

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	エネルギー施設の維持管理分野への人工衛星 SAR データ活用に関する研究 (A study on application of satellite SAR data to the field of maintenance and management of energy facility)
氏 名 (Name)	安保 秀範

衛星リモートセンシングの技術は、資源探査、農業、森林、環境、土地利用、防災など、様々な分野で利用が進んでおり、危機管理・防災分野などで期待されているとともに、社会インフラの維持管理分野への活用研究も進んでいる。地球観測人工衛星に搭載する観測機器としては、光学センサであるカメラ、マイクロ波センサである合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar ; SAR) がある。合成開口レーダーはマイクロ波を用いたアクティブセンサであり、昼夜、天候の影響を受けにくく、安定して定期的に観測され、レーダーの反射波の強度と位相が得られる。

本論文は、人工衛星 SAR データをエネルギー施設の維持管理の分野へ活用することを目的として、一つ目として、レーダーの反射波の位相の変化から変位を求める変位計測の適用性について検討する。具体的には、① ロックフィルダムの外部変形モニタリング、② 斜面変位モニタリング (適用対象は、ダム湛水池斜面、送電鉄塔周辺斜面、発電所水路経過地斜面など)、③ 地盤沈下モニタリング (適用対象は、シールドトンネル構築などによる地表面への影響、水溶性天然ガス溶存地下水の揚水による地盤沈下、地熱発電での熱水くみ上げによる地表面への影響など) への適用性について検討した。

人工衛星 SAR データを用いた変位計測の計測手法はこれまで多くの研究がされてきているが、本論文では、同一条件で観測したデータを多く用いれば、恒久散乱点のみとなるが計測精度の高い PSInSAR 解析手法を適用した。SAR データは、同一条件で観測したデータが 12 日間隔 (2 基体制を考慮すると 6 日間隔) と多くのデータが入手可能な Sentinel-1 を用いた。

人工衛星 SAR データを用いた変位計測が、現状の変位計測に代替できるかどうか、実適用できるかどうかは、その計測精度が問題となるため、それぞれの適用対象で変位の計測精度の検証を行った。また、PSInSAR 解析では人工構造物がある箇所など恒久散乱点のみの計測となり、山間部の草木が生い茂っている斜面では恒久散乱点が得られないことから、斜面へのコーナーリフレクタ設置による斜面変位計測についても検討して、その変位計測精度も検証した。なお、日本では、ロックフィルダムの外部変形、斜面変位、地盤沈下の変位計測への人工衛星 SAR データの活用は、これまで主に日本の ALOS の活用についての検討がされてきている。同一条件で観測したデータは、現在利用可能な ALOS-2 は 3~4 カ月に 1 回の頻度であり、PSInSAR 解析には適しておらず、時系列干渉解析としては、スタッキング解析、SBAS 解析などの多くの精度検証事例があるものの、Sentinel-1 を用いた PSInSAR 解析による精度の検証はされていない。

二つ目として、強度の変化から地表面の変化を把握できるが、強度の変化から積雪深を推定することを検討した。山間部に位置するダムの集水域全体の積雪の量を把握できれば、ダム運用上重要

なデータとなり、水力発電の効用を向上させる効率的なダム運用に資する可能性がある。そこで、人工衛星 SAR データを用いた山岳地帯を対象とし積雪深の推定方法を検討し、その積雪深推定精度の検証を行うとともに、ダム運用への適用性について検討した。

具体的な検討内容は以下に示すとおりである。

ここ数年年間最大 1cm 程度変位し、外部変形量を連続計測していたロックフィルダム、更に、年間最大 2mm 程度変位している 6 基のロックフィルダムを対象に、PSInSAR 解析結果と測量値を比較して、PSInSAR 解析による変位計測精度を検証した。PSInSAR 解析により mm オーダーの高い精度で計測できることが検証され、保守管理に人工衛星 SAR データが活用できる可能性があることを示した。地震時などの不連続な変位の現象でない場合には、高い精度の移動平均値 (3 データ) により健全性の確認をすることを提案した。さらに、Sentinel-1 SAR データを活用した PSInSAR 解析によるロックフィルダム外部変形計測の保守管理への適用性について考察した。

PS 点が得られない箇所へコーナーリフレクタを設置して変位計測することを想定し、強制的に変位させることが可能なコーナーリフレクタを製作、設置し、Sentinel-1 SAR データを用いた PSInSAR 解析による変位と実際の変位を比較することで、コーナーリフレクタ設置位置での PSInSAR 解析による変位計測精度を検証した。

水力発電所の水路経過地斜面において、斜面上部の人工構造物がある PS 点での衛星視線方向の変位計測結果と、斜面下部の水路がある地点の測量調査結果が整合していることを確認し、斜面変位モニタリングの適用性について評価した。また、小型で安価なコーナーリフレクタを PS 点が得られない水路近傍に製作、設置し、人工構造物の PS 点に加え、コーナーリフレクタの PS 点でも変位が計測できることを確認し、コーナーリフレクタを活用した斜面変位モニタリングの適用性について評価した。

最大で約 2cm/年の地盤沈下している千葉県東部地域を対象に、2017 年 1 月から 2024 年 1 月までの 7 年間の南行軌道の Sentinel-1 SAR データを用いて PSInSAR 解析を実施して計測した地盤沈下量と千葉県で実施している水準測量結果を比較して、地盤沈下量の計測精度を検証した。本解析での年平均変位の計測精度は約 1mm/年であり、これまでの同地域での精度検証事例より高い精度であることを確認した。地盤沈下を広域で面的に精度よくモニタリングできることから、水準測量と併用するなど地盤沈下監視の合理化ができることを示した。

Sentinel-1 SAR データを用いて、積雪深の推定方法を検討するとともに、群馬県の利根川最上流域を対象に、積雪深観測所での観測値を用いてその推定精度を検証した。本地域の森林地帯において、積雪深と斜面の VV 偏波と VH 偏波の後方散乱係数の関係性について検討した結果、後方散乱係数から積雪深の推定が可能であることを確認した。木が生い茂っている 500m 四方の斜面の後方散乱係数から 4m 以下の積雪深の推定精度は、推定条件などによるが 20~50cm 程度となり、融雪量推定のための広域な流域面積での積雪の状況を把握することなどに活用できる可能性があることを示した。

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	エネルギー施設の維持管理分野への人工衛星 SAR データ活用に関する研究 (A study on application of satellite SAR data to the field of maintenance and management of energy facility)
氏 名 (Name)	ABO Hidenori

Satellite remote sensing technology has been used in various fields such as resource exploration, agriculture, forestry, environment, disaster prevention, and maintenance of social infrastructure. Earth observation satellite instruments are optical sensors and Synthetic Aperture Radar (SAR). SAR is an active sensor using microwaves and can observe day and night, in any weather conditions, it is regularly observed and the intensity and phase of the reflected radar waves can be obtained.

This paper aims to apply satellite SAR data to the field of maintenance and management of energy facilities, and firstly, the applicability of displacement measurement, which determines displacement from changes in the phase of reflected radar waves, is evaluated. The application of SAR data for displacement measurement was discussed for external deformation monitoring of rockfill dams, slope displacement monitoring (examples of application: slopes facing the lake of a dam, slopes with power transmission towers, slopes with waterways for hydroelectric power, etc.), and land subsidence monitoring (examples of application: land subsidence due to construction of tunnels, land subsidence due to pumping of groundwater containing soluble natural gas, land subsidence due to pumping of geothermal water for geothermal power generation, etc.).

The PSInSAR analysis method was applied because of its high displacement measurement accuracy, although it requires a large number of observation data under the same conditions and only permanent scattering points are measured. Sentinel-1 was used for the SAR data, which was observed under the same conditions at intervals of 12 days (6 days considering the two-unit system). The accuracy of displacement measurement using satellite SAR data was verified for each application, because the accuracy of displacement measurement is an issue whether displacement measurement using satellite SAR data can replace the current displacement measurement and whether it can be applied in actual cases.

The accuracy of displacement measurement by PSInSAR analysis was verified by comparing the results of PSInSAR analysis with surveyed values for a rockfill dam that continuously measured external deformation with a maximum displacement of about 1 cm and six rockfill dams that displaced a maximum of about 2 mm per year. In the case of a dam with no discontinuous deformation, it is proposed to confirm the behavior of the dam using moving average data (three data sets), which can be measured with high accuracy. Furthermore, the applicability of the PSInSAR analysis for the measurement of external deformation of rockfill dams using Sentinel-1 SAR data to maintenance management is discussed.

Corner reflector that can be forced to displace was manufactured and installed, and the displacement measured

by PSInSAR analysis using Sentinel-1 SAR data was compared with the actual displacement to verify the accuracy of displacement measurement by PSInSAR analysis at the location where the corner reflectors were installed.

Slope displacement monitoring of with displacements as small as 1 mm per month was carried out by PSInSAR analysis using Sentinel-1 SAR data. Small, inexpensive corner reflectors were installed to verify that displacement measurement is possible at the corner reflectors as well as at the artificial structure locations.

The land subsidence measured by PSInSAR analysis using Sentinel-1 SAR data of descending orbit for 7 years from January 2017 to January 2024 was compared with the result of level survey in Chiba prefecture to verify the measurement accuracy of land subsidence in the eastern part of Chiba prefecture where the maximum land subsidence is about 2 cm/year. The accuracy of annual mean displacement measurement in this analysis was approximately 1 mm/year, which is more accurate than the accuracy verified in previous cases in the same area. The PSInSAR analysis enables accurate monitoring of land subsidence over a wide area, and can be used in combination with level surveying to rationalize the monitoring of land subsidence.

The second one, which utilizes changes in the intensity of SAR data, was studied to estimate the snow depth based on changes in the intensity of SAR data.

Using Sentinel-1 SAR data, the estimation method of snow depth was studied and its accuracy was verified at snow depth observation sites in the upper reaches of the Tone River in Gunma Prefecture. The estimation of snow depth was confirmed to be possible based on the variation of backscattering coefficients of VV and VH polarization with snow depth in the forested area in this region. The estimation accuracy of the snow depth below 400 cm based on the backscatter coefficients for a 500 m meshed slope covered with trees was about 20 to 50 cm, indicating that this method can be used to evaluate the snow cover situation over a wide watershed area for estimating snowmelt.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	安保秀範
審 査 委 員	主 査： 大澤高浩
	副 査： 小河原加久治
	副 査： 鈴木素之
	副 査： 中島伸一郎
	副 査： 今岡啓治
	副 査： 三浦房紀
	副 査： 島田政信
論 文 題 目	エネルギー施設の維持管理分野への人工衛星 SAR データ活用に関する研究 (A study on the application of satellite SAR data to the field of maintenance and management of energy facilities)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>本研究では、合成開口レーダー (SAR) を用いた時系列のインターフェロメトリー手法 (PS-InSAR 解析) を活用し、インフラ施設の維持管理や地盤沈下モニタリングに関する精度検証とその応用について検討を行った。PS-InSAR 解析には、欧州宇宙機関 (ESA) が運用する Sentinel-1 (Cバンド) SAR データ (南行軌道、北行軌道) が使用された。また、ダム運用における流入量推定のため、SAR データを用いた積雪深の推定方法の検討が行われた。</p> <p>1. ロックフィルダムの外部変形モニタリング</p> <p>ロックフィルダムは、外部変形計測が重要である。本研究では約4年間の Sentinel-1 SAR データを使用し、PS-InSAR 解析で最大1cm (1mm/月) 程度の変位を高精度に計測した。連続測量データと比較した結果、数mm オーダーの精度が測定できることを確認した。</p> <p>2. 大規模ロックフィルダムのモニタリング</p> <p>安定期 (年間最大2mm 程度の変位、変形量が小さい) にある6基の大規模ロックフィルダムを対象に、最大5年9カ月間の SAR データを用いて PS-InSAR 解析を実施。結果を測量データと比較し、変位量が小さい場合でも PS-InSAR 解析が有効であることを示した。</p> <p>3. コーナーリフレクタの活用</p> <p>恒久散乱点が得られにくい山間部の斜面において、コーナーリフレクタを設置し、高精度な変位計測が可能であることを確認した。人工的に変位させたコーナーリフレクタを用い、PS-InSAR 解析による変位計測精度を</p>	

(様式 9 号)

検証した。

4. 斜面変位モニタリングの適用性評価

水力発電所の水路斜面において、5年間のPS-InSAR解析を適用し、上部の人工構造物と下部水路の測量データの整合性を確認した。又、PS点が得られない水路近傍に小型コーナリフレクタを設置し、変位計測の精度を確認した。

5. 地盤沈下モニタリング:

千葉県東部で最大約2cm/年の地盤沈下が発生している地域を対象に、7年間のPS-InSAR解析を実施し、その結果を水準測量データと比較し、年平均変位の計測精度が約1mm/年であることを確認した。都市部では、広域かつ高密度なPS点を用いて地盤沈下を面的にモニタリングできることを示した。

6. 積雪深の推定方法:

群馬県利根川最上流域での積雪深観測データを基に、SARデータを用いた積雪深推定方法を検討。森林地帯の積雪深とVV偏波およびVH偏波の後方散乱係数の関係を解析し、木が生い茂っている500m四方の斜面の後方散乱係数から4m以下の積雪深の推定精度は、推定条件などにもよるが20~50cm程度となり積雪深の推定が可能であることを示した。

又、本審査申請時の論文題目は、「エネルギー施設の維持管理分野への人工衛星SARデータ活用に関する研究 (A study on application of satellite SAR data to the field of maintenance and management of energy facility)」であったが、本審査会での意見を受けて、「エネルギー施設の維持管理分野への人工衛星SARデータ活用に関する研究 (A study on the application of satellite SAR data to the field of maintenance and management of energy facilities)」に修正された。

公聴会では、PS-InSAR解析の精度と限界、施工性、経済性に関する質問があり、発表者からは的確な回答がなされた。

以上、本研究は、独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分に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、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計8編)

<関連論文>

1) 安保秀範, 大澤高浩, 葛平蘭, 高橋章, 山岸勝俊, 櫻澤裕紀

人工衛星CバンドのSentinel-1 SARデータを活用したPSInSAR解析によるロックフィルダムの外部変形モニタリングの精度検証 土木学会論文集 Vol. 79, No. 7, 22-00257 発行年月: 2023年7月

2) 安保秀範, 大澤高浩, 葛平蘭, 高橋章, 櫻澤裕紀

Sentinel-1 SARデータを用いた利根川最上流域の積雪深の推定 土木学会論文集 Vol. 79 No. 8, 22-00345 発行年月: 2023年8月

<国際発表(査読付き)>

(様式 9 号)

- 1) Hidenori Abo, Takahiro Osawa, Pinglan Ge, Akira Takahashi, Katsutoshi Yamagishi
Deformation Monitoring of Large-Scale Rockfill Dam Applying Persistent Scatterer
Interferometry (PSI) Using Sentinel-1 SAR Data The 7th Asia-Pacific Conference on
Synthetic Aperture Radar (APSAR 2021) pp. 1-6 発行年月:2021 年 11 月

- 2) Hidenori Abo, Takahiro Osawa, Pinglan Ge, Akira Takahashi, Hiroki Sakurazawa
Application of PSInSAR Analysis Using Sentinel-1 SAR Data to Measure External
Deformation of Rockfill Dam for Maintenance Management International Geoscience
and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2023 pp. 8174-8177 : 2023 年 7 月
ほか 4 編