

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04398

研究課題名（和文）多時期ALOS-2/PALSAR-2を利用した法面の変位量推定

研究課題名（英文）Estimating displacement rate of reinforced slope using ALOS-2/PALSAR-2 time series data

研究代表者

朝香 智仁（ASAKA, Tomohito）

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：60514164

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ALOS-2（だいち2号）搭載のPALSAR-2は、地球観測のために運用されている合成開口レーダーである。本研究では、研究対象地域に選定した千葉県南部の長大法面について、PALSAR-2からその変位量を推定できるか、現地調査を通じてその妥当性について検証した。主な研究成果として、PALSAR-2から観測できる長大法面の幾何学的な特徴や、推定した地盤変動量は現地調査結果と近似していること等があげられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大規模な崩壊を起こした際に社会的な影響の大きい「特定道路土工構造物」は、5年に1度を目処に点検することが定められている。本研究では、地球観測衛星に搭載された合成開口レーダーを使って長大法面の変位量を精度よく推定する手法について検討し、定期的な実施した現地調査結果から、合成開口レーダーは点検における一次スクリーニングに利用できる可能性を見出した。

研究成果の概要（英文）：The Advanced Land Observing Satellite-2 (ALOS-2, "DAICHI-2") is a follow-on mission from the ALOS Daichi". Phased Array L-Band Synthetic Aperture Radar -2 (PALSAR-2) aboard ALOS-2 enables land observation rain or shine and day or night. Our research demonstrates the potential of PALSAR-2 to estimate the displacement of reinforced slopes in the southern part of Chiba Prefecture, which was selected as the study site, and validated the method through a field survey. The mainly results of this study include that there are the geometric characteristics of reinforced slopes that can be observed from PALSAR-2 and the displacement estimated from PALSAR-2 approximates to the results of field survey.

研究分野：空間情報工学

キーワード：L-band SAR 干渉SAR 三次元レーザースキャナ ネットワーク型RTK-GNSS 電子基準点 空間内挿

1. 研究開始当初の背景

(1) 学術的背景

日本では地球観測衛星搭載型の L-band SAR（マイクロ波の波長が約 24cm の合成開口レーダー）として、JERS-1/SAR（1992 年～1998 年）、ALOS/PALSAR（2006 年～2011 年）が運用され、現在は ALOS-2/PALSAR-2（2014 年～）が運用されている。広域が周期的に観測できる衛星 SAR は、空間分解能に制限はされるが無数に存在する土木構造物の面的な変位量を、天候に左右されず定期的に評価するためには有用である。近年、複数の SAR 画像を干渉させる事で、地表面の変動を高精度（mm 単位）に評価できるようになってきた。また、干渉 SAR の応用分野として土木構造物の維持管理に関する効率化・高精度化についても研究がされ始めている。

干渉 SAR は基本的に同じ場所を異なる時期に観測した 2 シーンの SAR 画像を使うが、(Persistent scatterer InSAR) PSInSAR や SBAS (Small Baseline Subset) と呼ばれる約 20 シーン以上の SAR 画像をデータセットとして干渉処理する方法により、2 シーンの SAR 画像よりも高精度に地表面の変動が評価できるようになってきた。しかしながら、PS-InSAR や SBAS は約 20 シーン以上の SAR データセットがなければ解析する事が難しく、高精度に地表面の長期変動が評価できる一方で、アーカイブデータが少ない地域の定期的なモニタリングには不向きである。

(2) 学術的な「問い」

衛星で観測できる土木構造物としては、ダム、河川堤防、鉄道、法面、港湾、橋梁等があるが、全ての構造物について干渉 SAR から評価できるのかについては明らかになっていない。現状では、ダム、河川堤防については既に研究が行われている。鉄道は河川堤防と同様な線状建築物であり、港湾施設（防潮堤や港）は比較的ダムと同様な傾向を示すと考えられる。また、橋梁は常時振動を許容する構造物であり、干渉 SAR から評価できる変位量との区別をつけるのは困難であると思われる。一方、法面は斜面崩壊地等に建設された構造物で、様々な形状を持ち、斜面の向きによっても L-band SAR の後方散乱が異なる事が予想されるため、個別に評価が必要な構造物である。よって、法面が干渉 SAR によって変位量の推定できるのかを 1 つ目の学術的な「問い」とする。

SBAS では約 20 シーン以上の SAR データセットから基線長の短い（衛星軌道が近い）組み合わせの干渉ペアを全て利用するのが一般的であるが、全ての干渉ペアを利用しなくとも、ALOS/PALSAR を利用した SBAS によって高精度に地盤変動が推定できる事を示した事例もある。SBAS は 20 シーン以下の少ないデータセットでも利用できれば、アーカイブデータが少ない地域でも適用が可能である。よって、SBAS を改良した手法を考案すれば、20 シーン以下のデータセットでも地表面の変動が評価できるかを 2 つ目の学術的な「問い」とする。

2. 研究の目的

上述の学術的な「問い」を解決し、学術的な発展性をもたらす事を本研究の目的とする。法面は一つとして同じ斜面に施工されておらず、形状も擁壁で覆われたものやコンクリートブロックと植生で覆われたものなど様々であるため、個別に干渉 SAR が適用できるのか検証する必要がある。干渉 SAR を実行するためには、干渉ペアのコヒーレンスが安定している（干渉性が良好である）事が条件であるため、安定したコヒーレンス示す法面の形状や斜面の向きに関する知見を考察すべきである。また、SBAS を改良し、これまでより利用しやすくなれば適用可能な地物が広がるとと思われる。SBAS を土木構造物の定期的な点検に使用するためには、利用しやすい実用的な解析方法を考案すべきである。

3. 研究の方法

(1) 現地調査

現地調査では、千葉県南部を現地調査地点に絞り込み、千葉県に対する本研究の協力要請に関する打ち合わせを行った後、現地踏査ならびに現地調査地点とした長大法面を管轄する道路管理機関との調整を経て、全 10 箇所 of 長大法面の現地調査を実施することとした。また、長大法面の現況を把握するために、現地調査地点において、三次元レーザースキャナを利用した三次元計測、ネットワーク型 RTK-GNSS 測量による地理座標の観測、およびトータルステーション (TS) による長大法面の実測を行うこととした。基本的には、三次元レーザースキャナによって取得した三次元点群データを時系列にアーカイブしていけば、現地調査地点の変位量を推定することができる。しかしながら、ネットワーク型 RTK-GNSS 測量によって特定地点の地理座標が得られなければ、3D ヘルムート変換によって三次元点群データ全体を地理座標系に変換することができない。また、TS による観測値がなければ、三次元点群データそのものの幾何学的な精度を検証することができないため、上述の現地調査を実施することとなった。

(2) 画像解析

ALOS-2/PALSAR-2 データセットを利用した InSAR 解析では、千葉県南部を観測した北向軌道（アセンディング軌道）および南向軌道（ディセンディング軌道）の干渉ペアを選定し、衛星視線方向（LOS）における地盤変動量を解析することとした。LOS の数値と現地調査で得られた三次元点群データの変位量とを比較することで、ALOS-2/PALSAR-2 によって長大法面の変動量が推定できる。また、InSAR 解析の結果が直接的に地物からの変位量を推定できているかを調べるため、長大法面の幾何学的な特性と ALOS-2/PALSAR-2 の電波照射方向との関係性についても解析することとした。

ALOS-2/PALSAR-2 から把握した地盤変動量は長大法面自体の変位量に加えて、地殻変動量も含まれていると考えられる。よって、長大法面自体の変位量は、理論的に式(1)によって推定できると思われる。

$$\Delta D_{LOS} = \Delta D_{cm} + \Delta D_{rs} \quad (1)$$

ここで、 ΔD_{LOS} : InSAR 解析によって得られる地盤変動量（LOS の数値）、 ΔD_{cm} : 長大法面が位置する場所の地殻変動量、 ΔD_{rs} : 長大法面自体の変位量である。本研究では、長大法面が位置する場所の地殻変動量を計算するために、InSAR 解析に選定した干渉ペアと同時期に観測された電子基準点のデータを空間内挿し、地殻変動量について解析をすることとした。電子基準点は高密度には配置されていないため、空間内挿した地殻変動量は必ずしも正確とは限らないが、空間内挿の方法を現地調査で実施するネットワーク型 RTK-GNSS 測定の成果と比較することで、その妥当性について検証することとした。

通常の SBAS では、複数の InSAR 解析結果を最小二乗法の理論によって地盤変動量を mm/year の単位で推定するが、この数値は当然ながら厳密解ではない。ついては、これに現地調査結果を補正值として利用する、改良型 SBAS を考案し、その実測値に対する精度を評価することとした。

4. 研究成果

(1) 現地調査

2018 年度は、図 1 に示す全 10 箇所の現地調査地点において、三次元レーザースキャナを利用した三次元計測、ネットワーク型 RTK-GNSS 測量による地理座標の観測、およびトータルステーションによる長大法面の実測を行い、現況を把握した。2018 年度の調査結果は、それ以降に実施する現地調査の初期値とすることとした。2019 年度も同様な調査を実施したが、2020 年度は新型コロナウイルスの影響により現地調査を実施することができなかった。また、2021 年度においても新型コロナウイルスの影響により、現地調査の日程や調査に充てる人数を制限せざるを得ない状況であったため、ネットワーク型 RTK-GNSS 測量による地理座標の観測は全 10 箇所の現地調査地点で実施することができたが、三次元レーザースキャナを利用した三次元計測は 4 箇所（図 1 の No. 1、No. 4、No. 6 および No. 7）の現地調査地点のみとなった。

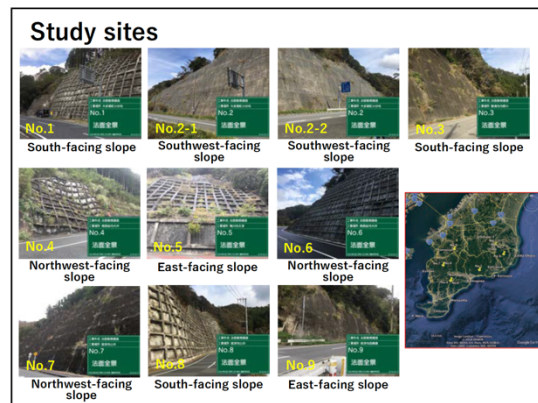


図 1 現地調査地点
(研究対象とした長大法面)

(2) 画像解析

InSAR 解析の結果が直接的に地物からの変位量を推定できているかを調べるため、長大法面の幾何学的な特性と ALOS-2/PALSAR-2 の電波照射方向との関係性について解析をした。この解析では、現地調査で把握した長大法面の方位角や傾斜度に基づいて、ALOS-2/PALSAR-2 の局所入射角との関係性を分析するとともに、10m メッシュの数値標高モデルを用いて ALOS-2/PALSAR-2 のレイオーバ・レーダーシャドウとなる領域をシミュレーションして、研究対象地が直接的に観測できているかを確認した。この解析には、国土地理院発行の 10m メッシュ数値標高モデルを使用した（図 2）。表 1 に示す ALOS-2/PALSAR-2 のアセンディング軌道のデータセットとディセンディング軌道のデータセットを用意し、幾何学的な特性が異なる 3 箇所（図 1 の No. 4 : 北西面の長大法面、No. 5 : 南東面の長大法面、No. 9 : 東面の長

表 1 InSAR 解析に用いたデータセット
(ALOS-2/PALSAR-2 アセンディング軌道およびディセンディング軌道)

InSAR analysis pair observed by ALOS-2/PALSAR-2, acquired in the stripmap mode and ascending orbit. The off-nadir angle for each PALSAR-2 image is 35.9°.				InSAR analysis pair observed by ALOS-2/PALSAR-2, acquired in the stripmap mode and descending orbit. The off-nadir angle for each PALSAR-2 image is 32.8°.					
Case	Observation date (Primary)	Observation date (Secondary)	Perpendicular Baseline (m)	Elapsed Days	Case	Observation date (Primary)	Observation date (Secondary)	Perpendicular Baseline (m)	Elapsed Days
As1	Feb. 11, 2018		5.688	336	Ds1	Nov. 15, 2018		-164.621	616
As2	March 10, 2019		-219.446	728	Ds2	March 7, 2019		281.616	728
As3	March 12, 2017	Dec. 3, 2019	207.402	994	Ds3	March 9, 2017	Nov. 14, 2019	-367.618	980
As4		March 8, 2020	-20.362	1092	Ds4		March 5, 2020	267.565	1092
As5		June 14, 2020	177.011	1190	Ds5		Nov. 12, 2020	-191.197	1344

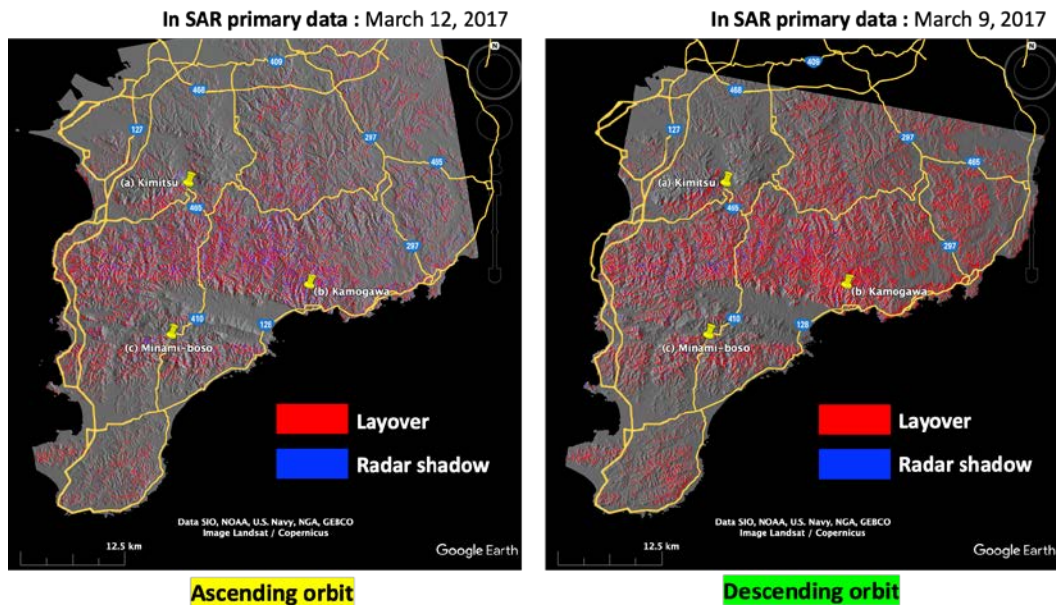


図2 レイオーバー・レーダーシャドウのシミュレーション結果
(ALOS-2/PALSAR-2 アセンディング軌道およびディセンディング軌道)

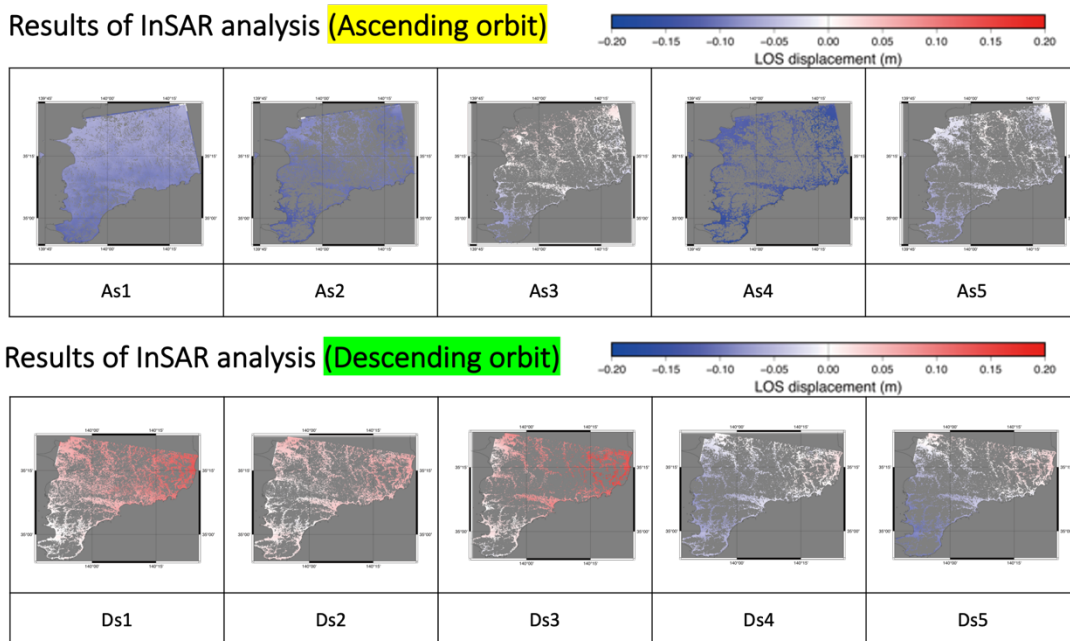


図3 InSAR 解析結果
(ALOS-2/PALSAR-2 アセンディング軌道およびディセンディング軌道)

大法面) と局所入射角 (LIA : Local Incidence Angle) との関係から、InSAR 解析によって直接的に観測できる長大法面とそうではない長大法面が存在することを明らかにすることができた。また、図3は表1に示すデータセットの InSAR 解析結果 (LOS の数値) である。この結果より、表1に示す ALOS-2/PALSAR-2 データセットの場合、局所入射角と現地調査で把握した長大法面の幾何学的な特性から、No. 4ではアセンディング軌道の LIA : 13° 、ディセンディング軌道の LIA : 89° であった。No. 5ではアセンディング軌道の LIA : 86° 、ディセンディング軌道でレイオーバーが発生するため直接観測できないことがわかった。また、No. 9ではアセンディング軌道でレーダーシャドウ、ディセンディング軌道でレイオーバーが発生するため直接観測できないことがわかった。図2は、コヒーレンス値が0.2以上の干渉部分から位相アンラッピングした画像から、No. 4、No. 5、No. 9の地点の LOS の数値を縦軸に、InSAR ペアの経過日数を横軸にしたグラフである。No. 4、No. 5においては、ともにアセンディング軌道 (LIA が大きい状態) で概ね LOS が抽出できており、反対に LIA が小さいディセンディング軌道では LOS が抽出できなかった。No. 9においては、レイオーバーとなるディセンディング軌道で LOS が抽出できることがわかった。よって、局所入射角が大きな長大法面や直接的に ALOS-2/PALSAR-2 で観測が不可能な長

大法面でも

InSAR 解析が可能であると言える。これは、長大法面の近くに恒久的な散乱点 (PS 点) が存在するためと思われるが、ALOS-2/PALSAR-2 から直接的に長大法面が観測できなくても、

InSAR 解析によってその周辺の変位量は推定できることを示唆している。

干渉ペアと同時期に観測された電子基準点のデータをグリーン関数スプラインによって空間内挿し、地殻変動量について解析をした。グリーン関数スプラインは、国土地理院 (引用文献①) がジオイドモデルを作成する際にも利用しており、スプライン補間する際に現れる不必要な発振を押さえる効果があるとされており、ノイズの低減が期待できる。なお、グリーン関数には Minimum curvature spline (MC), Continuous curvature spline in tension (CC), Bilinear spline (BL), Regularized spline intension (R), Minimum curvature spline for spherical surface (MCSS), Continuous curvature spline in tension for spherical surface (CCSS) という、6 種類のスプラインが選択できるため、それぞれの比較検討を行なった。空間内挿の精度検証には、現地調査においてネットワーク型 RTK-GNSS 測量で取得した地理座標を利用し、結果として CCSS が最も誤差を小さくできることを見出した。

改良型 SBAS については、図 4 に示した LOS のグラフに、ネットワーク型 RTK-GNSS 測量成果を LOS と同じベクトル方向に変換して補正值として加える手法を考案した。しかしながら、2018 年度から 2021 年度という数年のスパンでは長大法面自体の変位量を推定することは、難しいと思われる。現地調査で取得した三次元点群データの解析結果からもその変位量は僅かであり、ネットワーク型 RTK-GNSS 測量成果自体にも誤差は含まれるため、現時点では十分な精度検証ができたとは言いがたい。よって、改良型 SBAS については、今後も継続して研究を行うこととした。

(3) 総括

本研究では、多時期の ALOS-2/PALSAR-2 を利用し、長大法面の変位量推定が可能かどうか検討した。SAR の観測特性により、特に山岳地帯における長大法面は必ずしも直接観測が可能ではないものもあるが、InSAR 解析ではターゲットの周辺にコヒーレンスが安定している PS 点があれば、長大法面付近の地盤変動量を推定できる。この結果より、InSAR 解析は、日本国内に無数に存在する長大法面のうち、特定土工点検 (引用文献②) の対象となる構造物の一次スクリーニングとして利用できると思われる。特定土工点検は目視点検が基本であるため、地球観測衛星は目視点検が実施される合間でも定期的なモニタリングが可能である。よって、多時期の L-Band SAR を解析し続ければ、一次スクリーニングの段階で大きな問題となり得る長大法面を抽出することも可能であるため、本研究は法定点検の効率化に寄与できる成果が得られたと結論づけられる。今後は、特定土工点検への利用について L-Band SAR によるモニタリングを継続し、目視点検への UAV やレーザスキャナ等の新技術の適用性について検討することで、地球観測から地上での点検への一連の流れを研究し、インフラ点検の効率化について検証すべきである。

<引用文献>

- ① 兒玉篤郎・宮原伐折羅・河和宏・根本悟：ジオイド・モデル「日本のジオイド 2011」(Ver. 1) の構築, 国土地理院時報, No. 126, pp. 67-85, 2014.
- ② 国土交通省道路局国道・技術課：道路土工構造物点検要領, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/tenken-yoryo_201806.pdf, 2018.

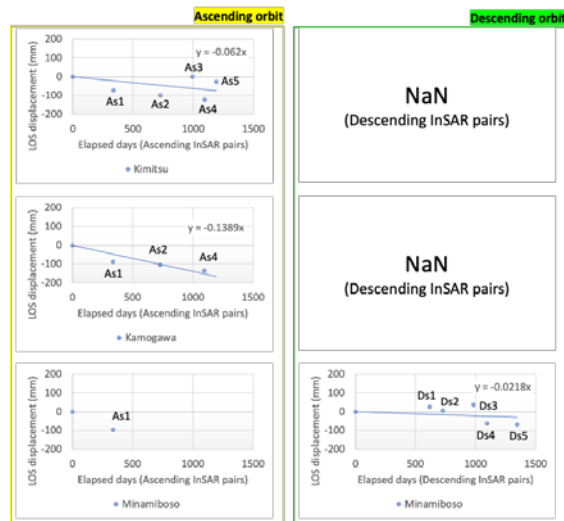


図 4 InSAR 解析結果
(ALOS-2/PALSAR-2 アセンディング軌道およびディセンディング軌道)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 朝香 智仁, 野中 崇志	4. 巻 31
2. 論文標題 ALOS-2/PALSAR-2による道路法面の変位量推定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 応用測量論文集	6. 最初と最後の頁 25-33
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Tomohito Asaka; Takashi Nonaka; Keishi Iwashita; Sadayoshi Aoyama; Toshiro Sugimura
2. 発表標題 Evaluation of Reinforced Slope Dynamics using ALOS-2/PALSAR-2
3. 学会等名 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 朝香智仁、野中崇志
2. 発表標題 ALOS-2/PALSAR-2データを用いた道路法面のモニタリングに関する一考察
3. 学会等名 土木学会 第46回関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohito Asaka; Takashi Nonaka; Keishi Iwashita; Yuki Uchida; Toshiro Sugimura
2. 発表標題 Estimation of Reinforced Slope Dynamics Using ALOS-2/ PALSAR-2 and Validation by Terrestrial Laser Scanner
3. 学会等名 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中 政嗣、朝香 智仁、杉村 俊郎、野中 崇志
2. 発表標題 地上型レーザスキャナを用いた道路法面の動態調査に関する研究
3. 学会等名 土木学会 全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朝香智仁、田中政嗣、野中崇志、杉村俊郎、岩下圭之
2. 発表標題 特定土工点検を目的としたTLSとUAVの三次元点群データの比較
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会 第71回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohito Asaka, Takashi Nonaka
2. 発表標題 Geometric Condition of Reinforced Slopes for InSAR Analysis using ALOS-2/PALSAR-2 Data
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	野中 崇志	日本大学・生産工学部・教授	
	(NONAKA Takashi)		
	(20556336)	(32665)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------