2018年北海道胆振東部地震によって テフラすべりが膨大に発生した地形的背景 - 普遍的に存在する遷急線と遷急点の実証-

千木良雅弘¹·田近 淳²

¹深田地質研究所 ²株式会社ドーコン

Topographic background for the numerous numbers of tephra landslides induced by the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake — Demonstration of penetratively developed slope breaks and knickpoints—

CHIGIRA Masahiro¹, TAJIKA Jun²

¹Fukada Geological Institute ²Docon Co., Ltd.

要旨:2018年北海道胆振東部地震によって斜面崩壊が多発した厚真地域で、1mメッシュの数値 標高データを約203km²の範囲にわたって解析した結果、河谷沿いに遷急線が普遍的に形成され ていることが明らかになった.そして、2018年に群発した斜面崩壊の多くは、この遷急線より も上方の斜面、あるいは遷急点よりも上流側の谷斜面に発生したものであることがわかった.厚 真地区では、胆振東部地震時には主に遷急線よりも上方斜面の9kaのTa-dが滑落した.遷急線 よりも上方のTa-dは、斜面下方からの支持力がないか弱かったと推定され、このことが膨大な 数の斜面崩壊を発生させた地形的理由であることがわかった.このような遷急線は、北海道、東 北、関東地方から多く報告されており、これらの地域は新しいテフラに広く覆われていることか ら、2018 胆振東部地震時のテフラすべりと同様の現象が地震時に広い範囲で起こりうることが 示唆される.

キーワード: 2018年北海道胆振東部地震, テフラ, 斜面崩壊, 詳細数値標高データ, 遷急線

Abstract: High-resolution DEMs with 1-meter mesh were analyzed in the Atsuma district for an area of 203 km², where numerous numbers of landslides were induced by the 2018 Hokkaido eastern Iburi earthquake, to delineate slope angles and to demonstrate that convex slope breaks are penetratively developed along almost all the valleys. Earthquake-induced landslides occurred on slopes above the slope breaks or on slopes upstream of knickpoints. Mainly tephra named Ta-d of 9 ka on the slopes above the slope breaks slid in the Atsuma district. The bed of Ta-d above the slope breaks had weak support from downslope, which provided the preferable condition for the landslide to occur during earthquakes. Similar convex slope breaks have been reported from Hokkaido, Tohoku, and Kanto regions, which are widely covered by young tephra, which suggests that landslides like those during the 2018 Hokkaido eastern Iburi earthquake could be induced by earthquakes.

Keywords: 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, tephra, landslide, high-resolution DEMs, convex slope break

1. はじめに

2018年北海道胆振東部地震は、9月6日3時7 分 59.3 秒に, 胆振地方中東部, 深さ 37 kmを震源 として発生し、Mi6.7. 最大震度7 を記録した(地) 震調査研究推進本部,2018). この地震によって 震源域北方の厚真地区を中心として膨大な数の斜 面崩壊が発生した. それに対して多面的な研究が 行われ、それらの結果は地震による地すべり災害 刊行委員会編(2020)にまとめられている.大 規模な岩盤すべりも発生したことがわかっている が(伊東ほか, 2020)、数的に最も多かったのは 樽前火山と恵庭火山から噴出したテフラ(降下火 砕物)の崩壊であった.後者の発生の原因は、テ フラが風化してハロイサイトが形成され、そこに すべり面が形成されたためであるとされている (千木良ほか, 2020a). さらに, テフラ層が斜面 下部の遷急線などで切断され、斜面下方からの支 持力が低下していたことが指摘されている(千 木良ほか,2019;柳井ほか,2019;田近ほか, 2020). 厚真地区では、斜面に遷急線が発達し、 谷壁斜面が上部谷壁斜面と下部谷壁斜面とに分け られることが後述するように古くから指摘されて おり、この遷急線がテフラ層の斜面下部切断の場 になったと推定される.しかしながら、斜面傾斜 の広域的分布については明らかにされていなかっ た.

北海道胆振東部地震によって発生した斜面崩 壊は多くの人の注目を浴びた.その地形的研究も いくつかあるが,的を射ていないものも多い.崩 壊した斜面の傾斜について記述した論文もある が(Zhang et al.,2019),後述するように,実際に 発生した崩壊は,遷急線よりも上方の斜面が崩壊 して遷急線よりも下の斜面に堆積したものがほと んどであるため,崩壊地の中の地表の傾斜を平均 的に測定しても、崩壊した斜面自体の傾斜ではないため、あまり有用とはいえない.また、これらの遷急線は、地理院地図の5mあるいは10mのDEMを使用して作成された傾斜量図や赤色立体画像では明瞭には認められない.そのため、10mのDEMを用いて地形解析しても(Wang et al. (2019))、地形と斜面崩壊との関係の分析には十分とはいえない.

Tamura et al. (2002) や柳井 (1989) は, 厚真 地域の沢に遷急線があることを報告したが、調査 は目視観察と地形図によっており、生データの提 示という点では説得力に欠いていた. Tamura et al. (2002) は、これらの遷急線はたとえ 2m 間 隔の等高線図でも認めることはできず, 現地での 注意深い観察によって初めて認識できる、と述べ ている.そして、その観察表示もスケッチと地 形図への書き込みによって示されていた. 柳井 (1989) も、同様にスケッチによって遷急線を示 した. これらの研究に対して,近年一般的になっ てきた航空レーザー計測による詳細地形データ は、斜面傾斜の分布を広域的に示すことができ、 読者が研究結果を追体験するのにきわめて有効で あるが、データ公開があまり進んでいないことも あり、あまり一般的に利用されていない.

本研究の目的は、地震直後に取得された詳細 地形データを用いて斜面傾斜の分布を分析し、上 記の遷急線の分布を明確に示し、また、それが目 視によって明確に認識される遷急線と一致するこ とを示すことにある.また、2018年の地震時の 斜面崩壊と同様の斜面崩壊がこの地震以前にどの 程度起こっていたのか、明らかにすることも目的 とした.

2. 方法

国土地理院によって判読された斜面崩壊の分 布図と地形分析を行った範囲を Fig. 1 に示す. 1mメッシュの数値標高データ(DEM)は北海 道水産林務部が2018年度に航空レーザー計測 し,G空間情報センターを通じて公開したものを 使用した(北海道水産林務部,2018).DEMの



Fig. 1 Index map showing the investigation area. Landslide distribution is from Geospatial Information Authority of Japan (2018). The geologic maps on the background are from Matsuno and Ishida (1960) and Takahashi and Wada (1987). Numbers with white rectangles show the location of the data shown in the text.



Fig. 2 Index map showing the slope angles and the distribution of landslides. The legend of slope angles is the same with Fig. 3.

処理には、QGIS バージョン 3.22 を用いた. 1m メッシュの DEM データ解析は, Fig. 1 に示した 範囲で行った.斜面傾斜は、QGISのラスター地 形解析プラグインを使用して DEM データから算 出した.計算結果は、後述するように、斜面傾 斜を10°間隔で色を変えて表示した場合が最も よく現地で認識される遷急線を表していたので, 斜面傾斜を 0-10°, 10-20°, 20-30°, 30-40°, 40-50°, 50° < と6区分して異なる色調で表示し た. これらの傾斜図と国土地理院が9月6日と9 月11日に撮影して公開したオルソ画像とを比較 して、2018年の地震時崩壊を確認した(国土地 理院, 2018). また, 傾斜図でこれらの崩壊と同 様の形態が認められても、オルソ画像では樹木が 回復している場所は、2018年よりも前の崩壊地 であると判定した.実際の斜面の形態は、2018 年10月,2019年3月と6月に実施した地表踏査, および 2019 年 12 月 21 日にドローンから撮影し た画像によって確認した.

3. 結果

DEM データ解析対象としたほとんどの範囲で 河谷沿いが急傾斜となっており、その上縁に遷急 線があり、その上方は緩傾斜で、崩壊源の多くは この緩傾斜斜面であった.解析対象域全体の斜面 の傾斜分布と崩壊の分布を Fig. 2 に示し、以降、 この中で代表的と思われる箇所を例示して説明し ていく.

3.1 高丘北方

Fig. 1 と Fig. 2 の番号 1 を付した四角領域に ついて, Fig. 3 に, 崩壊地分布を示すオルソ画 像 (Fig. 3-a), 傾斜図 (Fig. 3-b), 地形断面図 (Fig. 3-c) を示した. オルソ画像と傾斜図とを 比較することによって、崩壊地の縁が傾斜 40° 以上の崖になっていることがわかる.また、これ らの崖に囲まれた崩壊地内部は、20°から40°程 度の傾斜で平面的あるいは凹状になっていること がわかる.谷の上方の場合は凹状、谷壁上方の場 合には平面的である.また,傾斜図では、河谷に 沿って暗色の帯が発達していることがわかる.こ の帯は、傾斜 40°以上の斜面であり、その上方の 傾斜40°未満の斜面とは明瞭な遷急線で接してい る. 遷急線は河谷とも交差しており、そこは河 谷の縦断面の遷急点となっている. このことは, Fig. 3-bのa-a'線沿いの地形断面 (Fig. 3-c-1) に明瞭に見て取れ,縦断面の傾斜が急変する部分 (Fig. 3-c-1 で▽で指示) が遷急点である. 斜面 崩壊は、遷急線よりも上方の斜面および遷急点よ りも上流側斜面で生じた.



Fig. 3 Distributions of landslides and slope angles in the north of Takaoka (#1 in Figs. 1 and 2). a: Orthophoto. b: Slope image. c: Topographic profiles along 2 lines shown in b. \bigtriangledown indicates a knickpoint and a slope break.

3.2 高丘東

Fig. 1 の番号 2 を付した四角領 域について, Fig. 4 に, 崩壊地分 布を示すオルソ画像 (Fig. 4-a), 傾斜図 (Fig. 4-b), 地形断面図 (Fig. 4-c) を示した. この地域で も,崩壊地の縁が傾斜40°以上の 崖になっている.また、河谷沿い に急傾斜の斜面が遷急線をもって 分布していることがわかる (Fig. 4-b, 4-c). a-a' 断面の東側では, 遷急点は山稜にまで達している. 斜面崩壊は, 遷急線よりも上方の 斜面で発生したことがわかる.た だし,最も上流部の側壁斜面では 崩壊は発生しなかった(Fig. 4-b のa-a' ラインよりも上流側).

3.3 高丘北西

Fig. 1 の番号 3 を付した四角領 域について, Fig. 5 に, 傾斜図 (Fig. 5-a), ドローンから空中撮影し た画像 (Fig. 5-b, 5-c)を示し, 地形断面図を Fig. 6 に示す. 斜面 の傾斜図で認められる遷急線(河 谷沿いの 40°以上の斜面とその上 方の 40°未満の斜面の境界)が, ドローンからの画像上でも明瞭 に認められ,また,地形断面でも 明瞭な傾斜変換点として認められ る. これらの図に示すように,遷 急線よりも上方の斜面のほとんど が崩壊した.



Fig. 4 Distributions of landslides and slope angles in the east of Takaoka (#2 in Figs. 1 and 2). a: Orthophoto. b: Slope image. c: Topographic profiles along a line shown in b. ∇ indicates a knickpoint.



Elevation asl (m)



Fig.5 Distributions of slope angles and photographs showing slope breaks in the northwest of Takaoka (#3 in Figs. 1 and 2). b and c: Oblique views of slope breaks, which locations are shown in a. d: Superposed view of the orthophotograph and slope image of the area c. e: Slope image of the area of d. Comparing d and c, we see the slopes above the slope breaks failed.



Fig. 6 Topographic profiles along 3 lines shown in Fig. 5-a. ∇ indicates a slope break.

3.4 東和川

Fig. 1 の番号4を付した四角領域について, Fig. 7 に,崩壊地分布を示すオルソ画像 (Fig. 7-a),傾斜図 (Fig. 7-b)を示す.ここでも,河 谷沿いに遷急線が発達しており,その上方斜面が 崩壊したことがわかる. Fig. 7-bの四角で囲んだ 領域を, Fig. 8 に, オルソ画像 (Fig. 8-a), 傾斜 図 (Fig. 8-b), 現地での写真 (Fig. 8-c) として 示す. 主谷の枝谷に遷急線が入り込み, 遷急点と なっていることがわかる (Fig. 8-b, 8-c). この 遷急点よりも上方の谷がすべて崩壊した.



Fig. 7 Distributions of landslides and slope angles along the Towagawa River (#4 in Figs. 1 and 2). a: Orthophoto. b: Slope image.



Fig. 8 Distributions of landslides and slope angles and a photograph along the Towagawa River (#4 in Figs. 1 and 2). a: Orthophoto. b: Slope image. c: A photograph showing a slope break by white dashed line. Shot angle of c is shown as a white arrow in a and b.

а



Fig. 9 Distributions of landslides and slope angles along the Shuruku-sawa River (#5 in Figs. 1 and 2). a: Orthophoto. b: Slope image. White squares surround old landslides, which are identified by topographic features but are now covered with vegetation.

3.5 シュルク沢川

 崖で囲まれた斜面 ── で植生に覆われた領域が多 数認められた.これらは、2018 年の地震よりも 前の斜面崩壊で、形態的類似性から同様に地震に よって発生したと推定される崩壊跡である.Fig. 9内に12箇所の古い崩壊跡が認められた.

伊東ほか(2020) も,航空レーザー計測によ る陰影図から 2018 年の地震以前のテフラの崩壊



Fig. 10 Distributions of landslides occurred during the 2018 earthquake and landslides before that (black areas).

が検出できることを示したが、例示にとどまって いた.

4. 考察

2018年北海道胆振東部地震によって発生した 斜面崩壊は、調査域の202.6km²の面積内で5552 箇所であった(密度27箇所/km²).そのほかに、 3.5 で述べたように、もっと古い崩壊地が地形的 に認められ、調査域内で、その数は119箇所で あった(Fig. 10,密度0.6箇所/km²).このよう に、2018年以前の崩壊密度は、2018年のものに 比べてはるかに少ないことがわかった.つまり、 2018年の斜面崩壊はほとんど無傷であった地域 に膨大な数発生したということになる.調査範囲 内の2018年の崩壊地の面積は、約33km²と算出 されたため、崩壊面積率は16%という大変高い 割合になる.ただし、2018年の地震時に遷急線 よりも上方の斜面が崩れた場合、遷急線よりも下 方にあったかもしれない古い崩壊地を覆い隠した 可能性は否めない. つまり, 遷急線よりも下方の 急斜面には2018年の地震よりも前の地震で崩れ た斜面もあったかもしれない.一方で、2018年 の地震時にほとんど全面的に崩れた吉野地区の 斜面は, 傾斜図 (Fig. 11) に示すように, 隣接す る地域の遷急線よりも下方の急斜面の帯の連続に ある. つまり, 遷急線下方の斜面でも2018年よ りも前には崩れておらず, Ta-dが残存しており, それが2018年に崩れたことになる.ただし、吉 野地区の崩壊斜面は傾斜 30°から 40°の斜面であ り、ほかの一般的な遷急線下斜面よりもやや緩傾 斜であるので, 吉野地区以外の遷急線下斜面は 2018年以前に崩れた可能性も否定できない。吉 野地区の斜面は、広い範囲でその下方を人為的に



Fig. 11 Slope angles around the Yoshino area. The steep slopes in Yoshino continue to the slopes lower than the slope breaks in the north of this figure.

切断されており、それが崩壊発生の原因の一つとなったと指摘されている(田近ほか、2020).

テフラからなる斜面がある地震の時に崩れる か崩れないかは、微妙なバランスによって決まる と考えられ、いったん強い地震とそれによる斜面 崩壊を経験した地域でも、さらにその後の強い地 震によって違う斜面が崩れるということを繰り 返してきていると考えられる.実際、航空レー ザー計測によって得られた面積 6.3 km² 内の詳細 地形データから、1968 年十勝沖地震の時に 314 箇所のテフラの崩壊が発生したが、それ以前にも 914 箇所の崩壊が起こっていたことがわかったし (Ling and Chigira, 2018)、1949 年今市地震時に テフラが多数崩れたが、それ以前にも多数の同様 の崩壊があったことが詳細地形データからわかっ ている (千木良ほか、2020b).テフラの地震時 崩壊は、一度の大地震によって多数発生したとし ても、それですべての不安定斜面が崩壊してしま うことはなく、極端に言えば、当該テフラが斜面 に残存している限り、崩れる危険性はなくならな いともいえる.

田近ほか(2016)は、縄文時代の厚幌1遺跡 で4600yBPから2500yBPまでの間にTa-dが地 すべりしたことを見出した.また、その時のす べり面はTa-dではなく、その下位のEn-a軽石 (19-20ka)にあったと推定されている(Tajika et al., 2022).そして、Tajika et al.(2022)は、ハ ロイサイトの形成には火砕物が堆積後1万年程 度必要であるという岡田ほか(1986)の研究を 引用して、縄文時代には地すべりの数が少なく、 2018年に膨大な数の地すべりが発生したのは、 その間にTa-dのハロイサイト化が進んだためで あると推定した.

以上に述べたことから、2018年に膨大な数の

テフラすべりが起こった理由は、地形的には、斜面の下部切断が極めて広域に生じていたことにあり、また、鉱物学的には、おそらく9000年前に降下した Ta-d に十分な量のハロイサイトが形成されたことにあると推定される.

Tamura et al. (2002) は、本報告に記述した厚 真地区を含めて、北海道、東北、関東地方の複 数箇所から河谷に沿う遷急線を報告し、羽田野 (1986)の後氷期侵食前線と考え、これは氷期の 面的侵食から後氷期の降雨増加による流水による 線的侵食によって形成されたものだとした.この 成因の是非は未だ不明確ではあるが、厚真地域で の遷急線の分布が極めて広範囲であることが実証 的に示されたことから、東日本全体にも広く存在 する可能性があるといえる.そうであるとすると、 新しいテフラの斜面に平行な層理面がこれらの遷 急線に沿って下部切断されている可能性が高く、 地震時の崩壊危険性が高い地域が広範にわたるこ とが示唆される.

5. 結論

2018年北海道胆振東部地震によってテフラの 斜面崩壊が膨大な数発生した厚真地域の地形を, 1mメッシュの数値標高データを使って分析し た.その結果,当該地域の河谷沿いには広範囲か つ一般的に遷急線が形成されていることが明確に 示された.そして,主にその遷急線よりも上方斜 面が崩壊したことが明らかになった.これは,斜 面に堆積したテフラが遷急線で切断あるいは,屈 曲していたことを示しており,遷急線よりも上方 のテフラが斜面下方からの支持力を失うか低減さ れていたことを示唆し,地震時の斜面崩壊の大き な要因になったと推定される.1mメッシュの数 値標高データからは,2018年の崩壊と同じ形態 で現在は植生に覆われている斜面崩壊跡が認めら れたが、その数は極めて少なかった.厚真地区と 類似した遷急線は北海道から、東北、関東地方に かけて広く分布している可能性があり、これらの 地域に分布するテフラが地震時に広範囲にわたっ てすべる可能性を示唆している.

謝辞

本研究は、G 空間情報センターに公開された 北海道水産林務部の詳細 DEM を利用することに よって可能になった.ここに御礼申し上げる.

文献

- 千木良雅弘・田近 淳・石丸 聡(2019):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,62B,348-356.
- 千木良雅弘・田近淳・石丸聡(2020a): すべり 面の形成層準一風化・粘土鉱物.「地震によ る地すべり災害」刊行委員会編,地震による 地すべり災害 2018年北海道胆振東部地震, 北海道大学出版会, 64-71.
- 千木良雅弘・鈴木毅彦・王 功輝(2020b):1949 年今市地震による崩壊性地すべりの実態.深 田地質研究所年報,21,147-165.
- 羽田野誠一(1986):山地の地形分類の考え方と 可能性.東北地理,**38**(1),87-89.
- 北海道水産林務部 (2018): 航空レーザーデータ (H30 厚真地区), https://www.geospatial.jp/ ckan/dataset/hokkaido-h30atumachiku, (2022 年4月1日参照).
- 伊東佳彦・山崎秀策・西原照雅・倉橋稔幸(2020): 高解像度 LP データ(DEM)を使った斜面変動

の分布と特徴.「地震による地すべり災害」刊行 委員会編,地震による地すべり災害 2018 年北 海道胆振東部地震,北海道大学出版会,98-103.

- 地震調査研究推進本部(2018):平成30年北海 道胆振東部地震の評価~地殻変動から探る震 源断層~. https://www.jishin.go.jp/resource/ column/column_18win_p02/,(2020年8月9 日参照).
- 地震による地すべり刊行委員会編(2020):地震 による地すべり災害 2018 年北海道胆振東部 地震. 北海道大学出版会, 370p.
- 国土地理院(2018):北海道胆振東部地震. https://cyberjapandata.gsi.go.jp/xyz/20180906 hokkaido_abira_0911do/{z}/{x}/{y}.png, https://cyberjapandata.gsi.go.jp/xyz/20180906 hokkaido_atsuma_0906do/{z}/{x}/{y}.png, (2020年4月1日参照).
- Ling, S. and Chigira, M. (2018) : Statistical distribution of landslides triggered by the historical strong earthquake in Hachinohe, Japan. Paper presented at the Japan Geoscience Union 2018 Meeting, HDS11-P08.
- 松野久也・石田正夫(1960):5万分の1地質図 幅「早来(札幌-43)」および同説明書.北海 道開発庁.
- 岡田清・小坂丈予・松井久仁雄・鈴木正紀(1986): 日本各地のテフラの風化変質に影響する諸因子 について.鉱物学雑誌,17(特別号),25-33.
- 高橋功二・和田信彦(1987):5万分の1地質図 幅「穂別(札幌-44)」および同説明書.北海 道立地下資源調査所.
- 田近 淳・大津 直・乾 哲也 (2016): 成層した降 下火砕堆積物からなる地すべり移動体の内部 構造と形成過程:石狩低地東縁,厚幌1遺跡 の例.地質学雑誌, 122(1), 23-35.

- 田近 淳・千木良雅弘・小池明夫・金 秀俊・石丸 聡・ 雨宮和夫(2020):2018 年北海道胆振東部地 震によるテフラ層すべりと人的被害.日本地 すべり学会誌,57(6),203-209.
- Tajika, J., Chigira, M., Inui, T. and Yahata, M. (2022): A cause for swarm of tephra slides induced by the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake: comparison with landslides occurred in the Jomon period. Paper presented at the Japan Geoscience Union Meeting 2022, HDS07-08.
- Tamura, T., Li, Y., Chatterjee, D., Yoshiki, T. and Matsubayashi, T. (2002) : Differential occurrence of rapid and slow mass movements on segmented hillslopes and its implication in late Quaternary paleohydrology in Northeastern Japan. *Catena*, 48, 89–105.
- 柳井清治(1989):テフロクロノロジーによる北 海道中央部山地斜面の年代解析.地形,10(1), 1-12.
- 柳井清治・古市剛久・小山内信智(2019):2018 年北海道胆振東部地震によって発生した山地 崩壊とテフラ層の関係について.第130回日 本森林学会大会学術講演集,220,J6.
- Wang, F., Fan, X., Yunus, A. P., Subramanian, S. S., Rodriguez, A. A., Dai, L., Xu, Q. and Huang, R. (2019): Coseismic landslides triggered by the 2018 Hokkaido, Japan (Mw 6.6), earthquake: spatial distribution, controlling factors, and possible failure mechanism. *Landslides*, 16(8), 1551–1566.
- Zhang, S., Li, R., Wang, F. and Iio, A. (2019):
 Characteristics of landslides triggered by the
 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake,
 Northern Japan. Landslides, 16(9), 1691–1708.