

2018 年北海道胆振東部地震における樽前 d 降下 火砕堆積物の定体積繰返し一面せん断特性

CYCLIC BEHAVIOR OF THE TARUMAI-D TEPHRA LAYERS BY CONSTANT
VOLUME DIRECT BOX SHEAR TESTS ON THE 2018 HOKKAIDO EASTERN
IBURI EARTHQUAKE

岡田 健杜¹・後藤 聡²

Kento OKADA and Satoshi GOTO

¹山梨大学大学院医工農学総合教育部 (修士課程) 工学専攻土木環境工学コース
(〒400-8511 山梨県甲府市武田四丁目 3-11)

E-mail: G20TC002@yamanashi.ac.jp

²山梨大学大学院総合研究部工学域土木環境工学系
(〒400-8511 山梨県甲府市武田四丁目 3-11)

E-mail: goto@yamanashi.ac.jp

Key Words: cyclic direct box shear tests, Tarumai-d tephra, tephra layer landslide,
The 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake

1. はじめに

2018 年 9 月 6 日に北海道胆振地方中東部を震源とする地震 (以下, 北海道胆振東部地震と呼ぶ) が発生した. この地震により, 北海道厚真町を中心に多数のテフラ層すべりが発生した (図-1)¹⁾. この地域では火山活動による多くの火砕物が堆積しており, 樽前火山から約 300 年前に飛来した樽前 a, b 降下火砕堆積物 (Ta-a, Ta-b), 同じく 3000 年前の樽前 c 降下火砕堆積物 (Ta-c), 同じく 9000 年前の樽前 d 降下火砕堆積物 (Ta-d)²⁾, さらに, 約 2 万年前の恵庭火山の恵庭 a 降下火砕堆積物 (En-a)³⁾, そして, 約 4 万年前の支笏カルデラの支笏降下火砕堆積物 1 (Spfa-1)⁴⁾から形成されている (図-2). なお, 図-2 の場所は中川ら⁵⁾から情報を得たうえで, 標準露頭として現地で撮影した.

ここで, テフラ層すべりとは, テフラ層 (火山活動によって噴出する火砕物の総称) をすべり面とする斜面崩壊と定義している.

千木良ら⁶⁾では 2018 年北海道胆振東部地震によって発生したテフラ層すべりの大部分は, 降下火砕物

の崩壊であり, 特定の地層がハロイサイト化し, そこにすべり面ができたものであった. 最も多かったのは 9000 年前の Ta-d と呼ばれる軽石層の基底部の細粒軽石層にすべり面を持つものであったと述べている.

笠間ら⁷⁾では, 熊本地震によって南阿蘇村高野台地区で発生したテフラ層すべりのすべり面とされる約 3 万年前の草千里ヶ浜降下軽石を対象に, せん断条件を変えた一面せん断試験を実施し, 平常時・地震時のせん断特性を明らかにするとともに, ニューマーク法を用いて繰返しせん断時における強度低下を考慮して地震時安定性を評価した.

王ら⁸⁾は, 北海道胆振東部地震によって厚真町吉野地区で発生したテフラ層すべりを対象に, すべり面とされる Ta-d 層の現場一面せん断試験を実施し, せん断特性を調べている.

Li et al.⁹⁾は, 北海道胆振東部地震によって厚真町桜丘地区で発生したテフラ層すべりを対象に, 粘土化した Ta-d の三軸試験で液状化強度を評価した.

テフラ層すべりのすべり面の発生機構を解明するためには, すべり面とされる Ta-d の土質力学的なせ

ん断特性を明らかにする必要がある。そこで本論文では、厚真町東和地区で採取した Ta-d を対象に、各種物理試験を行い、定体積繰返し一面せん断試験を実施した。

また、これまでに Ta-d 上および Ta-d 下を用いた定体積繰返し一面せん断試験を実施した^{10), 11)}が、その際せん断抵抗角が大きかったため、再実験を行いここに報告した。

2. 現地調査

本研究にあたり、現地調査を行った。調査地点は、図-1 に示す厚真町東和地区（以下、東和地区）で、実施日は、2019年9月14日～16日である。

東和地区における滑落崖の様子および層序・層厚を図-3 および図-4 にそれぞれ示す。上位より、クロボク、Ta-c、風化した Ta-d（以下、風化 Ta-d）、Ta-d 上部（以下、Ta-d 上）、Ta-d 下部（以下、Ta-d

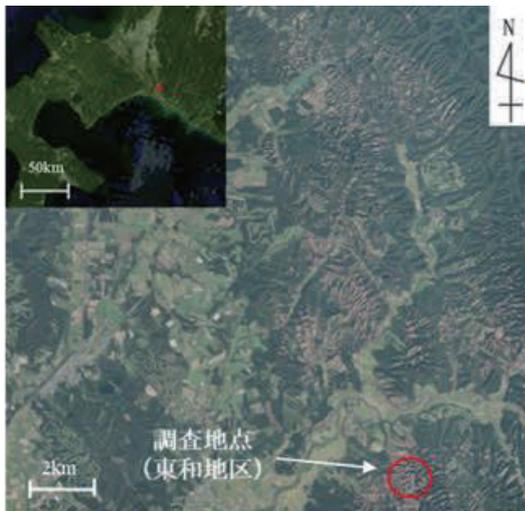


図-1 厚真町などで発生したテフラ層すべり¹⁾

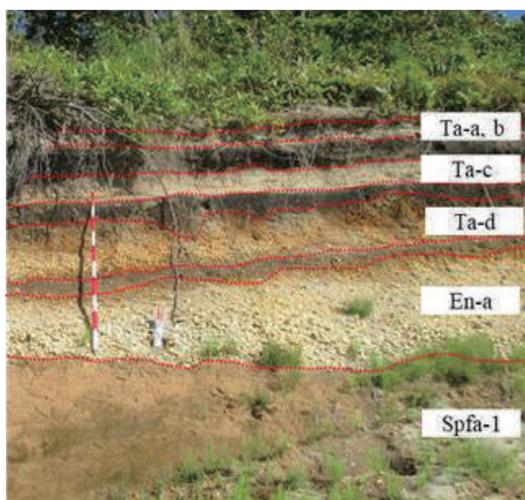


図-2 厚真町で堆積している主なテフラ層

下)、ロームが堆積していた。ロームについては、En-a ではないことを確認した。すべり面は現場の観察より地表からおよそ 2m の Ta-d 下と推定される。東和地区では、Ta-d が他の層に比べて厚く堆積していることが確認できた。また、各層から乱れの少ない試料と乱した試料を採取した。ここで、乱れの少ない試料とは、土の構造と力学特性を出来るだけ原位置に近い状態の試料とし、乱した試料とは、スコップなどで採取した攪乱状態の試料とする。さらに乱した試料を用いて再構成試料を作成した。

3. 土の物理的性質

本研究において、風化 Ta-d、Ta-d 上、Ta-d 下、およびロームの各種物理試験を実施した。

粒度試験は、風化 Ta-d は炉乾燥させて団粒化した試料を乳鉢でときほぐし、ロームは炉乾燥させて団粒化した試料を木づちでときほぐして実施した。一



図-3 東和地区の滑落崖の様子

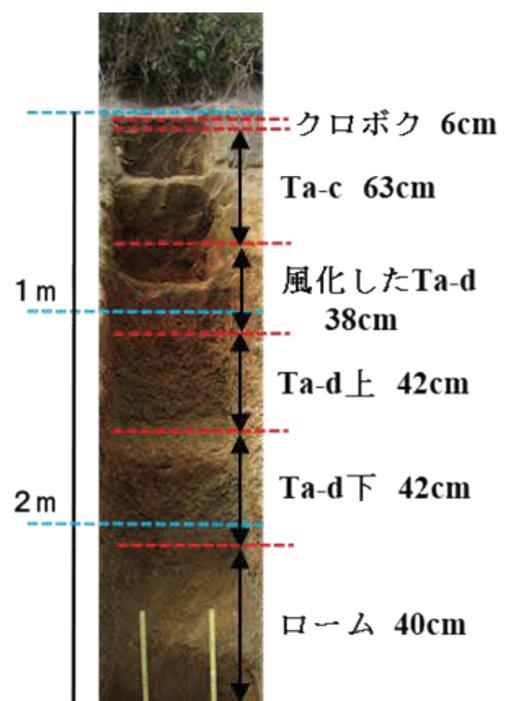


図-4 東和地区の層序・層厚

方、Ta-d 上および Ta-d 下は炉乾燥させて団粒化した状態で粒度試験を実施した。Ta-d 上および Ta-d 下でこのような試験方法を採用した理由として、Ta-d 上および Ta-d 下においても木づちでときほぐして粒度試験を実施しているが、粒径加積曲線において理由は不明だが不連続になるため、団粒化した状態で試験を実施した。また、笠間ら⁷⁾は、草千里ヶ浜降下軽石で破碎させた試料と炉乾燥させ団粒化した状態の試料で粒度試験を実施している。

図-5 に示す粒径加積曲線より、風化 Ta-d は非常に粒径が小さく、ロームと似たような結果が得られた。また、Ta-d 上と Ta-d 下において、Ta-d 下は Ta-d 上よりも粒径が小さいことが分かった。

物理試験は、直径 50mm、高さ 50mm の採土円筒を用いて各層から乱れの少ない試料をそれぞれ 3 つ採取し、その試料から物理試験を行った後、3 つのデータの平均値をまとめた。

表-1 に示す物理的性質より、風化 Ta-d、Ta-d 上、Ta-d 下、ロームのそれぞれ 3 つの試験データにおいて大きなばらつきはなかった。試験を行ったすべての試料において乾燥密度が 1.0 以下と小さな値を示しており、特に Ta-d 上では 0.259g/cm³ であり、非常に緩く堆積していることが分かる。また、ロームと比較して風化 Ta-d、Ta-d 上、Ta-d 下において土粒子の密度は、2.4~2.6g/cm³ と小さな値を示した。さらに、Ta-d 上と Ta-d 下では間隙比が大きく異なった。

また、現地調査日の前日より前の一週間では、2019 年 9 月 11 日に 7.5mm ほどの降雨のみが記録されており¹²⁾、降雨の影響をあまり受けていないにも関わらず、風化 Ta-d、Ta-d 上、Ta-d 下およびロームで飽和度がすべて 60%以上であった。ロームの下端およびロームよりも下層については、現地調査で観察できておらず検討していない。

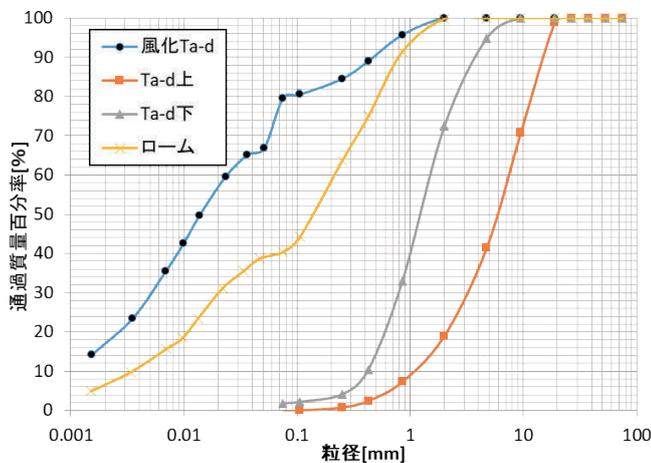


図-5 風化 Ta-d、Ta-d 上、Ta-d 下、ロームの粒径加積曲線

4. 定体積繰返し一面せん断試験

(1) 試験方法

本研究では、東和地区で採取した乱れの少ない試料および再構成試料 (Ta-d 上は再構成試料のみ) を定体積繰返し一面せん断試験に用いた。試験条件は、せん断速度は 1.55mm/min.、せん断過程での上下のせん断箱のすき間を 0.25mm、せん断応力が ±60kPa に達した時、せん断方向を反転させ、せん断変位が ±10mm に達した時点もしくは繰返し回数 10 回になった時点で試験を終了させた。また、風化 Ta-d、Ta-d 上、Ta-d 下の再構成試料においては、表-1 に示すそれぞれの原位置の乾燥密度にできるだけなるように調整し、現地で採取した乱した試料から供試体を作成した。

現地調査においてすべり面が地表から深さ 2m と推定されたため、初期垂直応力は深さ 2m に相当する荷重をかける必要がある。しかし、本論文では初期垂直応力を 100kPa とした。その理由として、①低い垂直応力で繰返し一面せん断試験を行うと、試験が困難になってしまうため、②笠間ら⁷⁾では同試験で草千里ヶ浜降下軽石を用いて初期垂直応力を

表-1 風化 Ta-d、Ta-d 上、Ta-d 下、ロームの物理的性質

	風化 Ta-d	Ta-d 上	Ta-d 下	ローム
湿潤密度 (g/cm ³)	1.076	0.805	1.031	1.219
	1.093	0.750	1.108	1.227
	1.028	0.850	1.037	1.248
	平均値 1.066	平均値 0.802	平均値 1.059	平均値 1.231
乾燥密度 (g/cm ³)	0.486	0.260	0.583	0.687
	0.537	0.248	0.660	0.863
	0.488	0.268	0.534	0.697
	平均値 0.504	平均値 0.259	平均値 0.592	平均値 0.749
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.447	2.608	2.517	2.749
	2.413	2.602	2.513	2.709
	2.403	2.604	2.540	2.730
	平均値 2.421	平均値 2.605	平均値 2.523	平均値 2.729
含水比 (%)	121.60	209.26	77.02	77.42
	103.61	202.99	67.87	42.19
	110.72	217.00	94.18	79.07
	平均値 111.98	平均値 209.75	平均値 79.69	平均値 66.23
間隙比	3.804	9.058	3.262	2.644
飽和度 (%)	71.28	60.34	61.64	68.36

100kPa としており、Ta-d も草千里ヶ浜降下軽石と同じ降下火砕堆積物であり両者を比較するためである。

また、定体積繰返し一面せん断試験における最終せん断時のストレスパスの正の傾きから強度定数を求めた。

(2) 試験結果および考察

図-6(a), (b), (c)に、風化 Ta-d, Ta-d 上および Ta-d 下のせん断応力とせん断変位の関係をそれぞれ示し、図-7(a), (b), (c)に、風化 Ta-d, Ta-d 上および Ta-d 下のストレスパスをそれぞれ示す。表-2 に試験時の物理的性質および強度定数を示す。また、本試験で得られる物理的性質および強度定数は、それぞれ1つの供試体から算出されている。

図-6 より、乱れの少ない試料および再構成試料の風化 Ta-d は、共にせん断を開始してせん断応力が増加したものの、すぐにせん断応力が低下しており、繰返しせん断行くと、剛性を失っていることが分かる。

Ta-d 上および Ta-d 下は繰返しせん断によって、せん断変位が増加する傾向が見られた。また、Ta-d 下の乱れの少ない試料では、せん断変位量が再構成試料と比べて2倍程度大きかった。

図-7 より、風化 Ta-d と Ta-d 下における乱れの少ない試料と再構成試料では、それぞれストレスパスの挙動について大きな差がないことが分かった。また、風化 Ta-d においては、Ta-d 上と Ta-d 下と比較して大きく挙動が異なっており、せん断強度が著しく小さいことが分かる。さらに、再構成試料の Ta-d 上と Ta-d 下においては、挙動が非常に似ており、粒径の大きさや含水比などは異なるが、地震時での挙動はほとんど変わらないことが分かった。

繰返しせん断によって、風化 Ta-d はせん断強度が減少し、せん断剛性が回復しなかったが、Ta-d 上と Ta-d 下はせん断剛性が回復しており、原点付近でサイクリックモビリティ現象を示した。これは密な飽和砂によくみられる傾向であるが、不飽和状態で、緩く堆積しているテフラ層にこのような現象がみられるのは特徴的な性質である。

笠間ら⁷⁾による草千里ヶ浜降下軽石の定体積繰返し一面せん断結果と、本研究における Ta-d の試験結果をストレスパスで比較すると、両者で異なる挙動が観察された。

また、表-2 に示す強度定数は最終せん断時における正の傾きから算出しており、風化 Ta-d の粘着力およびせん断抵抗角は、Ta-d 上と Ta-d 下よりも小さ

く、Ta-d 上と Ta-d 下では大きく変わらないことが分かった。

本論文で実施した定体積繰返し一面せん断試験結果だけを見ると、風化 Ta-d は Ta-d 上と Ta-d 下よりも強度が低く、実際にテフラ層すべりが発生したすべり面は現地での観察から Ta-d 下と推定されるので、今後現地調査と実験の両方からすべり面について研究を継続する必要がある。

また、本試験では、風化 Ta-d と Ta-d 下は乱れの少ない試料と再構成試料で定体積繰返し一面せん断試験を実施し、乱れの少ない試料と再構成試料の試験結果に大きなばらつきはなく試験の信頼度を確認した。

5. 結論

本論文では、厚真町東和地区で採取した風化 Ta-d, Ta-d 上, Ta-d 下およびロームを対象に、各種物理試験を実施し、物理的性質を把握した。そして風化 Ta-d, Ta-d 上および Ta-d 下を対象に定体積繰返し一面せん断試験を実施し、すべり面の変形・強度特性について把握した。本論文で得られたことを以下にまとめる。

- (1) 物理的性質より、物理試験を行ったすべての試験において、乾燥密度が小さく緩く堆積しており、降雨の影響をあまり受けていないにも関わらず飽和度が60%以上であった。
- (2) 風化 Ta-d におけるストレスパスは、Ta-d 上と Ta-d 下に比べて挙動が異なり、強度が大きく低下していた。
- (3) Ta-d 上および Ta-d 下のストレスパスでは、不飽和状態で緩く堆積しているにも関わらず、密な飽和砂でよくみられるサイクリックモビリティ現象を示した。
- (4) 3つの試料の定体積繰返し一面せん断試験結果のみで検討すると、風化 Ta-d がすべり面と考えられるが、現地での観察から実際のすべり面が Ta-d 下と推定される。この原因については引き続き研究が必要である。

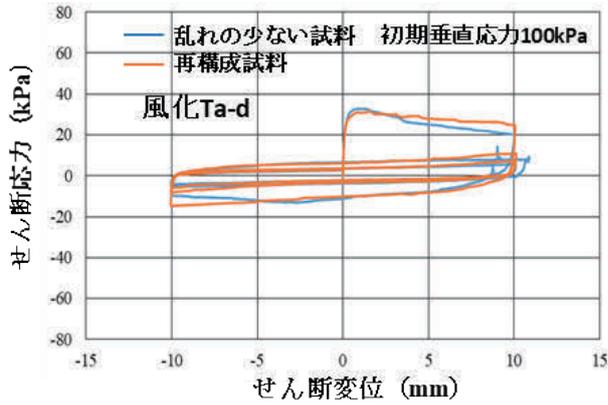


図-6 (a) 風化 Ta-d のせん断応力とせん断変位の関係

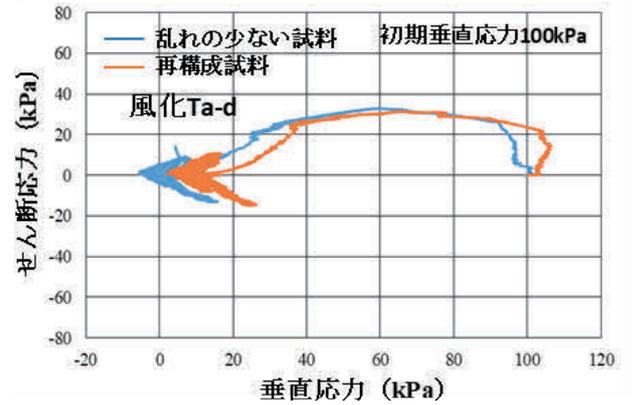


図-7 (a) 風化 Ta-d のストレスパス

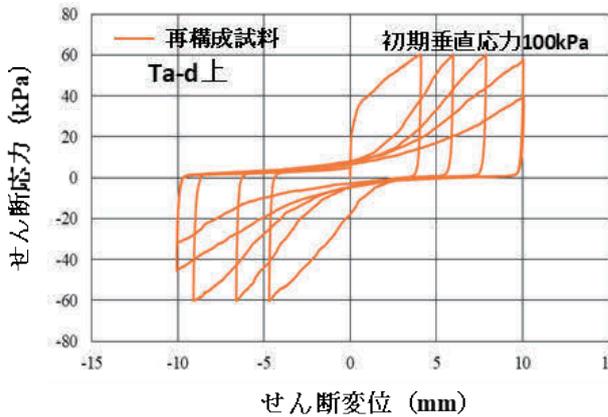


図-6 (b) Ta-d 上のせん断応力とせん断変位の関係

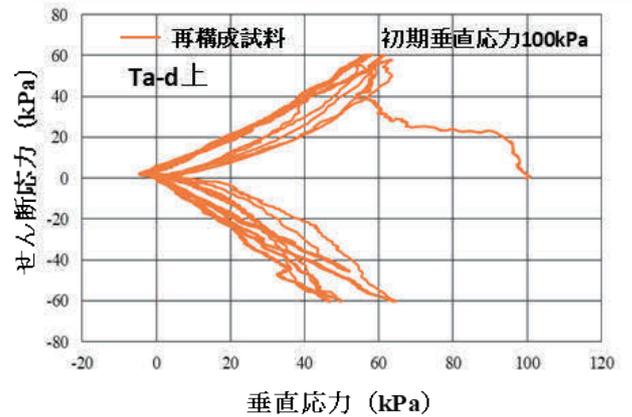


図-7 (b) Ta-d 上のストレスパス

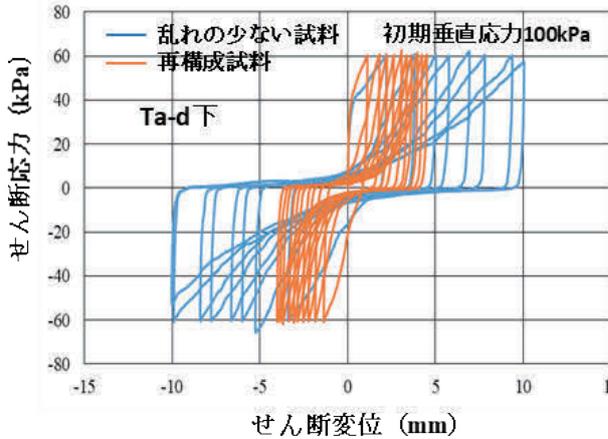


図-6 (c) Ta-d 下のせん断応力とせん断変位の関係

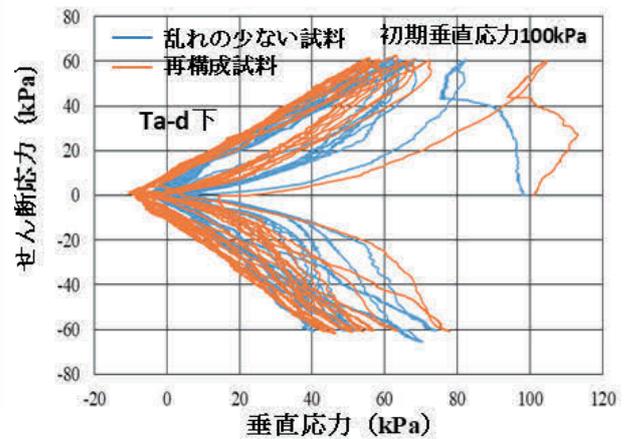


図-7 (c) Ta-d 下のストレスパス

表-2 定体積繰返し一面せん断試験に用いた供試体の物理的性質と強度定数

	風化Ta-d		Ta-d上	Ta-d下	
	乱れの少ない試料	再構成試料	再構成試料	乱れの少ない試料	再構成試料
含水比 (%)	182.86	162.12	160.07	116.31	116.24
乾燥密度 (g/cm ³)	0.318	0.322	0.300	0.331	0.416
間隙比	6.613	6.519	7.683	6.622	5.065
飽和度 (%)	66.94	60.21	54.27	44.31	57.90
粘着力c(kPa)	4.52	0	5.52	5.62	10.14
せん断抵抗角φ(°)	29.90	34.20	41.07	42.06	41.59

謝辞

本論文の一部は、JSPS 科研費 JP17H03303 および河川砂防技術研究開発公募地域課題分野（砂防）の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 国土地理院：平成 30 年（2018 年）北海道胆振東部地震に関する情報
<<https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30-hokkaidoiburi-east-earthquake-index.html>> (2020/06/30 アクセス).
- 2) 長谷川健, 花岡正光, 古川竜太, 重野聖之, 七山太, 中川光弘, 安藤寿男：北海道東部, 釧路地域における樽前 d 降下火砕堆積物の発見とその意義, 地質学雑誌, 第 119 巻, 第 7 号, pp.446-456, 2013.
- 3) 梅津讓：恵庭 a 降下軽石及び樽前 d 降下軽石の年代に関する資料, 東北地理, 第 39 巻, 第 2 号, ppt.141-143, 1987.
- 4) 勝井義雄：支笏降下軽石堆積物について, 特に支笏カルデラ形成直前の活動について, 火山, 第 2 集, 第 4 巻, 第 1 号, pp.33-48, 1959.
- 5) 中川光弘, 宮坂瑞穂, 三浦大助, 上澤真平：南西北海道, 石狩低地帯におけるテフラ層序学：支笏-洞爺火山地域の噴火履歴, 地質学雑誌, 第 124 巻, 第 7 号, pp.473-489, 2018.
- 6) 千木良雅弘, 田近淳, 石丸聡：2018 年胆振東部地震による降下火砕物の崩壊：特に火砕物の風化状況について, 京都大学防災研究所年報, 第 62 号 B, pp.348-356, 2019.
- 7) 笠間清伸, 山縣史朗, 田中大貴, 古川全太郎, 安福規之：南阿蘇村高野台地区に分布する火山灰質地盤の地震時安定性評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.3, pp.171-181, 2018.
- 8) 王功輝, 古谷元, 渡辺直喜, 土井一生, 馬寧：平成 30 年北海道胆振東部地震による土砂災害の特徴, 京都大学防災研究所年報, 第 62 号 A, pp.48-56, 2019.
- 9) Li R., Wang F., Zhang S. : Controlling role of Ta-d pumice on the coseismic landslides triggered by 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, Landslides, <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01349-y>, 2020.
- 10) 岡田健杜, 後藤聡：テフラ層すべりが発生した樽前 d 降下火砕堆積物の定体積繰り返し一面せん断特性, 第 55 回地盤工学会研究発表会, 22-11-4-05, 2020.
- 11) 岡田健杜, 後藤聡：テフラ層すべりが発生した樽前 d 降下火砕堆積物の定圧および定体積一面せん断特性, 2020 年度全国大会第 75 回年次学術講演会, 第 III 部門, 斜面(2), III-18, 2020.
- 12) 気象庁：日ごとの値, 厚真町 2019 年 9 月
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/daily_a1.php?prec_no=21&block_no=0124&year=2019&month=9&day=&viev=>> (2020/06/30 アクセス)

(2020. 7. 1 受付)