



応用地質学的視点からみた山体重力変形地形研究の進展と展望

Recent progress and future perspective of research on deep-seated gravitational slope deformation in Japan from the engineering geological viewpoint

Abstract

Deep-seated gravitational slope deformation (DSGSD) creates characteristic geomorphological features, such as double (or multiple) ridges, uphill-facing scarps, downhill-facing scarps, and ridge-top depressions, which had been considered periglacial landforms until the 1970s. Research on such topographical features is important for landslide disaster mitigation, because they might develop into deep-seated, large-scale, and catastrophic landslides. This paper reviews the terminology, research history and perspective, as well as formation factors of DSGSD and related geomorphic features in Japan, mainly from the viewpoint of engineering geology.

The first paper to clearly propose that geomorphological features such as linear depressions were formed by DSGSD was published in 1980 in a study of the Hida Mountains. Many subsequent examples of DSGSD-related topographies have been reported, not only in alpine zones above the timberline, but also under forest canopy on low mountains. Some authors have successfully estimated the formation ages of these topographical features using radiocarbon dating and tephrochronology. Recent development of LiDAR (Light Detection and Ranging or Laser Imaging Detection and Ranging) surveying has revealed that uncountable DSGSD topographic features are present under forest canopy in low-altitude, high-relief mountainous areas that are difficult to access. The distribution of DSGSD topographic features is not homogeneous: their development is closely related to geomorphological and geological factors such as the relief of mountains, the amount of Quaternary uplift, and the orientation of foliation planes in basement rocks. The formation of some DSGSD topographic features might be triggered by earthquakes. In the future, we need clear criteria to differentiate and classify DSGSD-related topographic features when assessing the risk of landslide disasters.

Keywords: deep-seated gravitational slope deformation, double ridges, multiple ridges, uphill-facing scarp, downhill-facing scarp, ridge-top depression

小嶋 智*

Satoru Kojima*

2018年2月26日受付.

2018年6月17日受理.

* 岐阜大学工学部社会基盤工学科
Department of Civil Engineering, Gifu University, Gifu 501-1193, Japan

Corresponding author: S. Kojima,
skojima@gifu-u.ac.jp

はじめに

日本の中部山岳の高山帯には、二重(多重)山稜と呼ばれる稜線が2つ(またはそれ以上)に分岐・並走する地形があることが古くから知られており、登山者の間では迷いやすい地形として注意されていた(Fig. 1)。また、多くの地形学者は、諸外国の研究例を参考に、この地形を周氷河地形と考えていた(例えば、辻村, 1932; 式, 1961)。しかし1980年頃から、二重山稜は、山体が重力の影響下で変形した結果形成された重力地形(岩田, 2003)と考えられるようになった(例えば、清水ほか, 1980; 大八木・横山, 1996)。近年の航空レーザ測量技術(LiDAR: Light Detection and Ranging or La-

ser Imaging Detection and Ranging)の進歩の結果、二重山稜などの、山体が重力の影響で変形した結果形成された重力地形(以下本論では山体重力変形地形と表記する)は高山帯だけではなく森林限界よりも標高の低い山地帯にも普遍的に分布することが知られるようになった(Fig. 2, 例えば、千木良, 2007, 2013; 小嶋ほか, 2012; Chigira et al., 2013; Kaneda and Kono, 2017)。このような状況の中、Chigira et al. (2013)は、2011年の紀伊半島豪雨災害の際に発生した深層崩壊前後の地形を比較し、山体重力変形地形が深層崩壊の前兆現象であることを示した。これにより、山体重力変形地形の防災上の意義が議論されるようになり、地形学のみならず応用地質学的にもその研究の重要性が高くなった。



Fig. 1. Example of double ridges (arrows) on Kotaro-one Ridge, north of Mt. Kitadake, Akaishi Mountains.

本総説では、国内の山体重力変形地形に関するこれまでの研究をレビューし、今後の研究の展望について私案を示したい。諸外国の研究については、Crosta et al.(2013)などのレビューを参照していただきたい。本総説は日本地質学会125周年応用地質特集号中の総説という位置付けなので、地形学・地理学的観点からではなく、応用地質学的立場から行われた研究を重点的にレビューするよう心がけた。また、本特集号の目的は「日本の地質学100年」(日本地質学会, 1993)以降の研究の進展をレビューすることであるが、本分野の研究について「日本の地質学100年」では取り上げられていないので、1985年以前の研究にも触れることとする。なお、山体が重力の作用により変形する岩盤クリープと崩壊につい

ては、千木良(1998)がその時点までの研究のまとめを行っている。

山体重力変形地形に関する用語

山体重力変形地形を扱う学問は発展途上なので、山体重力変形地形およびそれに関連する用語は現時点では統一されておらず、高見(2015)も述べているように様々なものがある。ここでは重力を原因とするマスムーブメント、斜面変動に関する用語のうち、山体重力変形地形に関連の深いものを取りあげ、運動に関する用語、地質現象に関する用語、地形に関する用語に分けて概説する。

1. 運動に関する用語

運動に関する用語には、岩盤クリープ、サギング、DSGSDなどの用語がある。岩盤クリープは、岩盤が連続的なすべり面を伴わないで、(地表近くで)重力によって徐々に変形・破壊する現象を指す用語である(例えば、千木良, 1995, 1998)。サギングは、最初、Zischinsky(1966)により Sackung(独)として提案された言葉で、英語の sagging(たるむ、垂れ下がる)に相当し、日本語でもサギングとカタカナ表記される。サギングは、重力により、上部でせん断破壊した斜面が下部では垂れ下がるように変位する現象を指す。近年、国際的には deep-seated gravitational slope deformation (DSGSD あるいは DGSD と略されることが多い)という用語がよく用いられる(例えば、Crosta et al., 2013)。この用語は山体斜面が重力的に深部まで変形する運動を指す。岩盤クリープが、地下深部のみならず地表面付近の岩盤の連続的な変形にも使われる(例えば、千木良, 1995; 横山・柏木, 1996; 柏木・横山, 2010 など)のに対して、DSGSD は地下深部の変形を意味する点で異なる

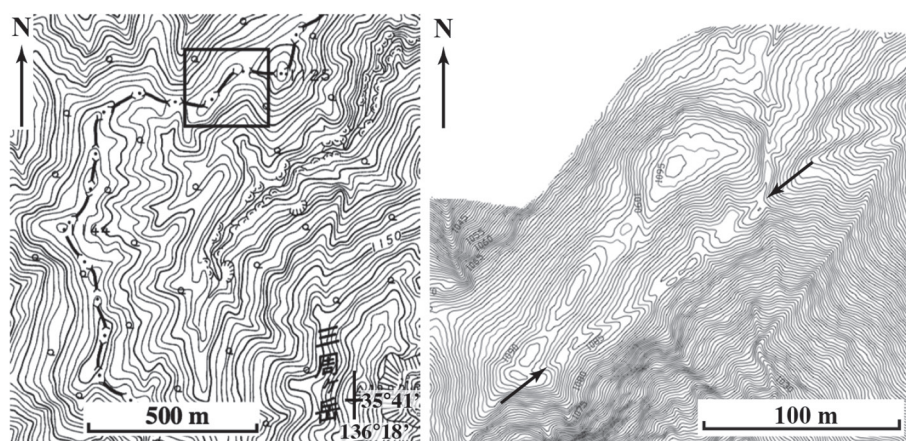


Fig. 2. Topographic maps of the mountain range near the boundary between Gifu and Fukui prefectures. Left panel: Subregion of the 1:25,000 scale topographic map “Hirono” published by the Geospatial Information Authority of Japan. The contour interval is 10 m. Right: Topographic map made using a 1-m-resolution DEM acquired using LiDAR and GIS software (ArcGIS). Contour interval is 1 m. The map extent is indicated by the black rectangle in the left panel. The topographic features related to the deep-seated gravitational slope deformation (linear depression between two arrows) are clearly identified on a map of this scale. The DEM data were provided by the Etsumi Sankei Sabo Office, Chubu Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan.

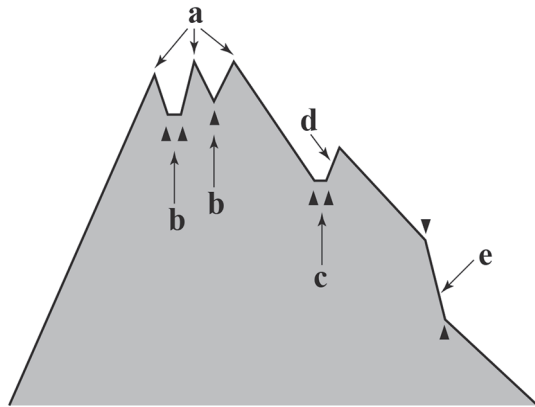


Fig. 3. Classification and nomenclature of topographic features related to deep-seated gravitational slope deformation. a: double (multiple) ridges; b: linear (ridge-top) depression; c: linear depression; d: uphill-facing scarp or scarplet; e: downhill-facing scarp or scarplet. Triangles indicate breaks in slope.

2. 地質現象に関する用語

斜面変動の結果形成される地質構造で、山体重力変形地形研究に関連してよく使われる用語に重力性断層がある。構造地質学の分野では、断層はその運動センスに基づいて分類されるが、重力性断層という用語は成因に基づいた用語である。重力により形成されることからノンテクトニック断層の一種であり、重力性ノンテクトニック断層と呼ばれることもある(ノンテクトニック断層研究会, 2015)。山体重力変形地形に伴って現れる重力性断層は、そのほとんどが正断層である。

3. 地形に関する用語

次に、山体が重力により変形した結果形成された可能性のある地形についてまとめておく。なお、これらの用語は記載学的なものなので、全ての地形の形成要因が重力によるものであるか否かは問っていない。二重(多重)山稜(稜線)(double ridges, multiple ridges)は、前述のように稜線が二重あるいは多重に分歧・並走した地形を指す(Figs. 1, 3)。主稜線に平行に別の稜線が現れる場合や、ある稜線を辿ると徐々に不明瞭となり、平行して現れた稜線が徐々に明瞭となり主稜線となる場合などがある。2本の稜線の間は凹地となり、その形態から線状凹地(linear depression)あるいは発達場所から山上凹地(ridge-top depression)と呼ばれる。斜面の途中に形成された小崖のうち、稜線に向かって傾斜する小崖は、山向き小崖(uphill-facing scarp or scarplet)、尾根向き小崖(ridge-facing scarp or scarplet)、逆向き小崖(reverse scarp or scarplet)と呼ばれている。逆に、緩傾斜斜面の途中に、谷側に急傾斜した小崖が見られる場合があり、谷向き小崖(downhill-facing scarp or scarplet)などと呼ばれている。谷向き小崖の中にも重力変形の結果形成されたものがあると思われる。これらをまとめて、単に小崖地形(scarplet)と呼ぶこともある。山向き小崖と上部斜面の間の凹地は、二重山稜等と同様、線状凹地と呼ばれる。なお、近

年、地形学の分野では小崖の代わりに低崖という語が使われることも多い(富田ほか, 2010; 西井・池田, 2013; 佐藤・苅谷, 2005, 2014 など)。その他、斜面の膨らみ(バルジング)なども重力変形地形と考えてよいであろう。地すべり地形を分類する際に、上記の地形のほとんどを包含した初期的斜面運動地形という用語が用いられることがある。この用語は、山体重力変形を地すべりの発達段階の一過程と捉えたものである(例えば、大八木・横山, 1996)。

日本における山体重力変形地形研究

前述のように、二重(多重)山稜は古くは周氷河地形と考えられていた。海外では、1960年代には既に、この種の地形を山体の大規模な重力による変形に関連付けて考えられていた(例えば、Beck, 1968)が、日本でも1970年代の終わり頃からこれらの地形が重力性であるとの指摘がなされるようになった(古谷, 1979; 清水ほか, 1980 など)。中でも清水ほか(1980)はその最初の詳細な研究報告の一つであろう。ここではまず清水ほかの研究についてやや詳しく紹介する。清水ほか(1980)は、飛騨山脈の野口五郎岳(標高2,924 m)付近に発達する山体重力変形地形がつくる小崖地形(重力性低断層崖と呼ばれている)群の形態・規模の特徴を調査し、その成因を考察した。野口五郎岳周辺の地質は、一部にアプライト脈を伴うものの、大部分が均質な花崗岩からなる。小崖地形は形態的には稜線に平行な山向き小崖で、長さ数100 m、崖高数 m のものがほとんどである。複数の小崖地形が雁行配列し、稜線に近いものは直線状で、離れるにつれて弧状となる傾向がある。小崖の分布標高は標高2,300 mよりも高く、植生・森林限界とは関係無く、谷底から一定の高さにならないと発達しない。小崖の上下の斜面上の(微)地形には連続性が認められる。さらに、この地域の地質は均質な花崗岩で構成されていることは、この小崖が差別侵食による組織地形ではないことを示している。以上のような特徴から、清水ほか(1980)は、これらの小崖地形が重力性の正断層崖であると結論付けている。

その翌年、八木(1981)は東北地方から中部地方の広い地域から標高1,000 m以上の23地域をとりあげ、これら地域の山脈・山地に分布する小崖地形を空中写真判読により抽出し、その地形的特徴を報告した。その中で八木(1981)は、小崖地形は標高の高い山地に多いが1,000 m以下の低山にも認められること、起伏量の大きな山地に多いこと、急な下部斜面をもつ緩やかな上部斜面上に多いことを示した。これらの地形的な特徴と、併せて行われた数値実験の結果から、小崖地形は重力性正断層により形成されたと考察した。

柳町(1982)は、木曾山脈に広く分布する北東-南西方向の線状凹地から檜尾岳～熊沢岳のものゝ代表としてとりあげ、その成因と形成環境を考察した。清水ほか(1980)は、小崖地形が正断層の活動によって形成されたと推定したが、直接的な証拠を示したわけではない。しかし、柳町(1982)は檜尾岳地域の断層の断層面上に形成された条線を観察し、この断層が横ずれ成分を伴う正断層であることを示した。また、その活動時期を化石周氷河地形との関係から晩氷期以降

と推定した。柳町(1982)は、これらの正断層をテクトニクなものと考えたが、現在の知見に照らせば、それらはノンテクトニクな山体重力変形地形である可能性が高い。しかし、断層露頭を観察し、その運動センスを決定し、運動時期を推定したことは注目に値する。

松岡(1985)は赤石山脈の北岳(標高 3,193 m)から茶臼岳(標高 2,604 m)に至る主稜線上に発達する線状凹地を調査し、その分布密度が地質構造と岩相に規制されていることを示した。具体的には、地層(四万十帯の砂岩、頁岩などを主体とする堆積岩)の走向と尾根の伸びの方向が一致する場合によく発達することを示した。松岡(1985)は、その成因を「局地的な応力場」による正断層変位に帰し、その断層面は層理面と一致すると考察している。つまり、この地域の線状凹地が、広域応力場によりテクトニクに形成されたものではなくノンテクトニク断層(ノンテクトニク断層研究会, 2015)により形成されたことを明らかにした。

その後、1990年代から2000年代にかけても、同様な事例研究が多数行われた。それらのうちの代表的な事例を、主として応用地質学的視点(地すべりと関連性)から紹介する。Chigira(1992)、Chigira and Kiho(1994)は、山梨県南西部の七面山や赤石山脈(特に赤崩、千枚岳崩)の崩壊の原因が岩盤クリープによるものであり、その地表面への現れとして多重山稜、山向き小崖、線状凹地などの地形が形成されていることを示した。八木(1993)は、東北地方の真昼山地に発達する小崖地形の発達過程をトッピングや地震動と関連付けて議論した。それを含め八木(1996)では、多重山稜の発達メカニズムごとに、並進すべり(translational slide)による事例としてネパールの低ヒマラヤ前縁帯に位置するMahabharat山脈、基岩側方伸長すべり(block glide)による事例として同じくネパールのダウラギリ南西の山塊などを取り上げ記載した。古谷(1998)は、地すべりと地質、地質構造の関係について議論し、その中で、地すべりの発生・発達とサギング地形の形成の関連性を考察した。田近ほか(2001)は、1997年に北海道松前半島北東部、知内町の頁岩層からなる切土法面で発生した小規模な地すべり斜面では、すべりに先立って岩盤クリープが生じていたこと、その斜面上部には線状凹地が形成されていたことを報告した。渡(2005)は、地すべり対策工の施工現場や自然斜面において、重力変形による斜面の「ゆるみ」と、ある面に沿った斜面の「すべり」が共存する例を示し、「ゆるみ」の進行が「すべり」へと発展することや「ゆるみ」が地すべりの予知に利用できる可能性を議論した。Chigira(2009)は、2005年9月の豪雨災害の際に発生した、宮崎県の耳川流域の5箇所の大規模地すべりの調査を行い、これらの地域では地すべり発生前に重力変形が進んでいて、谷向き小崖が発達していたことを示した。平石・千木良(2011)は、紀伊半島の十津川支流、中原川流域の遷急線、山体重力変形地形などの地形と地質構造を検討し、隆起による侵食基準面の低下、遷急点の上流への後退、流れ盤斜面における重力変形という地形発達史を復元した。

防災科学技術研究所は日本全土をほぼカバーする5万分

の1縮尺の地すべり地形分布図を、1981–2014年に刊行した[URL1]。この図の中には、地すべり地形以外に、「斜面体の移動の初期状態、基岩から分離していないとしても不安定域・移動域と推定される範囲」が図示されている。この範囲の中および周辺には、斜面の重力変形に付随して形成された山体重力変形地形が分布することが推定される。範囲は狭いが、佐藤・荻谷(2014)は飛驒山脈北部の地すべり地形学図を出版し、タイプAの「地すべり地形」として二重山稜や尾根向き低崖を識別している。また、日本地すべり学会誌にシリーズとして掲載されている「空から見る日本の地すべり地形シリーズ」には、空撮写真とともに山体重力変形地形が紹介されているものがあり資料としての価値が高い(例えば、八木・井口, 2017)。

欧米諸国で山体重力変形地形の研究が盛んなヨーロッパアルプスや北米のロッキー山脈では、主稜線の標高は森林限界より高く、重力変形の結果形成された線状凹地は岩屑で埋められていることが多い。一方、日本の中部山岳地域の森林限界は2,500 m程度の標高にあるため、それより低い位置にある線状凹地は、現在は有機質堆積物で埋積されている。したがって、放射性炭素同位体年代による堆積物の年代決定が可能なことが多い。さらに、火山国であることから広域テフラによる線状凹地埋積堆積物の年代推定も可能な場合が多い。このような理由により、日本では山体重力変形地形の発達過程を推定する研究が盛んとなった。いくつかの予察的な先行研究や山体重力変形地形の発達過程の解明を目的としていない研究(例えば、Takada et al., 1990 など)はあるが、このような手法による最初の注目すべき研究は、目代・千木良(2004)であろう。彼らは、赤石山脈南部の大谷崩から山伏の地域に発達する線状凹地には、稜線に近い大規模な山上凹地とその下位に分布する小規模な山向き小崖の2種があることを示した。さらに、トレンチ調査によりこれらの凹地の埋積堆積物の層相を明らかにし、テフラ解析によりその年代を求め、上位の線状凹地は約2万年前には既に形成されており、下位の山向き小崖は約1万年前に形成が開始されたことを明らかにした。その後、加藤・千木良(2009)は、四国の法皇山脈にみられる山上凹地の形成過程を、その北麓を通過する中央構造線の活動に関連づけて議論した。それによれば、本地域の山上凹地は5万以上前に形成され湖沼環境となり、その湖沼は2.4万年前には(中央構造線を震源断層とする地震活動により?)決壊した。また、Kojima et al.(2015)は、岐阜–福井県境の冠山(標高 1,257 m)北西地域、紀伊半島のツエノ峰(標高 645 m)地域などに発達する二重山稜について、野外調査、ボーリング調査などを行い、その発達過程を考察した。冠山北西の二重山稜の間の凹地は泥質堆積物により埋められ、そこに挟まれる植物遺体のAMS-¹⁴C年代、鬼界アカホヤテフラ(K-Ah, 7.3 ka)(広域テフラの名称、省略形、年代は町田・新井, 2003による。以下同じ)の層準などから、線状凹地は約1万年前に形成されたことを明らかにした。また、ツエノ峰地域の二重山稜の間の凹地を埋める堆積物には、下位から鬼界葛原テフラ(K-TZ, ca. 95 ka)、九重第1テフラ(Kj-P1, 50 ka)、始良Tn

テフラ(AT, 28–30 ka)が挟まれ、約 10 万年前にはすでに形成されていたこと、そしてこの二重山稜はその後安定して存続している地形であることが示された。

山体重力変形地形をつくる作用の原因は、一般に地下にあると考えられる。そこで、山体重力変形地形の地下構造がどうなっているのかを検討した研究もある。赤石山脈の間ノ岳南東のアレ沢は現在も崩壊を繰り返しているが、その源頭稜線には多くの線状凹地が認められる(Nishii and Matsuoka, 2010)。西井・池田(2011)はアレ沢崩壊地頂部の一つの線状凹地を横切る測線に沿って電気探査を行い、その地下構造を推定した。その結果、地下のすべり面に沿って比抵抗が変化すること、時期の異なる観測を行うことにより地下の水分変化を捉えることが可能なことを示した。その後、西井・池田(2013)は飛驒山脈、赤石山脈の 5 箇所で電気探査を行い、同様な結果を得ている。西井・池田(2011, 2013)の調査地域の多くは森林限界よりも高く、線状凹地は岩屑により埋められている場合がほとんどであるが、小嶋ほか(2015)は標高 1,000 m 程度的美濃山地の線状凹地の地下構造をハンドオーガーボーリングと電気探査により推定した。この凹地は美濃帯の中生層分布域に形成され、泥質堆積物や腐植土により埋積されており、基盤と堆積物の比抵抗のコントラストが大きいこと、堆積物の形状が明瞭に示された。その結果、堆積物は東方向(すべりの移動方向)に向かって浅くなる楔形を呈し、重力変形が後方への回転運動であったことが示唆された。

山体重力変形地形が大規模崩壊の前兆現象である可能性は、古くは古谷(1979)、岩松・下川(1986)などにより指摘され、空中写真を用いた解析による指摘もなされていた(八木ほか, 2004 など)が、航空レーザ測量技術の進歩により、より精密な考察ができるようになった。航空レーザ測量は、1990 年頃に実用化され、2000 年頃からは、国土保全、災害調査などの目的で国・地方自治体などにより、多くの地域で行われるようになった。航空レーザ測量の結果得られた高密度の数値標高モデル(DEM: digital elevation model)から作成された地形図は、驚くべき精度をもち、それまでの 25,000 分の 1 地形図を用いていた地形・地質調査に「革命」をもたらした。山体重力変形地形の調査に関しても同様で、それまで認識できなかった微地形や、植生が濃密で地形調査に適した無雪期には人を寄せ付けなかった山岳地域にも山体重力変形地形が無数に存在することを明らかにした(例えば、千木良, 2007; 小嶋ほか, 2012; Kaneda and Kono, 2017)。Chigira et al.(2013)は、2011 年の紀伊半島豪雨災害の際に発生した深層崩壊前後の航空レーザ測量によって得られた詳細な地形図を比較し、ほとんど全ての深層崩壊発生斜面には前兆現象としての山体重力変形地形(そのほとんどは谷向き小崖)が認められることを報告した。これまでは、深層崩壊発生前に航空レーザ測量が行われていることはあまりなかったが、日本の国土の大部分について詳細な DEM が整備されつつあるので、今後はこのような調査・解析が可能になるケースが多くなると予想される。さらに、千木良(2015)は、これまでの事例研究を総括し、降雨による深層

崩壊の危険度を、地質体・地質構造とそこにみられる山体重力変形地形により I から IV までの 4 段階に区分している。このような一般化が可能であれば、現地における地質調査が必要ではあるが、山体重力変形地形の存否とそのタイプによって危険な斜面を段階的にスクリーニングすることができ、斜面防災上、非常に有益な評価を行うことができると期待される。

山体重力変形地形の形成要因

1. 地形学的・地質学的要因

多重山稜や山向き小崖といった山体重力変形地形は高山から低山まで普遍的に存在するが、その分布には偏りがある。この偏りの原因は、主として地形学的要因と地質学的要因であると考えられている。前述のように、八木(1981)は、東北地方から中部地方の広い地域について空中写真判読を行い、この地域に分布する山体重力変形地形は、第四紀中の隆起量の大きな山地に多いこと、急な下部斜面をもつ緩やかな上部斜面上に多いことを示した。また、永田ほか(2006)は、20 万分の 1 地勢図「岐阜」の範囲について、25,000 分の 1 地形図から読み取った線状凹地の分布と地形・地質の関係を GIS ソフトウェアを用いて解析した。その結果、線状凹地は地すべり地形と密接に伴うものが多いがそうでないものもあること、その分布は標高 800–1,200 m の侵食小起伏面がそれより高い位置に多いこと、その発生頻度は地すべりが発生しやすい地質単位と概ね一致することを示した。法橋・大塚(2009)は、飛驒山脈の蝶ヶ岳(標高 2,664 m)に発達する多重山稜が、基盤の美濃帯中生層の地質構造に規制されて発達していることを示した。すなわち、基盤岩の面構造と平行に線状凹地などの地形が形成されることを指摘した。同様の指摘は、既に松岡(1985)など多くの研究者によりなされている。

まとめると、山体重力変形地形は以下のような分布の特徴を持つ。

- ・起伏量の大きな山地に多い。
- ・谷底から一定の比高をもつ稜線・斜面に発達する。
- ・稜線の方向と平行に発達する。
- ・遷急線(開析前線)上部の緩斜面によく発達する。
- ・頁岩・結晶片岩のような面構造を持つ岩石によく発達するが、花崗岩のような塊状の岩石にも見られる。
- ・面構造の走向と稜線の方向が一致する場所によく発達する。

一方、西井(2009)は、飛驒山脈烏帽子岳周辺の花崗岩分布地域で調査を行い、線状凹地は下部斜面で崩壊が多発している場合や、風化が進行し岩盤引張強度が低下している場合により発達しやすいことを示した。また、Kaneda and Kono(2017)は、岐阜県と福井県の県境付近にひろがる越美山系(約 819 km²)に分布する合計 10,487 の山向き小崖と谷向き小崖の分布の特徴を、GIS を用いて解析した。その結果、これらの小崖地形の分布は、地質・活断層などより斜面傾斜・標高・ridgeness(尾根地形か谷地形か)といった地形学的特徴との相関が高いことを示した。

2. 地震動の関与

前述のように、八木(1993)は、東北地方の真昼山地に発達する小崖地形の発達過程を地震動と関連付けて議論している。具体的には、もともと水平に堆積したと思われる凹地埋積堆積物が70°ほど傾斜し、そこに十和田aテフラ(To-a, AD 915)が挟んでいることなどから、1896年の陸羽地震(M=7.2)が山体重力変形地形の形成に関与している可能性があると述べている。また、大丸ほか(2011)は岩手・宮城内陸地震(2008年)の際に、既存の線状凹地内部に新たに亀裂が発生したことを示している。山地ではないが、同様の現象が1993年釧路沖地震の際にもみられたことが、北海道厚岸町から報告されている(納谷ほか, 1997)。小村ほか(2016)は岐阜—福井県境の根尾谷断層北端部の山体重力変形地形が密集して分布する地域を調査した。具体的には、5箇所の線状凹地の埋積堆積物をハンドオーガーボーリング、ピット掘削により採取・解析し、それらが古いもので10 ka、新しいもので1~3 kaに生じた、形成年代の異なる凹地であることを示した。また、そのうちの2箇所では、埋積堆積物が変形していること、崖から供給された礫質な堆積物が挟まれることから、複数回の変形イベントが推定され、最新変形イベントは根尾谷断層の1891年の活動に対応すると推測している。

山体重力変形地形研究の展望

二重(多重)山稜、山向き小崖などは地形を記載する用語であり、その成因には様々なものがある可能性がある。例えば、侵食に対する抵抗力の異なる地層が急傾斜で互層する場合、差別侵食によって二重山稜ができることがある。それ以外にも、断層、節理、岩脈などの地質構造により線状の凹地形が形成される。また、Kaneda and Kono(2017)は、精度の高いDEMを利用する場合は、鹿垣のようなひじょうに小規模な人工的構造物を山体重力変形地形と見誤る可能性を述べている。これらの地形と山体重力変形地形は、野外調査により識別が可能であるが、現地に行くことなく(あるいは行くことができない場合に)、両者を識別する方法の確立が望まれる。

山体重力変形地形の中には、形成後安定し、長い間存続しているものがある。例えば、Kojima et al.(2015)は、紀伊半島のツエノ峰の稜線上の凹地が、過去約10万年間の堆積物によって埋積されていることを示した。したがって、この山体重力変形地形は、近い将来崩壊することを示唆する、防災政策上役立つような深層崩壊の前兆現象とすることはできないであろう。一般に、遷急線(滑落崖)の直上の緩斜面にある山体重力変形地形は深層崩壊の前兆、遷急線から大きく離れた斜面上部や尾根部に存在する山体重力変形地形は長い歴史をもち前兆とは言い難いと考えられるが、この仮説が正しいか否かを明らかにする研究が望まれる。さらに、千木良(2015)が示したような重力変形地形や地質構造の種類・特徴に基づいた危険度の汎用化・高精度化が期待される。

山体重力変形地形の形成史を検討した事例をみると、約1万年前の最終氷期終了後の気候の温暖湿潤化に伴って形成さ

れたものが多いように思われる(例えば、Kojima et al., 2015)。既に、Kobayashi(1956)も、二重山稜の周水河地形説に疑問を呈し、地下に浸み込んだ表層水が細粒物質を洗い流し、その結果陥没が起こったためにできた窪地ではないかとしている。このような現象がおこるためには豊富な表層水が必要となるため、線状凹地は氷河期よりは氷河期後に形成されたと推論している。ヨーロッパアルプスなどの地域の研究でも最終氷期後の氷河融解による応力解放が重要視されている。山体重力変形地形の形成と第四紀環境変動との関連は、日本、あるいは世界の様々な気候帯ごとに、そしてある地域をとれば標高ごとに検討されることが期待される。

謝 辞

日本地質学会応用地質部会の諸兄には本総説を執筆する機会を与えていただいた。共同研究者である永田秀尚、金田平太郎氏には野外調査・室内解析で多くの示唆を頂いた。千葉大学の服部克巳氏には電気比抵抗探査、岐阜大学の村田芳信氏には地震波探査、勝田長貴氏には化学分析でお世話になった。岐阜大学工学部社会基盤工学科・千葉大学理学部地球科学科の学生・大学院生諸氏には野外調査で助けていただいた。2名の匿名の査読者の指摘は、本稿を改善するのにたいへん役立った。以上の方々に感謝する。

本研究を実施するにあたり、JSPS 科研費(基盤研究(C) 26400487)の助成を受けた。

文 献

- Beck, A. C., 1968, Gravity faulting as a mechanism of topographic adjustment. *N. Z. Jour. Geol. Geophys.*, **11**, 191–199.
- Chigira, M., 1992, Long-term gravitational deformation of rocks by mass rock creep. *Eng. Geol.*, **32**, 157–184.
- 千木良雅弘(Chigira, M.), 1995, 風化と崩壊(*Weathering and Slope Movement*). 近未来社(Kinmiraiisha), 204p.
- 千木良雅弘(Chigira, M.), 1998, 岩盤クリープと崩壊: 構造地質学から災害地質学へ(Gravitational mass rock creep and landslides: From structural geology to hazard geology). 地質学論集(*Mem. Geol. Soc. Japan*), **50**, 241–250.
- 千木良雅弘(Chigira, M.), 2007, 崩壊の場所: 大規模崩壊の発生場所予測(*Site Characteristics of Gigantic Landslides*). 近未来社(Kinmiraiisha), 256p.
- Chigira, M., 2009, September 2005 rain-induced catastrophic rockslides on slopes affected by deep-seated gravitational deformations, Kyushu, southern Japan. *Eng. Geol.*, **108**, 1–15.
- 千木良雅弘(Chigira, M.), 2013, 深層崩壊: どこが崩れるのか(*Deep-seated Catastrophic Landslides: Where are Potential Sites?*). 近未来社(Kinmiraiisha), 231p.
- 千木良雅弘(Chigira, M.), 2015, 深層崩壊の場所の予測と今後の研究展開について(Prediction of potential sites of deep-seated catastrophic landslides and its future research). 応用地質(*Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*), **56**, 200–209.
- Chigira, M. and Kiho, K., 1994, Deep-seated rockslide-avalanches preceded by mass rock creep of sedimentary rocks in the Akaishi Mountains, central Japan. *Eng. Geol.*, **38**, 221–230.
- Chigira, M., Tsou, C. Y., Matsushi, Y., Hiraishi, N. and Matsuzawa, M., 2013, Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas. *Geomorphology*, **201**, 479–493.

- Crosta, G. B., Frattini, P. and Agliardi, F., 2013, Deep seated gravitational slope deformations in the European Alps. *Tectonophysics*, **605**, 13–33.
- 大丸裕武・村上 亘・多田泰之・岡本 隆・三森利昭・江坂文寿 (Daimaru, H., Murakami, W., Tada, Y., Okamoto, T., Sam-mori, T. and Esaka, F.), 2011, 2008 年岩手・宮城内陸地震による一迫川上流域の崩壊発生環境(Geomorphological and geological backgrounds of the landslides induced by the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008 in the upper part of the Ichihassama River watershed, northeast Japan). 日本地すべり学会誌(*Jour. Japan Landslide Soc.*), **48**, 147–160.
- 古谷尊彦(Furuya, T.), 1979, 四国山地のGravitational Slideの予察的研究: 三嶺・天狗塚・網附森・京柱峠付近の航空写真判読を例に(Preliminary reports on gravitational slide in Shikoku: An examples of air-photo interpretation on and around Mt. Miune, Mt. Tenguzuka, Mt. Tsunatsukimori, Kyobashira Pass and its environs). 千葉大学教養部研究報告(*Jour. Coll. Arts Sci., Chiba Univ.*), **B-12**, 63–68.
- 古谷尊彦(Furuya, T.), 1998, 地すべりと活構造(On the some problems of the landslides and tectonics). 地すべり(*Jour. Japan Landslide Soc.*), **34-4**, 11–18.
- 平石成美・千木良雅弘(Hiraishi, N. and Chigira, M.), 2011, 紀伊山地中央部における谷中谷の形成と山体重力変形の発生(Formation of inner gorge and occurrence of gravitational slope deformation in the central Kii Mountains). 地形(*Trans. Japan. Geomorphol. Union*), **32**, 389–409.
- 法橋 亮・大塚 勉(Hohashi, R. and Otsuka, T.), 2009, 飛騨山脈蝶ヶ岳に発達する多重山稜の地形・地質学的研究(Topographical and geological studies of multiple ridges at Mt. Chogatake, Hida Mountains, central Japan). 信州大学環境科学年報(*Ann. Environ. Sci., Shinshu Univ.*), **31**, 90–95.
- 岩田修二(Iwata, S.), 2003, 日本アルプスにおける最終氷期の重力地形・氷河最拡大期・山岳永久凍土(Geomorphological environments of the Japanese Alps since the Last Glacial: gravitational and glacial landforms, and Alpine permafrost). 第四紀研究(*Quat. Res. (Daiyonki-Kenkyu)*), **42**, 181–193.
- 岩松 暉・下川悦郎(Iwamatsu, A. and Shimokawa, E.), 1986, 片状岩のクリープ性大規模崩壊(Creep-type large-scale landslides of well-cleaved argillaceous rocks). 地質学論集(*Mem. Geol. Soc. Japan*), **28**, 67–76.
- Kaneda, H. and Kono, T., 2017, Discovery, controls, and hazards of widespread deep-seated gravitational slope deformation in the Etsumi Mountains, central Japan. *Jour. Geophys. Res. Earth Surf.*, doi: 10.1002/2017JF004382.
- 柏木健司・横山俊治(Kashiwagi, K. and Yokoyama, S.), 2010, 超丹波帯の赤色珪質粘板岩と凝灰質粘板岩の互層中に発達する重力性傾動構造(Gravitational tilting structures developing in alternating beds of red siliceous slate and tuffaceous slate of the Ultra Tamba belt, Fukui Prefecture, Southwest Japan). 日本地すべり学会誌(*Jour. Japan Landslide Soc.*), **47**, 129–137.
- 加藤弘徳・千木良雅弘(Kato, H. and Chigira, M.), 2009, 中央構造線の地表形態を変化させた四国法皇山脈の重力変形(Gravitational slope deformation affecting the fault morphology of the Median Tectonic Line in the Ho-oh Range, central Shikoku). 応用地質(*Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*), **50**, 140–150.
- Kobayashi, K., 1956, Periglacial morphology in Japan. *Biuletyn Peryglacjalny*, **4**, 15–36.
- 小嶋 智・岩本直也・山崎智寛・小村慶太郎・金田平太郎・大谷具幸(Kojima, S., Iwamoto, N., Yamazaki, T., Komura, K., Kaneda, H. and Ohtani, T.), 2015, 岐阜福井県境, 冠山北西の山体重力変形地形の地下構造(Underground structure of sagging landform to the northwest of the Mt. Kanmuriyama area, near the boundary between Gifu-Fukui prefectures, central Japan). 日本地質学会第122年学術大会講演要旨(122nd Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.), 150.
- Kojima, S., Kaneda, H., Nagata, H., Niwa, R., Iwamoto, N., Kayamoto, K. and Ohtani, T., 2015, Development history of landslide-related sagging geomorphology in orogenic belts: Examples in central Japan. In Lollino, G., Giordan, D., Crosta, G. B., Corominas, J., Azzam, R., Wasowski, J. and Sciarra, N., eds., *Engineering Geology for Society and Territory*, **2**, Springer, Berlin, 553–558.
- 小嶋 智・徳永浩之・大谷具幸(Kojima, S., Tokunaga, H. and Ohtani, T.), 2012, 航空レーザー計測の地質学への応用—山体重力変形地形研究を例として—(Application of airborne laser measurement to geology: example of study on gravitational slope deformation)*. 地盤工学会誌(*Geotech. Eng. Mag.*), **60**, 59–62.
- 小村慶太郎・金田平太郎・柏原真太郎・小嶋 智・西尾智博・安江健一(Komura, K., Kaneda, H., Kashiwara, S., Kojima, S., Nishio, T. and Yasue, K.), 2016, 重力変形地形と活断層との関係—根尾谷断層北端部における研究例—(The relationship between sackung feature and active fault: a case study around the northern tip of the Neodani fault). 平成28年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集(*Proc. Annu. Meet. Japan Soc. Eng. Geol.*), 5–6.
- 町田 洋・新井房夫(Machida, H. and Arai, F.), 2003, 新編火山灰アトラス[日本列島とその周辺] (*Atlas of Tephra in and around Japan*), 東京大学出版会(Univ. Tokyo Press), 336p.
- 松岡憲知(Matsuoka, N.), 1985, 赤石山脈主稜線部における線状凹地の分布と岩石物性(Rock control on the distribution of linear depressions on the main divide of Akaishi Range, Southern Japanese Alps). 地理評, Ser. A(*Geogr. Rev. Japan, Ser. A*), **58**, 411–427.
- 目代邦康・千木良雅弘(Mokudai, K. and Chigira, M.), 2004, 赤石山脈南部, 大谷崩から山伏にかけての山体重力変形地形(Geomorphic features and processes of gravitational mountain deformation in the area from Mt. Yambushi to Oya-Kuzure, central Japan). 地理評(*Geogr. Rev. Japan*), **77**, 55–76.
- 永田秀尚・阪口 透・小嶋 智(Nagata, H., Sakaguchi, T. and Kojima, S.), 2006, GISを用いた不安定斜面分布の地形地質要因解析(Analysis of topographic and geologic factors in unstable slope distribution using GIS). 応用地質(*Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*), **46**, 320–330.
- 納谷 宏・英 弘・渡辺崇史(Naya, H., Hanabusa, H. and Watanabe, T.), 1997, 地震による岩盤すべり初期の亀裂形成: 北海道厚岸町ピリカウタ地すべりの事例(Crack formed by earthquake at the beginning of rock slide: Example from Pirikauta slide, Akkeshi Town, East Hokkaido). 地すべり学会北海道支部編, 地震による斜面災害: 1993-1994 年北海道三大地震から(*Landslides Induced by the 1993-1994 Earthquakes in Hokkaido*), 北海道大学図書刊行会(Hokkaido Univ. Press), 69–75.
- 日本地質学会(Geological Society of Japan), 1993, 日本の地質学100年(*Hundred Years of Geology in Japan*). 日本地質学会(Geol. Soc. Japan), 706p.
- 西井稜子(Nishii, R.), 2009, 飛騨山脈の花崗岩山域における斜面崩壊が線状凹地の分布に及ぼす影響(The role of landslides in controlling the distribution of linear depressions on granitic mountains in the Hida Range). 地学雑(*Jour. Geogr. (Chigaku Zasshi)*), **118**, 233–244.
- 西井稜子・池田 敦(Nishii, R. and Ikeda, A.), 2011, 電気探査を用いた線状凹地の内部構造推定の試み—赤石山脈アレ沢崩壊地頂部の事例—(Internal structure below a linear depression surveyed with electrical resistivity tomography: A case study in the head area of the Aresawa rockslide, Akaishi Range). 中部森林研究(*Chubu For. Res.*), **59**, 213–216.
- 西井稜子・池田 敦(Nishii, R. and Ikeda, A.), 2013, 二次元電気探査による重力性変形地形浅層部の可視化の試み(Preliminary study for visualizing the subsurface structure of gravitational deformation slopes using electrical resistivity tomography). 地学雑(*Jour. Geogr. (Chigaku Zasshi)*), **122**, 755–767.
- Nishii, R. and Matsuoka, N., 2010, Monitoring rapid head scarp movement in an alpine rockslide. *Eng. Geol.*, **115**, 49–57.
- ノンテクトニック断層研究会編著(Research Group for Nontecton-

- ic Faults, ed.), 2015, ノンテクトニック断層：識別方法と事例 (*Nontectonic Faults: Identification and Case Studies*). 近未来社 (Kinmiraisha), 248p.
- 大八木規夫・横山俊治 (Oyagi, N. and Yokoyama, S.), 1996, 斜面災害と地質学—「地すべり構造論の展開」(Slope disasters and geology: Perspective for “landslide structures”). テクトニクスと変成作用 (原郁夫先生退官記念論文集) (*Tectonics and Metamorphism (The Hara Volume)*), 創文 (SOUBUN Co., Ltd.), 335–343.
- 佐藤 剛・荻谷愛彦 (Sato, G. and Kariya, Y.), 2005, 飛騨山脈・白馬岳北部地域の地すべり地形発達 (Geomorphological development caused by landslides in the northern area of Mt. Shiroumadake, the Hida Mountains, Japan). 地学雑誌 (*Jour. Geogr. (Chigaku Zasshi)*), **114**, 58–67.
- 佐藤 剛・荻谷愛彦 (Sato, G. and Kariya, Y.), 2014, 「北部飛騨山脈の地すべり地形学図 (1: 25,000)」の作成とそれを用いた地すべり地形の解説 (Mapping of “Landslide Geomorphological Map of the Northern Hida Mountains (1: 25,000)” and explanation of landslide topographies). 地図 (*Jour. Japan Cartograph. Assoc.*), **52**, 1–12.
- 式 正英 (Shiki, M.), 1961, 赤石山脈北部の地形について (On geomorphology of northern Akaishi Range)*. 辻村太郎先生古稀記念事業会編, 辻村太郎先生古稀記念地理学論文集 (*Jubilee Volume of Prof. Taro Tsujimura*)*, 古今書院 (Kokon Shoin), 224–238.
- 清水文健・東郷正美・松田時彦 (Shimizu, F., Togo, M. and Matsuda, T.), 1980, 野口五郎岳付近における小崖地形の成因 (Origin of scarplets around Mt. Noguchigoro-dake in the Japan Alps, central Japan). 地理評 (*Geogr. Rev. Japan*), **53**, 531–541.
- 田近 淳・大津 直・雨宮和夫・和田 茂 (Tajika, J., Ohtsu, S., Amemiya, K. and Wada, S.), 2001, 重力性曲げ褶曲による硬質頁岩層の斜面変動：北海道知内町尾刺建川線の例 (A slope movement by gravitational bending of hard shale beds: Takekawa-Osashi landslide, southern Hokkaido, Japan). 地すべり (*Jour. Japan Landslide Soc.*), **37-4**, 41–48.
- Takada, M., Sasaki, M., Yanagimachi, O. and Ohmori, H., 1990, Environmental changes during the Late Holocene and the climatic implications of snow accumulation hollows in and around Mt. Tango, the Echigo Range, central Japan. *Bull. Dept. Geogr., Univ. Tokyo*, **22**, 35–53.
- 高見智之 (Takami, T.), 2015, 細密 DEM を活用した地形解析に基づく重力変形斜面の類型化 (Typology on gravitational slope deformation based on geomorphic analysis using LiDAR-DEM). 応用地質 (*Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*), **56**, 210–218.
- 富田国良・荻谷愛彦・佐藤 剛 (Tomita, K., Kariya, Y. and Sato, G.), 2010, 大規模崩壊で形成された飛騨山脈南部蝶ヶ岳東面の圏谷状および堆石堤状の地形 (Cirque-like and terminal moraine-like features caused by large-scale slope failure on the eastern side of Mount Chogatake, the southern Hida Mountains, central Japan). 第四紀研究 (*Quat. Res (Daiyonki-Kenkyu)*), **49**, 11–22.
- 辻村太郎 (Tsujimura, T.), 1932, 新考地形学, 第1巻 (*New Insights on Geomorphology, Volume 1*)*, 古今書院 (Kokon Shoin), 572p.
- 渡 正亮 (Watari, M.), 2005, 山腹のゆるみと地すべりの初生について (Original birth of active landslide and “sagging” by gravitational deformation on mountain slope). 日本地すべり学会誌 (*Jour. Japan Landslide Soc.*), **41**, 503–512.
- 八木浩司 (Yagi, H.), 1981, 山地にみられる小崖地形の分布とその成因 (The origin of uphill-facing scarplets distributed on the high mountain slopes of Japan). 地理評 (*Geogr. Rev. Japan*), **54**, 272–280.
- 八木浩司 (Yagi, H.), 1993, 真昼山地・和賀岳付近に認められる小崖地形の発達過程 (Formative process of uphill-facing scarps distributed around the ridge top of Mt. Waga, Ohu Backbone Range, Northeast Japan). 季刊地理学 (*Quarterly. Jour. Geogr.*), **45**, 83–91.
- 八木浩司 (Yagi, H.), 1996, 地すべりの前兆現象としての二重山稜・多重山稜・小崖地形と変動様式 (Double ridges, multiple ridges and scarplets as precursors of landslide and their deformation styles)*. 中村三郎編著, 地すべり研究の発展と未来 (*Recent Progress and Perspective of Landslide Studies*)*, 大明堂 (Taimeido), 1–25.
- 八木浩司・檜垣大助・牧田 肇・神林友弘・大友幸子・井口 隆 (Yagi, H., Higaki, D., Makita, H., Kanbayashi, T., Otomo, Y. and Inokuchi, T.), 2004, 2002 年 4 月に発生した白神山地・向白神岳北西面の岩盤斜面崩壊とその前兆としてのサギング地形 (Rock slope failure of Mt. Mukaishirakami occurred in April, 2002, and “Sagging” as its warning sign). 日本地すべり学会誌 (*Jour. Japan Landslide Soc.*), **40**, 519–523.
- 八木浩司・井口 隆 (Yagi, H. and Inokuchi, T.), 2017, 関田山地主稜部関田峠および平丸峠付近に認められる重力性断層変位地形, 空から見る日本の地すべり地形シリーズ: 49 (Gravitational deformation and faulting around Sekita and Hiramaru paths along main ridge of Sekita range, central Japan, Aerial watching of landslides in Japan: 49). 日本地すべり学会誌 (*Jour. Japan Landslide Soc.*), **54**, 163–165.
- 柳町 治 (Yanagimachi, O.), 1982, 木曾山脈・檜尾岳南西方の線状凹地 (Linear depressions in the southwestern part of Mt. Hinokiodake, the Kiso Mountain Range, central Japan). 地理評 (*Geogr. Rev. Japan*), **55**, 258–273.
- 横山俊治・柏木健司 (Yokoyama, S. and Kashiwagi, K.), 1996, 安倍川支流関の沢流域の瀬戸川群に発達する斜面の傾動構造の運動像 (Movement picture of valleyward tilting structure in the Setogawa Group at the Sekinosawa Tributary of the Abe River, central Japan). 応用地質 (*Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*), **37**, 102–114.
- Zischinsky, U., 1966, On the deformation of high slopes. *Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech.*, **2**, 179–185.
- [URL1] 防災科学技術研究所 (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience), 地すべり地形分布図 デジタルアーカイブ (Digital Archive for Landslide Distribution Maps), http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied_tech_note/landslidemap/index.html

* English translation from the original written in Japanese.

(著者プロフィール)

小嶋 智 岐阜大学工学部社会基盤工学科教授 (理学博士)。81 年 名古屋大学理学部卒, 84 年 名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程中退, 同年名古屋大学助手, 94 年名古屋大学助教授, 97 年から現職。研究内容: 東アジアの付加体の地質学的研究。地すべりの地質素因や山体重力変形地形の形成過程に関する研究。E-mail: skojima@gifu-u.ac.jp.

(要 旨)

小嶋 智, 2018, 応用地質学的視点からみた山体重力変形地形研究の進展と展望. 地質雑, **124**, 889–897. (Kojima, S., 2018, Recent progress and future perspective of research on deep-seated gravitational slope deformation in Japan from the engineering geological viewpoint. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **124**, 889–897.)

二重(多重)山稜, 山向き小崖, 谷向き小崖, 山上凹地などの地形は, 1970年代までは周氷河地形と考えられていたが, 斜面が重力により深部から変形(英語では **deep-seated gravitational slope deformation: DSGSD** と呼ばれる)した結果できる山体重力変形地形であると考えられるようになった. 近年の航空レーザ測量技術の進歩により, 山体重力変形地形は森林限界より上の高山にのみ発達するわけではなく, 低山の森林の下にも無数に存在することが明らかにされた. 本総説は, 日本における山体重力変形地形の用語, 研究の歴史, 形成要因, 将来展望についてまとめたものである.