# 降下火砕堆積物からなる自然斜面の合成開口レーダーによる 危険度評価システムの開発

室蘭工業大学大学院	工学研究科	]][	村	志	麻	
室蘭工業大学大学院	工学研究科	泉		佑	太	

# 降下火砕堆積物からなる自然斜面の合成開ロレーダーによる 危険度評価システムの開発

Development of risk assessment system using synthetic aperture radar (SAR) for natural slopes consisting of pyroclastic fall deposits

## 川村 志麻<sup>1</sup>・泉 佑太<sup>2</sup> Shima KAWAMURA, Yuta IZUMI

<sup>1</sup>室蘭工業大学大学院 工学研究科 教授 <sup>2</sup>室蘭工業大学大学院 工学研究科 助教

## 要旨

平成30年北海道胆振東部地震では,厚真町を中心に多くの斜面崩壊が発生し 甚大な被害が生じた.この斜面崩壊の一因として堆積している降下火山灰質土 の存在とその特異性が指摘されている.本研究では,道央圏に広く分布してい る降下火砕堆積物からなる斜面の自然外力よる危険度評価手法並びに斜面崩壊 で発生する土砂流出量推定のための手法を開発する.はじめに,自然斜面を構 成する降下火砕堆積物の特異性を把握し,それらが斜面崩壊の安定性および流 動性に与える影響と,合成開ロレーダーの情報から得られた斜面内の水分量, 地表面変位量に基いて,広域斜面崩壊危険度評価法の確立を目指す.本報告で は,厚真町日高幌内川流域にある自然斜面の現地調査ならびに計測機器を設置 し,土質力学特性,間隙水圧挙動,土壌水分特性を把握した.また合成開ロレ ーダーを用いた土壌水分特性把握のための基本情報を整理した.

≪キーワード:降下火砕堆積物;間隙水圧;土壌水分;合成開口レーダー;危険度 評価≫

#### 1. はじめに

平成30年北海道胆振東部地震では、厚真町を中心に多くの斜面崩壊が発生し甚大な被害が生じた<sup>1</sup>. この斜面崩壊の一因として、堆積している降下火山灰質土の存在とその特異性が指摘されている.本研 究では、道央圏に広く分布している降下火砕堆積物からなる斜面の自然外力よる危険度評価手法並びに 斜面崩壊で発生する土砂流出量推定のための手法を開発する.はじめに、自然斜面を構成する降下火砕 堆積物の特異性を把握し、それらが斜面崩壊の安定性および流動性に与える影響と、合成開ロレーダー の情報から得られた斜面内の水分量、地表面変位量に基いて、広域斜面崩壊危険度評価法の確立を目指 す.

本報告では、厚真町日高幌内川流域にある自然斜面の現地調査,室内試験を実施し、その土質力学特 性を明らかにした.また土壌水分計,間隙水圧計などの各種計測機器を設置し、気象の変化に伴う間隙 水圧挙動,土壌水分量の変化を把握した.また、合成開口レーダーを用いた土壌水分特性把握のための 基本情報を整理した.

#### 2. 調査地点および試料特性

本研究では、北海道勇払郡厚真町幌内の日高幌 内川周辺において、樽前山から9000年前に噴出し たとされる樽前降下火砕堆積物(Ta-d)を対象に, 現地調査, 土質試験を実施した. 調査地点を図-1 に示す. なお, 不かく乱試料についてはシンウォ ールサンプリングで採取した. 採取地点の露頭の 様子と土柱図を図-2と図-3に示す.図-3に示すよ うに、日高幌内川上流部では、露頭表面から深部 方向に80cm~135cm地点に①Ta-d赤褐色層(以降 Ta-d PRと称す)、135cm~140cm地点に②Ta-d細 粒軽石層(以降Ta-d VY), 140cm~180cm地点に ③Ta-d軽石層(以降Ta-d PG)が確認されている. それぞれの層の特徴として、Ta-d VY層は粘土化 した漸移層とされている細粒の軽石層, Ta-d PG 層は多孔質な軽石で構成されている. それらの試 料は、いずれも指でつぶせるほど脆弱であった. また、調査時点では、Ta-d VY層とTa-d PG層は かなり湿潤状態の高い状況であり, ハロイサイト のような粘土鉱物の含有が確認されている<sup>2)3)4)</sup>. 特に、VY層でのハロイサイト含有率は高く、風 化が進行し粘土化しているような状態である.



図-1 本研究における調査地点



図-2 調査地点の露頭の様子

#### 3. Ta-dの物理特性

はじめに、Ta-dの物理的性質を表-1に粒径加積 曲線を図-4に示す. 粒径加積曲線には北海道内の 火山灰質土である中標津火山灰質土、森火山灰質 土, 富川火山灰質土のデータを併記している. 中 標津火山灰質土は道東の中標津町武佐で採取され た摩周火山噴出物で1.1~1.3万年前に噴出したも のである. 森火山灰質土は駒ケ岳を噴出源とする 火山灰質土で1640年の噴火による降下堆積物であ る. 富川火山灰質土は日高町富川で採取された火 山灰質土であり,支笏カルデラを噴出源とする支 笏第一テフラに属している. その噴出年代は3.1 ~3.4万年前と推定されている. 中標津火山灰質 土, 森火山灰質土, 富川火山灰質土の詳細につい ては既報に詳しい5)677.

図-4より、Ta-d PR、PGの粒度分布は中標津火 山灰質土のものと粒径が類似しており、また富川 火山灰質土との比較では粗粒であることが確認で きる. また, Ta-d PR, PGの細粒分(75um以下)



図-3 調査地点の土柱図



日高幌内川流域にあるTa-d 物理特性 表-1

含有率Fcは中標津火山灰質土, 森火山灰質土, 富川火山灰質土のものと同様, 2%以下と少ない. 一方, Ta-d VYの細粒分含有率は約10%であった.また、VYはPR、PGと比較して全体的に粒径が小さいこと が確認できる.

#### 4. 実施した物理力学試験と試験結果

本報告では、はじめにTa-d PR試料を対象に、各種試験を実施した結果について述べる。各試験方法 と結果を以下に示す.

## 4.1. 一次元圧密試験

直径60mmの凍結シンウォールサンプリング による試料を高さ20mmに整形し,24時間放置 し飽和状態にしたもの(①不かく乱試料)と, 原位置密度を目標に,空中落下法により作製し た供試体を24時間飽和させたもの(②かく乱試 料(再構成試料))2種類の試料を用いて,地盤 工学会基準に従って標準圧密試験(地盤工学会 基準:JGS0411)を行った.

図-5に各試料の間隙比eと圧密圧力pの関係を 示す. 圧密降伏応力p<sub>c</sub>は, ①かく乱試料では 101.0kPa, ②不かく乱試料では59.8kPaとなった. 三浦ら<sup>®</sup>によると, 中標津火山灰質土の再構成 試料のp<sub>c</sub>は110kPaであり, Ta-dの再構成試料も 同程度であることが分かる.

## 4.2. 圧密排水三軸圧縮試験(CD試験)と圧 密非排水試験(CUB試験)

次に、圧密排水三軸試験(CD試験)と圧密 非排水三軸圧縮試験(CUB試験)を行った.各 供試体(直径70mm,高さ170mm)は、多重ふ るい落下法(MSP法)により作製されており、 CDおよびCUB試験の圧密後の相対密度 $D_{rc}$ は 104~118%である.なお、相対密度は、砂の最 大・最小乾燥密度試験により求め、三軸試験に 用いた試料粒径を用いて算出している.それぞ れ $\rho_{dmax}$ =0.472g/cm<sup>3</sup>、 $\rho_{dmin}$ =0.269g/cm<sup>3</sup>である. なお、シンウォールサンプリング時の原位置の 乾燥密度は0.440g/cm<sup>3</sup>であった.試験での有効 拘束圧は $\sigma_c$ '=49kPa、98kPa、196kPaであり、間 隙圧係数B値は0.96以上、せん断速度は0.25%/ minである.各供試体の飽和化にはCO<sub>2</sub>法を用 いた.

図-6に圧密非排水三軸試験(CUB試験)と圧 密排水試験(CD試験)から得られた最大,最 小主応力比(=σ<sub>1</sub>'/σ<sub>3</sub>')と最大,最小主ひずみ (=ε<sub>1</sub>,ε<sub>3</sub>)の関係を示す.比較のため,森火山 灰質土,富川火山灰質土,中標津火山灰質土の 試験結果を併記している.はじめにCUB試験 について述べる.図より,強度-変形特性は密 な砂が示す硬化-軟化型の挙動と類似している ことが確認できる.また最大,最小主応力比は



図-6 CUB試験(上), CD試験(下)の最大, 最 小主応力比と最大, 最小主ひずみの関係

密度の違いがあり、正確な比較はできないものの、その強度比は、富川火山灰質土や中標津火山灰質土よりも低く、森火山灰質土より高い値を示すようである。一方、CD試験ではTa-dの主応力比は森火山 灰質土や富川火山灰質土よりも低く中標津火山灰質土と同程度の値を示していることが確認できる。このような排水条件の違いによる力学挙動の変化は、破壊時の平均有効主応力の違いに起因する粒子破砕量に起因して生じたものであろう。結果として、せん断強度パラメータは、それぞれc'=8kPa と $\phi'$ =42.5deg.,cd=33.0 kPa と $\phi_d$ = 29.0deg.になった。

#### 4.3. 一面せん断試験

次に、不かく乱、かく乱試料および乾湿の違いによる影響を把握するため、定圧一面せん断試験を実施した.使用した試料は前述の通り、 ①不かく乱試料、密度、含水比を原位置のものに調整し(原位置密度、自然含水比は表-1に示す)、整形した②湿潤試料および③乾燥試料の計3試料を用いて、圧密圧力49kPa、98kPa、147kPaの下で定圧一面せん断試験を実施した(地盤工学会基準:JGS0560).

表-2に各試料の試験結果から得られた強度パ ラメータを示す. $\phi$ は拘束圧依存性を調べるた めに、粘着力c=0として、原点から、各圧密応 力より得られた最大せん断応力まで割線を引 き、各せん断抵抗角を算出したものである.ま た、 $\phi_a$ およびcdは破壊包絡線から求めた.

## 4.4. Ta-dの粒子破砕特性について

ここまで,各力学試験を実施し,日高幌内川 周辺に分布するTa-dの力学特性について整理し てきた.ここでは,各応力場での粒子破砕性の 違いについての評価を行った.各試験での応力 状態を模式図として図-7に示す.三浦ら<sup>5</sup>は火

		Ta-d PR					
不かく乱試料	p(kPa)	49	98	147			
	\$\phi\$ (deg)	52.1	41.3	35.3			
	$\phi_d(\text{deg})$	22.1					
	c (kPa)	44.85					
湿潤試料	p(kPa)	49	98	147			
	$\phi$ (deg)	52.6	38.0	37.1			
	$\phi_d(\text{deg})$	25.7					
	<i>c</i> (kPa)	36.81					
乾燥試料 ∽	p(kPa)	49	98	147			
	\$\phi\$ (deg)	52.5	43.2	38.2			
	$\phi_d(\text{deg})$	27.9					
	c (kPa)	38.71					



#### 図-7 本試験の応力状態と各種パラメータ

山灰質土の粒子破砕の指標として細粒分(75µm以下)増加量 $\Delta$ Fcを提案しており、本論文においても、細粒分増加率 $\Delta$ Fcを粒子破砕の指標として整理した.なお、用いたパラメータとして、平均有効主応力 はp<sub>f</sub>'= ( $\sigma_1$ +2 $\sigma_3$ )/3により算出しており、一面せん断試験、圧密試験ともに、 $\sigma_3$ =K<sub>0</sub> $\sigma_1$ として評価した( $\sigma_1$ : 最大主応力、 $\sigma_3$ :最小主応力、K<sub>0</sub>=0.5とした).

表-2 一面せん断強度パラメータ



▲中標津火山灰質土 ■ 富川火山灰質土 ◆森火山灰質土 + 柏原火山灰質土 - 美々火山灰質土 ● Ta-d

図−8せん断抵抗角φと平均主応力p<sub>f</sub>の関係

図-9細粒分増加率ΔFcと平均主応力p<sub>f</sub>の関係

#### 4.4.1. せん断・圧密による粒子破砕の比較

ここでは、北海道に分布する火山灰質粗粒土のせん断に伴う粒子破砕特性とTa-dの圧密・せん断による粒子破砕の比較を、細粒分増加率 $\Delta$ Fcを用いて行った. 図-8に既往の報告<sup>5007</sup>にある北海道の主な火山 灰質粗粒土のせん断抵抗角と破壊時の平均有効主応力 $p_f$ の関係を、図-9には細粒分増加率 $\Delta$ Fcと破壊時 の平均主応力 $p_f$ の関係を、本研究での試験結果を加筆して示している.また、図-8における $\phi_d$ は、上述 した一面せん断試験、CD試験で得られた強度パラメータであり、 $\phi$ はCUB試験で得られた強度パラメ ータを示している. 表-1に示すように、採取した試料は液性・塑性限界試験結果から非塑性(N.P.)と なっていることから、ここでは*c*'=0としてせん断抵抗角 $\phi$ 'を算出した.

図-8から分かるように、Ta-dは北海道に分布する火山灰質土の中でもせん断抵抗角が急激に低下して おり、低応力場でも強度低下を示していることが明らかである。例えば、p<sub>f</sub>'=100kPaからp<sub>f</sub>'=316kPaでせ ん断抵抗角が15 deg.の低下を示している。同様に、細粒分増加率と破壊時の平均主応力の関係(図-9を 確認すると、p<sub>f</sub>'=100kPaまでは、中標津火山灰質土と同程度の勾配を示し、p<sub>f</sub>が増加すると、中標津火 山灰質土と富川火山灰質土のおおよそ中間程度の破砕特性を示すことがわかる。これらの結果から、 Ta-dはp<sub>f</sub>'の増加に伴い粒子破砕が卓越し、せん断

強度の低下が著しいことが明らかとなった.

次にTa-dのせん断過程と圧密過程における粒子 破砕特性の比較行った,図-10は標準圧密試験と 各載荷段階(49,98,196,392,784,980, 1256kPa)ごとに24時間の圧密を行い,それらの 細粒分増加率 $\Delta$ Fcと $p_f$ の関係を,また,図-9にお けるTa-dのせん断過程での細粒分増加率 $\Delta$ Fcの関 係も併記している.図よりTa-dの圧密における粒 子破砕量は,せん断における粒子破砕と比較して 小さいことが確認できる.また,圧密過程では圧 密応力が1256kPa( $p_f$ =837kPa)で急激に粒子破砕 が卓越していることも確認できる.



このことから, 圧密過程と比較して, せん断による粒子破砕は低応力での段階から卓越しており, 2 つの応力場では, 特にせん断による粒子破砕への寄与度が高いことが明らかにされた.

#### 4.4.2. 乾燥・湿潤条件における粒子破砕特性の比較

火山灰質土起源のロームでは土粒子中の保水状態が変化することで、サクション由来の強度特性が変 化することが知られている<sup>®</sup>.本試料においても、簡易的に、湿潤状態の試料と乾燥状態の試料につい ての試験結果を比較し、粒子破砕特性に及ぼす影響を調べた.ここでは、Ta-d PR、VY、PGの3試料に ついて、強度と粒子破砕の比較を行った.試料の作製方法は前述した一面せん断試験と同じ方法である が、湿潤状態は含水比がそれぞれPR 144.6%、VY 190.9%、PG 147.4%であり、その時のサクションは、 大凡、PR -100kPa、VY -15kPa、PG -1.5kPaとなる<sup>3)</sup>.図-11に各試料の湿潤状態と乾燥状態における、 せん断抵抗角φと破壊時の平均主応力p<sup>r</sup>の関係を、図-12に細粒分の増加率ΔFcと破壊時の平均有効主応 力pfの関係を示す.図-11からPR、VY試料ではp<sup>r</sup>=75kPaにおける湿潤試料と乾燥試料との強度差が大き く、PGでは全体的に差が生じないことが確認できる.同様に、図-12においてもPR、VYは乾燥試料に 比べ、湿潤試料の細粒分増加率が大きく、PGは湿潤試料、乾燥試料とも変化がないことが確認できる. 特にVYの湿潤状態と乾燥状態での粒子破砕率の差は、PR、PGと比較しても顕著である.

これらのことから、同じTa-d層であっても風化の違いによって強度、粒子破砕量の程度は異なるものの、すべての試料において湿潤状態の試料の脆弱化は明らかとなった.この湿潤状態での強度低下についての理由は明らかとなっていない. 今後は土粒子の空隙構造とメニスカスの影響などを明らかにする予定である.



図−11 湿潤試料, 乾燥試料の せん断抵抗角φと平均有効主応力p<sub>f</sub>の関係



図-12 湿潤試料, 乾燥試料の細粒分含有率△Fcと平均有効主応力p<sub>f</sub>の関係

## 5. 樽前降下火砕堆積物からなる自然斜面の現地計測結果

ここでは、本調査地点にある樽前降下火砕堆 積物(Ta-d)からなる自然斜面において、現地 調査と土壌雨量指数から胆振東部地震発災当時 の水分特性の特徴を推測し、災害当時の崩壊現 象について考察した.また、土壌水分の予測や 現地計測と合成開口レーダーによるデータの関 連性を調査し、簡易的な斜面状況を把握する方 法を模索する.

#### 5.1.現地調査地点の詳細と概要

図-13に調査地点の詳細図を示す.既往の報告<sup>3)</sup>では,日高幌内川流域の斜面において発生した表層崩壊はTa-d試料と同等の試料で構成されたとされる土層と泥岩の境界ですべり面が形成されていることが報告されている.この地点に各種計測機器を設置し,気象の変化にともなう斜面内挙動を把握した.

計測は、2020年10月13日から2023年12月まで 現在も継続して行っている.計測機器の種類 は、TDR方式の土壌水分計(1本)、テンシオメ ータ(1本)、温度計(1本)、地温計(3本),降雨計 (1個)、積雪計(1個)であり、斜面の様子とそれ らの計測機器の設置図を図-14と図-15に示す. 以下の項目で各計測器の概要を示す.

## 5.1.1.計測結果(間隙水圧の変化)

はじめに,発災当時の斜面内挙動を推測する ために,間隙水圧と日降雨量の3年間の経時変 化を示す(図-16)<sup>9</sup>.図に示すように,2020年 と2021年それぞれの9~11月の降雨量を確認す ると2021年の降雨量の方が明らかに多いことが 確認できる.この3か月で受けた総降雨量が多 ければ多いほど間隙水圧の上昇が急激になるの ではないかと推測される.また2021年,2022年, 2023年では6月ころから間隙水圧が低下,低下せ ず高い位置で維持の2パターンがあることがわ かる.

発災当時,間隙水圧が低下また高い位置で維持されていたかを考察するためには降雨量だけ ではなく,土壌の状態まで含めた土壌雨量指数 を採用し検討する.土壌雨量指数の算定方法は



図-13 調査地点の詳細



図-14 調査斜面の様子(日高幌内川流域)



図-15 計測機器と断面図

気象庁が発表している3段タンク貯 留モデルを使用した.今回の災害が 表層崩壊であったことから第1,2タ ンクの合計を土壌雨量指数として採 用した.

2018年,2022年,2023年の前年12 月から8月までの降雨量をもとに土 壌雨量指数を求め,間隙水圧と比較 したものが図-17と図-18になる.直 接の比較はできないものの,2018年 の土壌雨量指数は2022年の土壌雨量 指数と類似の傾向を示し,土壌雨量 指数から推測すると,2018年の間隙 水圧は2022年と同様の挙動を示した 可能性がある.また,両図から土壌 雨量指数が90程度に達すると一時的 に間隙水圧が増加しているため,こ の対象地域では指数値90程度が安定 性の評価の一つになると考えられ る.

#### 6. 合成開口レーダーによる解析

本解析ではSentinel-1の衛星が収 集したデータを使用した<sup>10)11)12)</sup>. Sentinel-1は回帰日数が12日,中心 周波数が5.405GHzのCバンド合成開 ロレーダーである.データは現地観 測を行っている期間内の2020年10月 24日から2023年9月15日の88個の SLCデータを使用した.画像生成の 手順を図-19に示す.

初めにラジオメトリックキャリブ レーションにより3種類の方法で単 位面積当たりのレーダー反射率に変 換する.その後,SARセンサーが持 つ側方監視の特性による影響を減ら すために放射値や幾何学的な歪みを 補正し,時系列データを作成する. これにより衛星から照射されたマイ クロ波の跳ね返りの強さの変化と土 壌水分の変化の関連性を調査した.





図-19 衛星データの処理フロー

## 6.1. 解析結果.

図-20に現地観測による土壌水分,降雨量 データと合成開口レーダーの解析による後方 散乱強度のデータの時系列変化を示した.今 回,積雪による後方散乱強度への影響を考慮 して積雪期のデータを除くこととする.結果 として,現地観測地点でのデータでは,相互 に深い関連性は見られなかった.原因として 斜面の補正,植生による影響が考えられる. しかし,現地観測地点付近の傾斜の少ない裸 地における後方散乱強度の時系列データ (図-21)からは現地データと類似のトレンド を示すことが確認できた.

今後,NDVI(正規化植生指数)を用いた植 生による後方散乱強度の補正を行うことで植 生の影響は軽減できると考える.また, DEMデータの解像度の改善によって斜面補 正の精度が向上すると考える.引き続き,衛 星データの処理内容の検討やGB-SARでの計 測も行う予定である.



図-21 現地観測による土壌水分,降雨量とSARの後 方散乱強度との関係図(現地観測地点付近)

## 7. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す.

- (1)標準圧密試験では、圧密降伏応力p<sub>c</sub>はかく乱試料で101.0kPa,不かく乱試料で59.8kPaとなった.摩 周を噴出源とする中標津火山灰質土と同程度の値を示す.
- (2)北海道に分布する主な火山灰質土とTa-dのせん断, 圧密過程における細粒分増加率を比較した結果, 三軸・一面せん断過程では、中標津火山灰質土と富川火山灰質土のおおよそ中間程度の破砕特性を 示す.また、Ta-dの圧密過程とせん断過程を比較すると、圧密時に比べ、せん断時の粒子破砕が卓 越する.
- (3) Ta-d PR, PG, VY試料の強度, 粒子破砕特性を比較した結果, 試料によって強度, 粒子破砕量の変化の程度は異なるものの, 湿潤状態における試料の脆弱化が確認された.
- (4) 土壌雨量指数の比較より、間隙水圧が維持しているのは夏季の土壌雨量指数がコンスタントに増加 していることが1つの条件として考えることができる.また、土壌雨量指数90という値が安定性の評 価の一つになると考えられる.
- (5)合成開口レーダーによる現地計測地点近くの後方散乱強度は現地計測データと近しいトレンドが見られた. 今後,現地計測地点での比較を行うには,斜面の補正,植生による影響等の改善が必要であるため, SARデータの処理内容の検討やGB-SAR(地上設置型)での計測も行う予定である.

#### 謝辞

本研究は、令和4年度(一財)北海道河川財団研究助成金とJSPS科研費JP20H02404の一部の助成で行われた.記して、深甚なる感謝の意を表します.

## 【参考文献】

- 1) 国土地理院:平成30年北海道胆振東部地震に関する情報,(http://www.gsi.go.jp/)
- 2) 川村季実佳,川村志麻,古賀匠:樽前降下火砕堆積物(Ta-d)の物理力学特性に及ぼす風化の影響 とその評価,地盤工学会北海道支部技術報告集,第61号,論文No.31,2021.2.
- K. Kawamura, S. Matsumura, S. Kawamura: Laboratory and field monitoring tests of volcanic soil (Ta-d) triggering landslides in the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, Geoenvironmental Disasters, 2024. (in press)
- 4) 村川龍介,川村志麻,川村季実佳,松村聡,後藤凜:樽前降下火砕堆積物の圧密・せん断に伴う粒 子破砕とその評価,地盤工学会北海道支部技術報告集,第64号,pp.111-118. (2024.1.25-26)
- 5) 三浦清一, 八木一善, 川村志麻:北海道火山灰粗粒度の静的および動的力学挙動と粒子破砕, 土木 学会論文集 No.547/Ⅲ-36, pp159-170, 1996.9.
- 6) 三浦清一,八木一善:火山灰質粒状体の圧密・せん断による粒子破砕とその評価,土木学会論文集, No.561/Ⅲ-38, pp257-269, 1997.3.
- 7) 八木一善, 三浦清一:破砕性を有する火山灰土の力学特性とその評価方法-北海道の火山灰地盤に おける検討-,応用地質,第44巻,第3号,142-153頁,2003.
- 8) 清原雄康,風間基樹,不飽和度ローム土のせん断挙動と水分特性の変化およびそのモデル化,土木 学会論文集, Vol67, No 3, 339-348, 2011
- 9) 石川凌,川村志麻,泉佑太:降下火砕堆積物からなる自然斜面の現地計測とSARによる挙動解析, 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会,III-124, 2024.09.
- 10) ASF Data Search, https://search.asf.alaska.edu (閲覧日:2023-11-20)
- 11) 大内和夫.リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎[第2版],東京電機大学出版局, 2009.
- Tutorials-STEP, https://step.esa.int/main/doc/tutorials/ (閲覧日:2023-12-1)