■北海道陸別町で発生した地すべりの末端隆起の成長

Evolution of the toe bulging of Rikubetsu landslide in Hokkaido

渡邊達也* Tatsuya WATANABE／北見工業大学 Kitami Institute of Technology

三浦 竜 Ryu MIURA／北見工業大学 Kitami Institute of Technology

川尻峻三 Shunzo KAWAJIRI／北見工業大学 Kitami Institute of Technology

山崎新太郎 Shintaro YAMASAKI／京都大学防災研究所 Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute

中村 大 Dai NAKAMURA／北見工業大学 Kitami Institute of Technology

川口貴之 Takayuki KAWAGUCHI／北見工業大学 Kitami Institute of Technology

雨宮和夫 Kazuo AMEMIYA／防災地質工業(株) Bousai-Chishitsu-Kogyou Co., Ltd.

キーワード：末端隆起，UAV-SfM，表面波探査，断層関連褶曲，衝上断層

1. はじめに

2016年4月上旬，北海道陸別町上陸別の牧草地と陸別川に接する森林地において，その地面が長さ約80m，幅約60mにわたり隆起しているのが発見された（図-1, 2）。牧草地上においては，幅30m，最大高さ約3mに達しており，土地所有者によって発見されることとなった。陸別町が位置する北海道東部では，2015年4月に羅臼町幌萌海岸において地すべりによる顕著な海岸線の隆起現象が発生しており¹⁾²⁾，この隆起現象も報道等でさらに注目を集めることとなった。

牧草地の隆起域の発見後，それに近接する上方の谷部において顕著な開口亀裂や段差，倒木が認められた。さらに輪郭を描くように滑落崖が認められ，それは陸別川を挟んで対岸の隆起域と連続していた（図-3）。このことから，隆起域は地すべりと関連した現象（地すべりの末端隆起）であると考えられた。牧草地の隆起域と変形の認められた谷部に挟まれる陸別川の河床も隆起し，その上流に湛水域を形成した。

ところで，近年急速に普及している無人航空機UAV（Unmanned Aerial Vehicle）および三次元形状復元技術SfM（Structure from Motion）は地すべりのような変化する地形の動態観測を低価格・高頻度で行うことが可能な技術である³⁾。しかし，光学写真を基に地形のモデル化を行うため，日本のような樹木の密な地域では，地形の変化観測に適用される機会は限定的である。一方で，今回発見された隆起域の一部は牧草地上に形成されていたため，樹木に覆われておらず，牧草は秋期には刈られ，冬期には枯死する。よって，牧草地の隆起域が変化を続けているならば，UAV-SfM技術によってその形態の変化を捉えることが可能であった。そこで，この観測により地すべりの末端隆起の地形変化を明らかにし，末端隆起が形成されたプロセスの考察を，地形・地質調

図-1 隆起発生箇所周辺の地質と地すべり分布(産業技術総合研究所シームレス地質図，防災科学技術研究所地すべり地形分布図および地理院地図を用いて作成)

査，表面波探査，ボーリング調査も援用しながら行った。

2. 地形・地質概要

調査対象は陸別川沿いの標高約300mに位置し，周囲はなだらかな丘陵で囲まれている（図-1）。既往文献によると，対象が含まれる地域の地質は，硬質頁岩と軟質シルト岩の互層からなる新第三紀川上層群達姫層，礫

* 連絡著者／corresponding author
〒090-8507 北海道北見市公園町165番地
165 Kouen, Kitami, Hokkaido

図－2 (a)地すべり全景, (b)隆起域全景 撮影日: 2016年5月8日, (c)隆起域の鉛直写真 (撮影日: 2018年5月1日)

岩主体の古第三紀陸別層, 緑色岩類で構成される先白亜紀仁頃層群⁴⁾⁵⁾が分布し, それらの岩石を約12万年前に噴出した珪長質火山灰と軽石を主体とする屈斜路火砕流堆積物Kp4が覆う⁶⁾。これら以外には, 安山岩溶岩と安山岩～流紋岩質火砕岩を主体とする二又安山岩類⁵⁾があり, そのK-Ar年代は31.4Maという報告⁷⁾がある。火成活動は二又安山岩の噴出以降も継続していた可能性があり, 達姫層は安山岩角礫層を多数挟む⁸⁾。達姫層は, 北海道東部に広範囲に分布する新第三紀堆積岩の分布域と同様

図－3 (a)陸別川左岸側変動域の微地形図, (b)縦断測量断面図

に多数の地すべり地形が認められる⁹⁾。尚, 後述するが地すべりおよび隆起域の地質は, 達姫層の堆積岩, 二又安山岩類の火砕岩などの再移動堆積物と考えられる。

3. 地すべりの地形・地質的特徴

前述したように, 陸別川を挟んで隆起域対岸となる谷底斜面の領域には, 地すべりによって形成されたと考えられる顕著な滑落崖や段差が不連続に複数確認できた(図－3)。滑落崖を結んだ外形から推定される地すべり

の規模は、全長が約410m、代表的な幅が約85m、比高差が約54mであり、移動方向は南南西から北北東と推定される。

谷奥部、つまり地すべりの上部には湿地や沼が点在し、平坦な地形が形成され、一部の沢は谷上部に向かって流れる部分がある。これは谷地形としては不自然な形態であり、地すべりの移動により下方が隆起し、谷が閉塞されたためと考えられる。また、地すべりによると思われる沢の流路変更もあった。植生下が露出した滑落崖や段差以外の地形は、それらが形成されてから相当の期間が経過していると考えられ、この数年で形成されたものではない。つまり、数十年以上の長期にわたってこの谷底斜面が地すべりの影響を受けてきていると考えられる。

地すべり内の陸別川に接する領域には、河床からの高さが約10mの顕著な丘状の地形（小丘）とそれを侵食した崖が存在する（図-2,3）。この小丘は、今回の隆起現象発生以前から存在しており、かつての地すべり変動の際に形成されたものであろう。小丘の表面には、植生下が崖面に露出した複数の段差が生じており、それらの走向はおおむね北北東―南南西方向であり、地すべりの輪郭から推定される地すべりの移動方向と一致する。また、小丘の頂点を境に、東側の段差は東面に崖が、西側の段差は西面に崖が形成されているという特徴がある。これらの段差の起源は、地すべりによって小丘が形成された際、縦断方向に生じた破断面と推定される。地すべりによる小丘の再成長と小丘斜面上の重力作用による正断層性の運動で、それらは小丘の頂点を軸に東西両方向へずり下がり、複数の段差を形成したものと考えられる。

陸別川右岸（牧草地側）の地点X（図-2c）では、地すべりのすべり層と考えられる破碎帯が陸別川の侵食により露出した（図-4）。この破碎帯では、色合いの異なる未～半固結の角礫およびその破碎物である砂～粘土が混在してパッチワークを形成している。そして、淡褐色の角礫およびその破碎物の部分や暗灰色粘土からなる部分は、断面が非対称なレンズの形状を成して連なる。採取した淡褐色および暗灰色の粘土試料をX線回折した結果、スメクタイトとマイカの含有が認められた。レンズの連なる方向の走行および傾斜はN13°W, 11°Sであり、非対称レンズ構造の示すセンスは上盤の北への移動である。これは地すべりの末端部での移動方向と一致している。この破碎帯は地表面から深さ約3mの位置にあり、破碎帯露頭の上方に現在の陸別川起源の河床礫層が認められることから、破碎帯は陸別川の河床下に存在したものが、地すべりによる隆起により地上に現れ、侵食で露出したものと考えられる。

4. 方法

4.1 UAV-SfM測量

牧草地上の隆起域を対象に、UAV-SfM技術による地形測量を行った。小型UAV（DJI社製Phantom 3 Profes-

sionalおよびPhantom 4 Pro）による空撮を、牧草の背丈が低い春と草刈後の秋に実施し、これまでに計5回（2016年4月22日, 2017年5月13日, 11月9日, 2018年5月1日, 11月18日）行った。

UAVによる撮影範囲は、隆起域を含むおよそ100m四方の範囲とした。隣り合う画像の撮影範囲が70%以上重なり合うよう、対地飛行高度約30mから鉛直下向きに撮影した。さらに、隆起域の微地形を詳細に捉えるための斜め向き撮影も行った。1回当たり220～392枚の空撮画像を取得した。

撮影範囲内の地表面には測量杭14本を設置し、さらに空撮実施時に対空標識を6～8枚配置した。これらの位置座標は、0.01mオーダーの測位精度を有するGNSS相対測位で正確に押さえた。

SfM処理にはAgisoft社製Photoscan Professional1.4を使用した。解析処理では、空撮画像を読み込んで配列した後、各画像に写り込んだ測量杭と対空標識を抽出し、それぞれに現地で取得した座標データを定義した。これらは、モデルに地理座標系を定義させるための地上基準点、あるいはモデルの精度検証点として使用した。各時期とも、精度検証点における実測座標値とモデル推定座標値の誤差は、水平・垂直方向ともに0.10m以内に収まった。ゆえに、2時期の比較で±0.10m以上の差分が生じたら有意な地形変化とみなした¹⁰⁾。続いて、座標情報を有する高密度点群データを生成し、それを地形図作成ソフトウェア（GoldenSoftware社製Surfer12）に読み込んだ。そして、0.5m間隔のグリッドデータを作成し、差分解析により地形変化を視覚的に表現した。

4.2 隆起域の内部構造調査

隆起域の内部構造を把握することを目的に、地形・地質踏査に加え、表面波探査を実施した。表面波探査は、地盤の地表付近を伝わる表面波（レイリー波）をハンマー等の人工震源により発生させ、それを配置した受信器で測定し、逆解析することにより、深さ10～15mまでの地盤のS波速度分布を求める技術である。本研究では、

図-4 陸別川右岸側（地点X、図-2c）に露出した破碎帯（撮影日：2017年11月29日）

図ー5 牧草地上の隆起域を対象とした地形測量 (a)三時期の標高分布図, (b)三時期の地形断面図, (c)2016年4月と2017年5月の変化とその解釈

McSEIS-SW (応用地質株式会社製) を使用した。隆起域縦断方向に24mの探査測線を設定し, 1m間隔で起振・受信点を設置した。表面波探査から得られたS波速度分布や地質調査結果と実際の内部構造を比較・検討するために, 前述の表面波探査の測線上の隆起域頂部でボーリング調査を実施した。

5. 牧草地上の隆起域の地形と内部構造

5.1 地形とその変化

牧草地の所有者からの情報では, 隆起の発生以前は隆起域とその外の牧草地は連続した平坦な地形面であった。

国土地理院により公開されている1953年撮影の空中写真では, 牧草地のある場所は陸別川の氾濫原となっており, この牧草地の大部分は氾濫原を整地して作られたと考えられる。牧草地の直下には陸別川起源と思われる頁岩の円礫が多数認められた。

UAV-SfM技術により作成した標高分布図では, 2016年4月の牧草地上の隆起域の発見時から2018年11月18日まで, その輪郭は大きく変化していない (図ー5 a)。高さ方向の変化は, 2016年4月と2017年5月の間で明瞭であるが, 2017年5月から2018年11月までのデータでは一部河川の侵食による地形変化が認められるのみで, 隆起

高さの上昇は観測した限りでは起きていない(図-5 a, b)。ゆえに、2017年5月までに隆起域の成長は概ね終息していたと考えられる。尚、最初の発見時から2018年11月まで一貫して、隆起域全体の水平投影形状は、隆起域と隆起域外の牧草地の境界が東に開いた弧状である。隆起域の中で北西部の方が隆起域外との比高差は大きく、南東部の方が小さい。北西部の比高差の大きな部分は2つの丘が組み合わされた形状をしている。この顕著な2つの丘の牧草上には開口割れ目が認められ、それもSfM技術で図化できた。

地すべりの移動方向をX軸とし、Y軸にその標高を示した隆起域北西部の2つの丘の地形断面図(図-5 b, PおよびQ断面)によると、2016年4月から2017年5月までの地形変化は丘の北東端付近で大きく、南西につれてその隆起量は小さくなる傾向にある。しかし、南西端付近では再度隆起量が大きくなる。これは、PとQの両断面で共通して認められる。一方で、地すべりの移動方向に直交する方向に2つの丘の頂部を結んだR断面では、ほぼ一様に隆起していた。隆起域の南東側のS断面では、2016年4月から2017年5月の間に当初の隆起範囲よりも北東の前方が台状に隆起していた。

2016年4月と2017年5月の数値地形データを差分処理し、隆起域とその周辺で生じた微小地形変化を視覚化した結果が図-5 cである。これにより、隆起域が部分的には不均一に隆起をしていることが一層明確になる。特に陸別川に近い領域において、水平投影形状が北東方向へ凸な放物線形状をした複数の小隆起領域が認められる。これはPおよびQ断面にもある牧草地上の隆起域の南西端付近の隆起である(図-5 b, PおよびQ断面)。

5.2 隆起域の内部構造

5.2.1 表面波探査

牧草地上の隆起域の発見直後の2016年4月22日に、隆起域中央部のQ測線(図-2 c)に沿って表面波探査を実施した。S波速度は深さとともに徐々に上昇する傾向がみられたが、深さ4m付近に速度が低下する領域($V_s = 177 \sim 187 \text{ m/s}$)が認められた(図-6)。表面波探査で得られるS波速度は、土被り圧とともに大きくなる傾

向がある¹¹⁾。そのため、図-6でみられるような低速度領域の挟在は土層の緩み領域である可能性が高く、すなわちすべり層を捉えたものと解釈される。この低速度領域は、山側から隆起域頂部方向に向かって次第に上昇する傾向があり、最大で約10度の傾きをもっている。しかし、この低速度領域は、隆起頂部直下で不連続になった。

5.2.2 ボーリングコア観察

2018年6月下旬にQ測線上の隆起域頂部(図-2 c)でボーリングを実施した。ボーリング地点の地質構造は深さ0.48mまでが牧草および客土、0.48~3.18mが河床砂礫層、3.18~5.40mが風化の進んだ凝灰角礫岩層、5.40~6.40mは泥岩角礫・軽石砂・石炭を含む暗灰色のシルト・粘土層、6.40~8.00mは凝灰角礫岩層であった(図-6)。暗灰色のシルト・粘土層は地すべりのすべり層と推定される。すべり層の暗灰色の色調は陸別川沿いに認められたレンズ状の暗灰色粘土(図-4)と類似している。

6. 考察—隆起域の成長プロセス

牧草地上の隆起域は、2016年4月の発見時にほぼその大まかな形状が完成していたが、2016年4月と2018年11月の間のUAV-SfM技術による測量によって、それに引き続くさらなる地形変化が観測できた。ゆえに、そこから牧草地上の隆起域の成長プロセスが考察可能である。本章では、得られた内部構造に関するデータからその成長プロセスに関して考察を行う。

ボーリングと表面波探査の実施時期は異なり、ボーリング地点は二時期で約1m高さが異なる。そのために直ちに比較はできないが、その高さの相違を復元して検討すると、ボーリング調査により観察できたすべり層の深度は表面波探査実施時に得られた低速度領域の深度と一致する(図-6)。ボーリング調査により判明したすべり層は、観察による限り1カ所であることは一致しているが、幅約40cmに達する。表面波速度の結果(図-6)では、低速度領域の姿勢は隆起域の頂部に近づくに従って低角度から高角度になり、隆起域の頂部直下付近で不連続になっていた。また、低速度領域はボーリング地点

図-6 隆起域中央部のS波速度分布(2016年4月22日実施)とボーリング柱状図(2018年6月20-23日実施)

下において、次第に薄くなり不明瞭となる。この解釈としては、表面波探査を行った2016年4月時点では地すべりのすべり層の伸展がボーリング地点下より前方(北側)には伸展していなかったか、十分なすべり層の厚化が進んでいなかったと考えられる。表面波探査実施の後、おそらく隆起の成長と共に、ボーリング掘削を行った2018年時点までにすべり層が40cmの厚さに達するまで成長したと考えられる。

一方で、低速度領域を除いてS波速度の等値線は、概ね隆起した地表面に平行である。また、牧草地上の隆起域の地形表面にも乱れは少ないことから、隆起域は延性的に地層が屈曲変形していると考えることができる。つまり、隆起域は褶曲と考えることができる。そうなれば、この隆起域直下に認められた地層構造は地すべりのすべり層を断層とする断層関連褶曲¹²⁾であると考えられる。

断層関連褶曲とはデコルマンまたは衝上断層に伴って形成される褶曲の一種であり、衝上断層に伴って形成される形態としては断層折れ曲がり褶曲、断層伝搬褶曲が存在する。表面波探査の結果から、少なくとも2016年4月までは西側(山側)の地質が西側の牧草地側に衝上する断層が隆起域の直下で形成されており、その断層先端は隆起域の頂部直下と推察される。この形態は断層伝搬褶曲に類似するが、断層伝搬褶曲では断層先端直上にキンク褶曲が形成されるが、キンク褶曲の結果、隆起域の前縁は破壊されて崩壊した(図-2b)。しかしながら、断層折れ曲がり褶曲または断層伝搬褶曲であったとしても褶曲の両翼の傾斜が非対称になり、これは隆起域の非対称な縦断面の形状とも一致する。なお、地すべりが形成する断層伝搬褶曲に関しては、山崎ほか(2017)²⁾が前述した北海道羅臼町幌萌海岸の地すべりに関して存在を指摘しており、詳しい解説がなされている。

2016年4月から2017年5月までの観測で認められた隆起域山側(西側)の凸状の小隆起は、牧草地側(東側)への地すべり移動体の覆瓦状の衝上断層の形成によるものと考えられる。隆起域の牧草地側北西側端部では、水平方向への拡大は限定的であった。これは地すべり移動体の移動が前方の地質により阻害され、隆起域の前縁では圧縮変形が発生したために断層関連褶曲の形成がなされたが、さらに隆起域の後方にも新たな衝上断層が形成されることとなったと考えられる。これに関しては、田近・永田(2016)¹³⁾も、断層関連褶曲による隆起に、背後から衝上断層が覆瓦状に重なった覆瓦褶曲タイプの隆起であると指摘している。また、山側の小丘地形においても、地すべりの形状から考えられる最大主応力軸と平行に亀裂が生じて破断を起こしており、この小丘にまで圧縮領域が及んでいたと推測される。

UAV-SfM技術による隆起域の地形測量では、2017年5月の空撮以降に有意な地形変化は認められないことから、斜面変動と隆起域の成長は沈静化したものと推定される。しかし、この隆起域は前方の地質と衝突して停止

していることから、もし隆起域を大規模に開削した場合には再活動することも懸念される。

7. まとめ

2016年4月に北海道陸別町上陸別の牧草地で発見された地すべりに伴う隆起現象に関して、その地形変化と内部構造を調査し、成長プロセスを考察した。これまでに得られた結果は、以下の通りである。

- 1) UAV-SfM技術による多時期地形測量では、隆起域の成長と隆起量のばらつきが詳細に捉えられた。隆起量は隆起域北西部で大きく、特に隆起域頂部付近と覆瓦状の小隆起が形成された山側で顕著であった。2017年5月の観測以降、隆起域の成長は沈静化している。
- 2) 表面波探査から得られたS波速度分布では、深さ4m付近に低角度で前方へ上昇する低速度領域が認められ、それは頂部に向かって次第に角度が上昇する傾向があった。低速度領域に相当する深度には、すべり層に相当するシルト・粘土層が挟在していた。このことから、低速度領域はすべり層付近での地盤の緩みを反映したものであり、表面波探査の結果からすべり層が隆起域直下で衝上していることが示された。
- 3) 地形変化と内部構造に関する調査結果から、この隆起現象は地すべりのすべり層を断層とする断層伝搬褶曲の成長に伴い生じたと推定される。陸別川河床下を通過したすべり層は、牧草地直下で前方の地質体に前進を阻害されて褶曲・衝上し、隆起域を成長させた。その後も背後斜面からの圧縮が継続した結果、隆起域は頂部付近を中心に隆起高さが上昇するとともに、すべり層が複数に分岐して隆起域を乗り上げるように前進し、覆瓦状に重なる地表面形態を形成した。

謝辞

調査に際し、ビクトリー牧場の畠野健一氏には牧草地への立ち入り許可を頂くとともに、隆起現象に関する有益な情報を頂いた。元北見工業大学の伊藤陽司氏、(株)ドーコンの田近淳氏には、現地の地質に関してご教授頂いた。また、本研究には日本地すべり学会研究助成の一部を使用した。記して、御礼を申し上げる。

引用文献

- 1) 川上源太郎・山崎新太郎・伊藤陽司・高橋良・渡邊達也・奥水健一・田近淳(2015): 北海道、羅臼町幌萌地すべり: 海岸を隆起させた岩盤すべり, 第54回日本地すべり学会発表研究会講演集, pp. 13-14.
- 2) 山崎勉・柳沢志樹・足立達也・小野由紀光・山村満(2017): 雁行褶曲をともなう非構造性断層伝播褶曲の形成機構, 日本地すべり学会誌, Vol. 54, No. 1, pp. 13-20.
- 3) Peternel, T., Kumelj, Š., Oštir, K. and Komac, M. (2017): Monitoring the Potoška planina landslide (NW Slovenia) using UAV photogrammetry and tachymetric measurements. Landslides, Vol. 14, No. 1, pp. 395-406.

- 4) 三谷勝利・藤原哲夫・石川昭三 (1960): 5 万分の 1 地質図幅「上足寄」および同説明書, 北海道開発庁, 57p.
- 5) 山口昇一・沢村孝之助 (1965): 5 万分の 1 地質図幅「本岐」および同説明書, 地質調査所, 42p.
- 6) 長谷川健・中川光弘 (2007): 北海道東部, 阿寒カルデラ周辺の前—中期更新世火砕堆積物の層序, 地質学雑誌, Vol. 113, No. 2, pp. 53–72.
- 7) 柴田賢・棚井敏雅 (1982): 北海道新第三紀火山岩類の K–Ar 年代, 北海道の新第三紀の生層序に関する総合研究, pp. 75–79.
- 8) 松井愈・雁沢好博 (2000): 東部北海道の漸新—中新統・川上層群—足寄動物群の産出層と地質時代, 松井愈教授記念論文集, pp. 137–143.
- 9) 伊藤陽司 (1994): 北海道, 網走・北見・津別地域の地すべり (第 5 報) – 津別地域での地すべり地形の特徴と最近の地すべり, 北見工業大学研究報告, Vol. 25, No. 2, pp. 279–291.
- 10) 渡邊達也・山崎新太郎・亀田純 (2018): 小型無人航空機と GNSS を利用した数値地表モデルの作成実習, 地質学雑誌, Vol. 124, No. 8, pp. 643–649.
- 11) 川尻峻三・澁谷啓・川口貴之・鳥居宣之 (2009): 現場調査および室内試験による砂丘斜面の安定性の評価, 地盤工学ジャーナル, Vol. 4, No. 3, pp. 233–244.
- 12) 天野一男・狩野健一 (2009): フィールドジオロジー 6 構造地質学, 共立出版, 177p.
- 13) 田近淳・永田秀尚 (2016): 地すべりの「末端隆起」: その多様な成因, 日本応用地質学会平成 28 年度研究発表会講演論文集, pp. 105–106.

(原稿受付 2019 年 3 月 4 日, 原稿受理 2019 年 7 月 22 日)