six different sites are also presented namely: Seoul in South Korea, Denpasar in Indonesia, Mitake in Japan, Sidoarjo mudflow in Indonesia, Black Sea coast in Bulgaria, and Yabakei in Japan.</p> <p>All objectives of this thesis are sequentially discussed in chapter 3, 4 and 5. The summary of each chapter is as follows:</p> <p>In chapter 3 discuss the application of multi-temporal DInSAR for long-term subsidence monitoring in Semarang Indonesia. Land subsidence is a critical issue that large cities located in coastal areas, such as Semarang, must address. The monitoring of land subsidence is vital for predicting and mitigating the disasters that such subsidence may cause. DInSAR has been applied to monitor the subsidence in Semarang, but it was for a limited period before 2012. In order to clarify the transition of the long-term subsidence behavior in Semarang, the Small Baseline Subset (SBAS) method, which is one type of multi-temporal DInSAR, is employed in</p>	

this research. The sets of data of Envisat-ASAR (2003-2007), ALOS-PALSAR (2007-2011), and Sentinel-1A (2015-2017) are employed for the analyses. Then, the validity of the SBAS results is discussed from the viewpoints of both spatial distribution and temporal transition using GPS displacement measurement results and the geological conditions of the ground. On the other hand, as the lifespan of SAR satellites is commonly designed to be around 5-7 years, an appropriate method, which can connect the subsidence provided independently by the unlinked time-series data sets of the three different SAR satellite data, is required. This study uses the Hyperbolic Method (HM) to connect the above unlinked SBAS results. The HM is often used to fit the monitored subsidence in practice as a geotechnical engineering tool. Using this method, 14 years of the temporal behavior of the subsidence in Semarang is evaluated. It is found that the transition of the subsidence is different depending on the location, and that the subsidence rate is still increasing in the north and northeast parts of the coastal area. This study shows that SBAS DInSAR can be a useful tool for long-term continuous subsidence monitoring.

In chapter 4 discuss the application of multi-temporal DInSAR for deformation monitoring induced by volcanic activity of Sakurajima, Japan. Monitoring deformation due to volcanic activity is important for understanding a volcano behavior. The Global Navigation Satellite System (GNSS) is sometimes used for such purposes. However, the system requires the installation of sensors at the site, and the installation and maintenance of these sensors are usually difficult and dangerous when volcanoes in the area are very active. On the other hand, DInSAR can be used to measure the surface deformation of volcanoes without the installation of any devices on the ground. Moreover, the time-series DInSAR analysis has the potential to reveal the deformation behavior of volcanoes at the pre- and post-eruption stages. However, the DInSAR results can be greatly affected by the temporal variation in the refractivity in the tropospheric layer, especially when there are large differences in height in the target area of the measurements. Although it is a fundamental issue of DInSAR, it is still difficult and there are only a few methods for removing the errors caused by the tropospheric delays of radar pulse waves. This thesis discusses this issue and proposing two simple methods for improving the measurement accuracy. The proposed methods were applied. Ground surface deformation was observed for three years, from November 2014 to August 2017, by a time-series DInSAR analysis using Sentinel-1 data (operated by the European Space Agency). In this way, the effect of the tropospheric delays was successfully reduced.

In chapter 5 has demonstrated the various application of SBAS DInSAR in six different study sites. The size of the site is various from the large megapolitan city such as Seoul, South Korea to the local slope like Yabakei, Japan. Also, the ground condition and factors that lead ground deformation are different for each site. This variation makes different challenges to applies SBAS DInSAR. The application of SBAS DInSAR for long-term monitoring of displacement is found very useful. However, there are some limitations such as the size and geometry of the monitoring area, and vegetation that covers the site. The issues that are raised in this chapter can be the future work of this research.

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 0769 号	氏名	Putu Edi Yastika
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 multi-temporal differential interferometry SAR to long-term monitoring subsidence in Semarang, Indonesia and volcanic deformation in Sakurajima, Japan (インドネシア・スマランの地盤沈下, および、桜島の火山変形の長期監視に対する時系列差分干渉 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】

地盤沈下や地すべり、火山などの挙動を把握し理解するうえで、地表面変位のモニタリングは重要である。地表面変位のモニタリング結果は、安全性の評価、挙動の予測、対策工の検討のためには不可欠な情報である。そのため、できるだけ広範囲に連続的に、しかも、精度よくかつ経済的にモニターできる方法が望まれる。差分干渉 SAR (DInSAR: Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar) は、これらの要求を満たすモニタリング技術となる可能性がある。

本研究は、DInSAR を用いて地表面変位の空間的分布および時間的推移を長期間にわたりモニタリングする手法の提案、高精度観測に向け対流圏遅延の影響を低減する方法の提案、さらに、変位モニタリング法としての実用性を国内外の地すべり、火山、地盤沈下などの現場への適用を通して評価することを目的としている。

まず、第1章では、研究の背景、目的、論文構成を述べ、第2章では SAR および DInSAR の基本と方法を記述し、変位モニタリングへの応用に関する文献調査を行っている。

第3章では、時系列 DInSAR をインドネシアのスマラン市の地盤沈下観測に適用し、DInSAR による地盤沈下の空間的分布および時間的推移の長期モニタリング手法を提案した。用いるデータは、Envisat-SAR (2003-2007年)、ALOS-PALSAR (2007-2011年)、Sentinel-1A (2015-2017年) により観測されたもので、時系列 DInSAR 手法のひとつである SBAS (Small Baseline Subset) 手法を採用して地表面変位を求めている。SBAS による結果は、地質分布および GPS による地表面変位計測結果と比較して妥当性を検証している。一方、SAR 衛星の寿命は通常 5~7 年で設計されているため、長期間連続的にモニターし続けることは難しく、データの欠損期間を含め異なる期間で異なる SAR データにより得られた結果を連続的に接続する手段が必要となる。本章では、地盤工学分野において現場データから地盤の圧密沈下を予測する手法として提案されている双曲線法を用いて、SBAS によるデータの接続を行った。この手法により、14 年間にわたるスマラン市の地盤沈下の推移が連続的に求められ、その結果、地盤沈下の時間的推移の地域による特徴の相違、沈下速度が現在も継続的に増加し続けている場所が明らかとなった。上記の検討により、提案する方法は、地盤沈下の長期モニタリングのために有効であることが示された。

第4章では、時系列 DInSAR を桜島の火山活動モニタリングに適用した。近年、火山の地表面変位モニタリングには GPS/GNSS がよく用いられるが、観測地点にセンサ等を設置する必要のない SAR 技術は、観測の安全性や経済性、また、変位の面的な把握という観点から優れている。一方、火山のような地形的な起伏が大きい領域では、DInSAR の解析結果は対流圏遅延による電波遅延の影響を大きく受けることが

知られている。対流圏遅延の影響の除去は DInSAR の課題であり、いくつかのモデルが提案されているが実用的な手法の確立が望まれている。本章では、DInSAR の解析結果から対流圏遅延誤差の影響を簡易に軽減する手法を 2 種類提案し、桜島の時系列 DInSAR 解析結果に適用した。この解析では、Sentinel-1 (2014 年 11 月～2017 年 8 月) のデータを使用し、対流圏遅延の影響が低減されることを明らかにした。

第 5 章では、SBAS 手法を用いた時系列 DInSAR 解析を国内外の 6 地域に適用した。観測の対象とする領域の規模は、大都市圏から小規模な斜面まで多岐にわたる。検討の結果、DInSAR はこれら様々な地表面変位のモニタリングに有効であることを示すとともに、対象領域の規模、地形起伏の大小、植生等の地表面状況により解析結果の精度に影響が生じるなど現状の適用限界にも言及した。

第 6 章は、本研究で得られた成果を取りまとめ、今後の課題を明示し結論としている

公聴会における主な質問は、地盤沈下観測に対して、1) 沈下の時空間分布と地質の関係、2) 地盤沈下と地下水くみ上げ状況との関係、3) 解析の単位となるピクセルの大きさ (解像度) の決定方法、4) DInSAR による変位 (沈下) の符号の意味、また、火山挙動観測に対して、5) 提案する対流圏遅延補正の仮定 (高低差に比例とすること) の背景と妥当性、6) 得られた変位の意味 (地盤沈下との違い)、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 3 編)

1. Yastika, P.E., Shimizu, N. and Abidin, H.Z.: Monitoring of long-term land subsidence from 2003 to 2007 in coastal area of Semarang, Indonesia by SBAS DInSAR analyses using Envisat-ASAR, ALOS-PALSAR, and Sentinel-1A SAR data, *Advances in Space Research*, 63, pp. 1719-1736, 2019.
2. Yastika, P.E and Shimizu, N.: Monitoring deformation of ground surface over extensive area by multi-temporal DInSAR, *Proceedings of ISRM International Symposium for 2016, EUROCK2016, Cappadocia*, 2, pp. 1219-1224, 2016.
3. Yastika, P.E., Ibara, T., Shimizu, N., Iwata, N., Takahashi, Y. And Araki, Y.: Application of DInSAR for monitoring the ground deformation due to volcanic activity: a case study of Sakurajima, Japan, *Proceedings of ISRM International Symposium for 2018, ARMS10, Singapore, G2 (Site Investigation and Monitoring)*, 8p., 2018.