流れ山分布の地形学的特徴からみた 古羊蹄火山の巨大山体崩壊

吉 田 英 嗣*

Restored Image of Volcanic Sector Collapse at Old Yotei Volcano, Southwestern Hokkaido, Japan, from a Geomorphological Interpretation of the Distribution of Hummocks

Hidetsugu YOSHIDA*

[Received 25 December, 2014; Accepted 2 June, 2015]

Abstract

Hummocks are conically shaped mounds, which occur following catastrophic sector collapses, and are mainly observed around volcanoes. Empirical relationships of hummocks proposed by Yoshida *et al.* (2012) are basically applicable if hummocks now distributed on a debris avalanche depositional area do not have remarkable disturbances due to topographical barriers or modifications after deposition. Using these empirical relationships, the Old Yotei volcano, whose megacollapse in the Late Pleistocene has not been clarified yet, is examined. The results show that the size-distance relationship of hummocks ($N = 297$), distributed west of the volcano can be expressed by an exponential function as,

$$A = \alpha \exp(-\beta D),$$

where A is the average area of a hummock within a certain span and D is the average distance from the source. For the Old Yotei volcano, the values of coefficients α and β of the fitted curve are 170286.4 and 0.000429, respectively. Based on a geomorphological interpretation of both α and β values, it can be concluded that the collapse volume of the Old Yotei volcano is ca. 1.3 km³, and the equivalent coefficient of friction of the debris avalanche is 0.129. The latter also reveals a high probability that the pre-collapse summit of the Old Yotei volcano reached 1700 m a.s.l. Thus, the image of the flank collapse of the Old Yotei volcano has been restored more decisively by the distribution of hummocks.

Key words : hummocks, debris avalanche, collapse volume, coefficient of equivalent of friction, Old Yotei volcano

キーワード : 流れ山, 岩屑なだれ, 山体崩壊量, 等価摩擦係数, 古羊蹄火山

I. はじめに

火山体においてみられる特有の剝離現象のうち、巨大山体崩壊は火山体そのものやその下流

域の長期の地形発達を規定するという点で重要視されてきた（町田, 1984; 竹本・久保, 2003; 吉田, 2004 など）。吉田（2010a）, Yoshida *et al.*（2010）は、そうした巨大山体崩壊が「どれほど

* 明治大学文学部地理学専攻

* Department of Geography, Meiji University, Tokyo, 101-8301, Japan

巨大であったのか」を定量的に明らかにするうえで、山体崩壊に連続して発生する岩屑なだれによって形成される「流れ山」の分布特性に着目することが有意義であるとした。すなわち、岩屑なだれ堆積面の縦断（流下）方向における流れ山のサイズ分布が、山体崩壊量（体積）や岩屑なだれの流動性を反映した結果であることを指摘した。Yoshida *et al.* (2012) においてはさらに検討事例が追加され、流れ山の分布特性から山体崩壊量や岩屑なだれの流動性の推定を可能とする経験式が構築されている。

こうした Yoshida *et al.* (2012) の経験式が広く適用できるかどうかについては、その後、磐梯火山における2つの巨大山体崩壊（吉田, 2012a, 2013）やフィリピン・イリガ火山における事例（Yoshida, 2013）などで、既知の山体崩壊量、もしくは崩壊山体の崩壊前後における地形変化から求められた山体崩壊量と、流れ山の分布特性からみた山体崩壊量との対応関係が再検討されることにより、蓋然性が高められてきている。このことは、ある程度数の流れ山がある程度のまとまりをもって残存していれば、たとえ崩壊山体の崩壊前後における地形変化が推定できない場合や、岩屑なだれ堆積物の初成的分布が明らかでない場合でも、地形としての流れ山のみによって山体崩壊量を推定できる可能性を強く示唆している（吉田, 2010a）。

ところで、火山体の巨大崩壊はこれまでに数多く認められてきたものの、その具体的な「すがた」が明らかになっている事例はさほど多くない。巨大山体崩壊はとりわけ成層火山の発達史の過程で、1度～数度は生じる可能性が指摘されてきたが（守屋, 1979; Siebert *et al.*, 1987; 土井, 1991; 井口, 2006）、それは数～100万年スケールの時間幅でのことであり、単一の火山体でみれば決して頻発する現象ではないからである。また、火山体の巨大崩壊に際しては通常、顕著な地形変化が火山体自身および周辺の堆積域において生じ、馬蹄形火口や流れ山地形が形成されるため（Siebert, 1984; Glicken, 1996; 吉田, 2004 など）、その後長期間にわたって山体崩壊イベントの「痕

跡」として残りうるが、活動的な火山においてはそうした痕跡は比較적すみやかに失われてしまうこともある。そのような例として、富士山の御殿場岩屑なだれをもたらした巨大山体崩壊（宮地ほか, 2004）などをあげることができる。

地形学的には、上記のとおり火山体自身のみならず周辺地域の地形発達史に影響をおよぼす、という意味において、地学的時間スケールでは「ほぼ瞬時に」多量の土砂供給をもたらすという点で巨大山体崩壊現象は重要である（吉田, 2010b）。すなわち、どの程度の規模の山体崩壊であったのか、という情報は、地形学的基本情報のひとつであるといえ、かつ、火山起源の土砂災害という側面からも最重要視される項目のひとつである。しかし、これが明らかな事例は決して多くない。そしてたとえ明らかにされていたとしても、後に過大評価もしくは過小評価であったことが判明するような場合もある（米地, 2006; 吉田, 2012a, 2013）。

以上をふまえ本研究では、とくに山体崩壊量が未知、もしくは十分に把握されていない事例を対象にして、これまでにその評価における有用性が認められてきた流れ山の分布特性からみて、いかなる巨大山体崩壊であったのかを検討する。このことにより、例えば、知見の蓄積の少ない巨大山体崩壊の量的規模に関する知見を増やすことへの貢献としたい。本研究では具体的対象として、北海道の羊蹄火山において後期更新世に発生した巨大山体崩壊をとりあげる。

II. 調査地域

北海道南西部に位置する羊蹄火山（図1）は、標高1898 m、比高1500 m以上、底径10～11 kmの、日本では比較的大型の安山岩質成層火山であり（勝井, 1956）、かつきわめて均整のとれた円錐形の火山体を有している。溶岩流などからなる火山原面が広く残存しており、削剥がほとんど進んでいない若い火山体である。羊蹄火山の既往研究の多くは、テフラ層序に関するものであり（柏原ほか, 1976; 宇野, 1989; 星住, 2004; 上澤ほか, 2011 など）、洞爺カルデラ形成期以降

図 1 羊蹄火山の位置と地形。陰影図は国土地理院の基盤地図情報（数値標高モデル）10 m メッシュ（標高）に基づく。図中の白線は等高線であり、等高線上の数値は標高（m）を示す。

Fig. 1 Location of Yotei volcano and its surroundings. Shaded relief map is from 10-m-mesh digital elevation data of the Geographical Information Authority, Japan. White lines are contour lines with intervals of 100 m.

に成立した，後期更新世以降の噴火史の詳細が明らかにされつつある。

現在の火山体には巨大山体崩壊の発生を示唆する崩壊（削剥）地形を認められないが，西麓には広く岩屑なだれ堆積物（斎藤ほか，1956における真狩別層）が分布し，その堆積面上には多数の流れ山地形が見いだされる（守屋，1983）。羊蹄火山や岩屑なだれ堆積物を岩石学的に調査した江草・中川（2001）や江草ほか（2003）によれば，この岩屑なだれをもたらしたのは現在の羊蹄火山ではなく，その下に埋もれる古羊蹄火山であるとされる。

江草・中川（2001）においては，古羊蹄火山の巨大山体崩壊は約4万年前までに発生したとの見方が提示されている。さらに上澤・中川（2009）は，テフラ層序に基づいて山体崩壊が支笏火砕流の堆積後に発生したことを確認するとともに，その時期が3.3万年前頃までに改められる可能性をも指摘している。また江草ほか（2003）

は，Siebert（1984）や Siebert *et al.*（1987）などが示した，岩屑なだれは等価摩擦係数（ $Hsü$ ，1975; H/L ；比高 H に対する最大流走距離 L の比）として0.05～0.20の値をとりうするという経験則に基づいて，岩屑なだれの最大流走距離からみて崩壊前の古羊蹄火山が標高1000～1700 mに達したと推測している。つまりこれは，古羊蹄火山の岩屑なだれについても既往の諸岩屑なだれが示す等価摩擦係数の範囲内におさまるとの仮定下で推定されたものといえる。そして古羊蹄火山の山体崩壊量については，それを詳述する既往研究はほぼ皆無といってよい状況である。つまり，「日本の第四紀火山カタログ」（第四紀火山カタログ委員会，2000）において0.72 km³との値のみが示されるほか，井口（2006）がまとめた巨大山体崩壊・岩屑なだれのリストにおいて1 km³以上と推定されるもの，として示されるにすぎない。前者については値の算出方法や出典が不明確で，後者についてもおよその見積もりがなされて

図 2 古羊蹄火山の流れ山の分布. 流れ山は GIS 上でポリゴンデータとしてあらわされ, 各流れ山の重心位置と長軸をあわせて示してある. 図中の同心円は給源 (現在の羊蹄火山の火口位置) からの距離である.

Fig. 2 Planar distribution of hummocks of Old Yotei volcano. All hummocks are expressed as polygons with their centroids and major axes. Concentric circles indicate distance from source (present summit vent of Yotei volcano).

いるにとどまっている。したがって、これらの推定値は第一次近似のものとしては有用であろうが (吉田, 2010b), 流れ山の分布に基づくより詳細な評価を可能とする事例として, 古羊蹄火山の巨大山体崩壊は位置づけられると判断される。

III. 方 法

検討の方法は, 筆者による既発表のものと同様, 流れ山地形の判読と流れ山のサイズ分布 (流れ山の大きさと流走距離との関係) の回帰分析である (吉田, 2010a; Yoshida *et al.*, 2010, 2012 など)。以下に概要を述べる。

まず, 国土地理院の空中写真を用いて, 実体視

により羊蹄火山の西麓に分布する流れ山を認定・抽出した。その際, 既往研究による地形分類図 (守屋, 1983) も参考にした。流れ山の輪郭は空中写真に直接書き込み, 作業後の写真をスキャナでデジタル画像化し, さらに GIS (MicroImages 社の TNTmips) にとり込んだ後に座標の付与と, DEM をリファレンスに用いての簡易オルソ画像への変換をおこなった。そして, GIS 上で流れ山の輪郭を再トレースすることによって個々のポリゴンデータを作成した (図2)。さらに, ポリゴンの面積を流れ山のサイズ, それらの重心位置と給源位置との直線距離を流走距離と定めて, 両者の関係を調べた。前述のように, 古羊蹄火山の

山体崩壊の給源位置、あるいは古羊蹄火山の山頂位置はともに定かではない。そこで、同様の事例として岩木火山において決定したように (Yoshida *et al.*, 2010), ここでも現在の羊蹄火山の山頂火口を給源とみなすことにした。古羊蹄火山の岩屑なだれ (流れ山) は現在の羊蹄山火口位置から約 12 km と十分な流走距離を獲得しているため、仮に現在の羊蹄火山の山頂火口位置と古羊蹄火山の本来の山頂位置とにずれがあったとしても、それが数 100 m 以内のことであれば、本稿における議論にはほとんど影響しないと考えてよい。そして厳密には過去 1 万年間に火道位置が 1.5 km 以上移動しなかったと推定されるものを指すが、羊蹄火山は典型的な「火道安定型複成火山」(高橋, 1994) であることも、上記のとり扱いについてのひとつの理由となろう。

流れ山のサイズ分布についての既知事例との同調性、すなわち、岩屑なだれの流走距離に対する流れ山のサイズの減少傾向が古羊蹄火山の岩屑なだれにおいても認められるのであれば、筆者がこれまでに示してきた、流れ山のサイズの減少をもたらす崩壊山体の破碎過程に関する考え (Yoshida *et al.*, 2012) を適用できる可能性が高い。つまり、流れ山のサイズの減少傾向が指数関数式によってあらわされ、その回帰式中の 2 つの係数が有す地形学的意義をふまえ、山体崩壊量が吟味されることとなる。

IV. 流れ山のサイズと流走距離との関係

本研究では、空中写真判読によって羊蹄火山西麓において 297 個の流れ山を認定した (図 2)。流れ山は給源からの距離 4.5 ~ 12 km の範囲に分布する。また、最大の流れ山は面積にして 100,000 m²、最小の流れ山は 300 m² 程度であり、流れ山は流走距離の増大にともなってサイズを減少させる (図 3)。以上のような流れ山の分布状況からみて、Yoshida *et al.* (2012) などの諸事例と同様に、古羊蹄火山の場合には流れ山の分布を地形学的に解釈する方法によって山体崩壊量や岩屑なだれの流動性を評価することが可能と考えられる。

図 3 古羊蹄火山の流れ山の流走距離に対するサイズ (底面積) の変化。

Fig. 3 Distribution of areas (size) of hummocks with distance from source (runout distance) for all hummocks of Old Yotei volcano.

流走距離に対する流れ山のサイズの減少傾向を指数関数式によって示すために、Yoshida *et al.* (2010, 2012) の方法を適用した。すなわち、給源からの距離 (流走距離) を 500 m ごとの区間に分け、それら区間に含まれる流れ山のサイズの平均値と距離の平均値をそれぞれ算出した。同時に、各区間を区間幅は変えずに下流側 (給源の遠方側) に 200 m ずらした際の各区間についても、サイズと距離の平均値をそれぞれ算出した。なお、本事例では給源からの距離 9 km (9000 m) 以遠では流れ山の数が少なくなることから (図 3, 図 4), 区間幅を 500 m の 2 倍の 1000 m とし、この場合、下流側へずらす移動距離も 400 m とした。それらの区間のうち、給源にもっとも近い区間と最も遠い 2 区間の計 3 区間では流れ山の数が少ない (本事例の場合 5 個に満たない) ために省き、それ以外の全区間のサイズ・距離の平均値を片対数グラフにプロットすると図 4 のとおりである。このデータに基づき、古羊蹄火山の流れ山について、流走距離 (D) とサイズ (A) との関係を指数関数式である、

$$A = \alpha \exp(-\beta D) \quad (1)$$

によってあらわすと、 $\alpha = 170286.4$, $\beta = 0.000429$

図 4 区間ごとの平均値による流れ山の流走距離に対するサイズ（底面積）の変化。直線は回帰曲線である。

Fig. 4 Average plots for each 500 or 1000 m span, with a regression line, of hummocks with distance from source (runout distance) for hummocks of Old Yotei volcano.

となる。相関係数は -0.948 であり、筆者によるこれまでの検討事例（Yoshida *et al.*, 2012 など）と比べても決して小さい値ではなく、岩屑なだれの流走にともなう流れ山のサイズの減少傾向を指数関数によって近似することの妥当性を示している。

ここで、Yoshida *et al.* (2010, 2012) によって示された、式 (1) の地形学的意義について、簡潔にまとめると次のようである。式 (1) における α 値および β 値は事例ごとに特有の値をとる係数である。それらは、山体崩壊の基本特性、すなわち山体崩壊量と岩屑なだれの流動性（可動性）とを反映した値となっている。このことについて、まず β 値について述べる。 β 値は、流れ山のサイズ変化の割合を示す回帰式の「傾き（曲率）」そのものであり、流れ山のサイズは流走距離に応じて縮小していくが、その程度（縮小率）が事例によって異なっている。 β 値は岩屑なだれの流動性を示す等価摩擦係数 (H/L) およびその逆数 (L/H) と強い相関関係にあることが見いだされており、Yoshida *et al.* (2012) によって示された等価摩擦係数 (H/L) と β 値との経験的関係式は、

$$H/L = 130.051003\beta + 0.069545 \quad (2)$$

である（図 5）。ここで、相関係数は 0.939 である。この強い相関関係は、流動的（もしくは可動的）ではない岩屑なだれでは流れ山のサイズがすみやかに縮小していくのに対し、流動的な岩屑なだれでは流れ山が緩やかにサイズを減少させていくことを意味する。流れ山のサイズやその変化を規定する個別的要因には、母材の物性、岩屑なだれの経路の前地形条件、流れの縁辺部で発生する剪断力、山体崩壊が複数回にわたるどうか、などがあげられ、それらを考慮に含めた詳細な検討はデータ取得の困難さもあり、未着手である。とはいえ、地形計測による統計学的観点では式 (2) を β 値に対する岩屑なだれの等価摩擦係数 (H/L) の予測式とみなすことは可能と考える（Yoshida *et al.*, 2012 など）。また、 α 値については次のような解釈を与えることが可能とされる。 α 値は指数関数回帰による式 (1) の切片の値に相当し、これには「給源における流れ山の平均的なサイズ」という意味を見いだせる。この α 値が意味する「平均的なサイズ」は、山体崩壊量 (V) と

$$V = 0.000601\alpha + 30.325666 \quad (3)$$

で示される相関関係にある（図 6；Yoshida *et al.*, 2012；相関係数は 0.994 ）。山体崩壊がブロック・グライディングから岩屑なだれへと移行していくプロセス（Shea and van Wyk de Vries, 2008; Paguican *et al.*, 2012 など）を考慮すれば、山体崩壊量が α 値の大小を規定しているとみなすことはごく自然な発想でもある。なお、給源においては当然ながら地形としての流れ山は存在しない。これはむしろ、給源山体における山体崩壊イベントの最初期に生じる巨大ブロックというべきものであり、最終的には多数の流れ山もしくは岩屑なだれマトリクスも含めた岩屑なだれ堆積物として山麓（堆積域）に定着するものである。なお、吉田 (2010a) に記されるように、式 (3) によれば、例えば山体崩壊量が $1 \sim 2 \text{ km}^3$ のときに給源付近でのブロックサイズは一辺数 $100 \text{ m} \sim 1 \text{ km}$ 程度となる。セントヘレンズ火山の事例に

図 5 β 値と H/L 値（岩屑なだれの等価摩擦係数）との関係。回帰線は Yoshida *et al.* (2012) の 7 事例（図中の ×）に基づくものであり、図にはさらに磐梯・1888（吉田, 2012a）、磐梯・翁島（吉田, 2013）、那須・観音川（吉田, 2012b）、フィリピン・イリガ（Yoshida, 2013）のデータがプロットされている。古羊蹄のデータについては崩壊直前の山頂を 1700 m ($H = 1.55$ km) とした場合と、1000 m ($H = 0.85$ km) とした場合とをプロットしたが、後者については他事例の傾向から大きく外れる。なお、古羊蹄の比高 (H) を算出するにあたり、筆者によるこれまでの検討における他事例と同様に 50 m を最小単位とし、堆積物の分布末端域の標高値 (120 ~ 130 m) に近い標高 150 m を用いた。そのため、それぞれの比高 (H) は上記のとおりとなる。

Fig. 5 Relationship between the equivalent coefficient of friction (H/L) and coefficient β ; slope coefficient of empirical functions for seven rockslide-debris avalanches from Yoshida *et al.* (2012). Solid line is the regression line based on those seven avalanches. The graph provides data from two rockslide avalanches of Bandai volcano (1888 and Okinajima; Yoshida, 2012a, 2013), from Kannongawa of Nasu volcanic group (Yoshida, 2012b), from Iriga, Philippines (Yoshida, 2013), and from Old Yotei volcano in this study. The pair of data of Old Yotei volcano is based on a suggestion of Egusa *et al.* (2003). In short, the lower limit of the pre-volcanic summit (1000 m a.s.l., then H is calculated as 0.85 km) does not completely fit the trend. Note that altitude of 150 m a.s.l. used as the base level for calculating the relative height (H) of Old Yotei volcano roughly corresponds to the lower limit of deposits (120–130 m a.s.l.).

においては山体崩壊の最初期に崩壊部がいくつか分割されたことが知られており (Voight *et al.*, 1983; Glicken, 1996), α 値はそうした複数ブロックの平均的なサイズを反映しているものと解釈される。したがって式 (3) は、山体崩壊が巨大なものであるほど、山体崩壊イベントの最初期に割れ目が形成されることによって生じた複数の巨大ブロックも大規模なものとなる、ということの意味することになる。

V. 古羊蹄火山の流れ山が示す山体崩壊の実態

前記の古羊蹄火山の流れ山から得られた α 値および β 値を用い、山体崩壊量と岩屑なだれの流動性について吟味する。はじめに、 α 値 (170286.4) と、「日本の第四紀火山カタログ」(第四紀火山カタログ委員会, 2000) に記載される体積 (V : $72 \times 10^7 \text{ m}^3$) とを用いて、Yoshida *et al.* (2012) などが示す α - V グラフ上にプロットすると (図 6A, B), Yoshida *et al.* (2012) による 7 事例に基づく回帰曲線から大きく離れていることが明らかである。回帰曲線上の値を真値と仮定して、その実測値（もしくは推定値）との残差と、基準化した残差を表 1 に示す。古羊蹄火山の事例は、筆者がこれまでに検討してきたもののいずれよりも基準化残差が大きい。上記の α 値を Yoshida *et al.* (2012) の回帰式 (式 (3)) に代入して得られる体積は 1.33 km^3 ($133 \times 10^7 \text{ m}^3$) であり、この場合、「第四紀火山カタログ」(第四紀火山カタログ委員会, 2000) に記載される値のほぼ 2 倍となる。このことは一方で、 1 km^3 以上とする井口 (2006) の見積もりとは矛盾しない。

他方、古羊蹄火山の示す β 値 (0.000429) は、同様に Yoshida *et al.* (2012) が示す回帰式 (式 (2)) によれば、岩屑なだれの等価摩擦係数 (H/L) が約 0.125 ~ 0.130 であったことを強く示唆する (図 5)。この値は、古羊蹄火山の崩壊直前の山頂高度が標高 1600 ~ 1700 m であった場合に得られる。これは、古羊蹄火山体の残存山体が現在の羊蹄火山体に完全に覆われるとされることと矛盾しない。また、標高 1700 m という山頂高

図 6 α 値と V 値 (体積) との関係. A: $0 \leq \alpha \leq 1000000$, B: $0 \leq \alpha \leq 400000$. 回帰線は Yoshida *et al.* (2012) の 7 事例 (図中の $\times$) に基づくものであり, さらに磐梯・1888 (吉田, 2012a), 磐梯・翁島 (吉田, 2013), 那須・観音川 (吉田, 2012b), フィリピン・イリガ (Yoshida, 2013) のデータと, 本研究の古羊蹄火山のデータがプロットされている. ここでは第四紀火山カタログ委員会 (2000) に掲載される値の 0.72 km^3 を V 値として与えているが, その基準化残差はもっとも大きい (表 1). なお, 翁島のデータは Yoshida *et al.* (2012) の回帰式から求めた予測値を V 値に与えているので, 回帰線上にプロットされていることに注意されたい.

Fig. 6 Relationship between volume (V) of collapsed mass coefficient α ; the intercept coefficient of the empirical function for seven rockslide debris avalanches is from Yoshida *et al.* (2012). Solid line is regression line based on those seven avalanches. A: $0 \leq \alpha \leq 1000000$, B: $0 \leq \alpha \leq 400000$. The graph provides data from two rockslide avalanches at Bandai volcano (1888 and Okinajima; Yoshida, 2012a, 2013), from Kannongawa of Nasu volcanic group (Yoshida, 2012b), from Iriga, Philippines (Yoshida, 2013), and Old Yotei volcano in this study. Note that the volume data for Okinajima, Bandai are predictive from the regression formula with an observed value α , leading the plot on the regression line.

度は江草ほか (2003) による推定の範囲に含まれ, かつ, ほぼその上限値である. しかしながら, 山体崩壊直前の山頂高度が江草ほか (2003) の推定する下限である標高 1000 m 程度であったならば, 等価摩擦係数 (H/L) は 0.070 程度となり, Yoshida *et al.* (2012) の回帰曲線 (式 (2)) からは大きく離れることとなる (図 5). Voight *et al.* (1983) によれば, 等価摩擦係数 (H/L) は山体崩壊量と逆相関を示すとされ, 本研究が新たに明示した両者の関係はこの知見とも整合的である. したがってここでは, 流れ山のサイズの流走距離にともなう減衰傾向からみて, 古羊蹄火山の山体崩壊直前の山頂高度は標高 1600 ~ 1700 m であった可能性を強く主張しうる.

上記の内容をふまえ, 筆者がこれまでに検討してきた事例 (表 1) のうち, 本研究によって新た

に提示された古羊蹄火山の山体崩壊量 (体積: V) である約 1.3 km^3 ($130 \times 10^7 \text{ m}^3$) に近い $1.0 \sim 1.5 \text{ km}^3$ ($100 \sim 150 \times 10^7 \text{ m}^3$) のものを 4 事例 (有珠火山・善光寺岩屑なだれ, 岩木火山・十腰内岩屑なだれ, 那須火山・御富士山岩屑なだれ, フィリピンのイリガ火山・イリガ岩屑なだれ) 選び, その体積 (V) を岩屑なだれ堆積物の分布面積 (A) で除して求めた堆積物の平均層厚 (T) と, 岩屑なだれの等価摩擦係数 (H/L) との関係を検討した. 現状ではデータ数が少ないため断定はできないが, 結果として両者には正比例的関係があることが示唆された (表 2, 図 7). なお, ここで平均層厚 (T) の計算に用いた岩屑なだれ堆積物の分布面積 (A) は, 堆積場周辺の地形を考慮しつつ対象となるすべての流れ山を包含するように囲った場合の面積であり, それぞれ 3 回の計

表 1 巨大山体崩壊量の残差と基準化残差.

Table 1 Modelled collapse volume and its residue for each case.

DAD, volcano	Volume- Observed (*10 ⁷ m ³)	α	Volume- Predictive (*10 ⁷ m ³)	Residual (ABS(P-O)) (*10 ⁷ m ³)	Normalized Residual
Zenkoji, Usu	150	217097.8	161	10.8	0.07
Rusutsu, Shiribetsu	200	267553.3	191	8.9	0.05
Tokoshinai, Iwaki	130	210205.0	157	26.7	0.17
Ofujisan, Nasu	100	71800.4	73	26.5	0.36
Onuma, Komagatake	30	32034.3	50	19.6	0.39
Nashigi, Akagi	600	947579.9	600	0.2	0.00
Gotemba, Fuji	176	205389.0	154	22.2	0.14
1888, Bandai	49.2	53490.6	62	13.3	0.21
Iriga, Iriga	150	184254.4	141	8.9	0.06
Kannongawa, Nasu	30	15312.9	40	9.5	0.24
Yotei, "Old" Yotei	72	170286.4	133	60.7	0.46

表 2 体積 1.0 ~ 1.5 km³ (100 ~ 150 × 10⁷ m³) の諸事例における岩屑なだれのデータ.Table 2 Data of sector collapses (debris avalanches) of 1.0–1.5 km³ (100–150 × 10⁷ m³) in volume.

DAD, volcano	V; Volume (*10 ⁷ m ³)	H/L	A; Area (km ²)	T; Average Thickness (m)
Zenkoji, Usu	150	0.154	19.73	76.0
Tokoshinai, Iwaki	130	0.107	34.94	37.2
Ofujisan, Nasu	100	0.084	34.28	29.2
Iriga, Iriga	150	0.114	42.72	35.1
Yotei, "Old" Yotei	133	0.129	32.33	41.0

測値を平均化して得た値である。したがって、古羊蹄火山を含むすべての事例について、表 2 に示す分布面積 (A) は最小見積もり値、平均層厚 (T) は最大見積もり値にそれぞれ相当する。また、今回の計測では有珠火山、イリガ火山においては水域 (噴火湾、ブヒ湖)、那須火山については余笹川左岸の堆積物分布範囲をそれぞれ含まないため、これら 3 事例の分布面積 (A) についてはさらに小さめの見積もり値となっている。データ数の問題に加え、こうした不確実性を少なからず含むものの、岩屑なだれ堆積物の平均層厚 (T) と等価摩擦係数 (H/L) とが大局的には比例関係にあるとすれば、古羊蹄火山の岩屑なだれについ

ては β 値から推測された等価摩擦係数 (H/L) が 0.129 であるので、岩屑なだれの平均層厚 (T) は大きくみて 40 ~ 50 m であることが期待されることになる (図 7)。一方、 α 値から推測された体積 (V) は約 1.3 km³ であった。このとき、分布面積 (A) が約 32 km² であるため、堆積物の平均層厚 (T) は 41 m と算出され (図 7, 表 2), 上記の期待される平均層厚 (T) と整合する。以上は大まかな検討にすぎないとはいえ、 α 値を用いた山体崩壊量の推定結果が支持されるという点で有意義である。

以上をまとめると、古羊蹄火山の巨大山体崩壊は、体積にして約 1.3 km³ のものであり、かつ、

図 7 岩屑なだれの等価摩擦係数 (H/L) と岩屑なだれ堆積物の平均層厚 (T) との関係。表 2 に基づき作成したものであり、古羊蹄火山のデータについて、予測値 ($V = 133$) から算出した $T = 41.0$ は、他 4 例が示すトレンド上にある。

Fig. 7 Relationship between equivalent coefficient of friction (H/L), indicating the mobility of debris avalanches, and average thickness of deposits (T). Data are from Table 2, and thickness of deposits ($T = 41.0$ m) from Old Yotei volcano is possibly an estimate of its mobility.

生じた岩屑なだれの等価摩擦係数は約 0.13 と推測され、崩壊直前の山頂高度は最大で約 1700 m であった、と考えられる。これらは、山麓の堆積域に残る約 300 個の流れ山の分布を地形学的に解釈した、従来とは異なる方法に基づく結果である。

VI. まとめ

本研究では、巨大山体崩壊の痕跡としての流れ山地形が明瞭に残るものの、給源山体が地形的に確認されないために、山体崩壊量などの基本的情報が実質的に欠如しているとみなされる事例として北海道の羊蹄火山を対象とし、流れ山の分布の地形学的解釈によって巨大山体崩壊の実態解明を試みた。Yoshida *et al.* (2012) によって構築された、流れ山の分布特性と山体崩壊量および岩屑なだれの流動性との関係を示す経験式を用い、

297 個の流れ山の分布から、古羊蹄火山の崩壊直前の山頂高度は 1600 ~ 1700 m であった可能性が高いこと、山体崩壊量は約 1.3 km³ と推定されることを示した。

巨大山体崩壊は火山体そのものやその下流域の長期の地形発達を規定しうる現象であり、その定量的評価を実現していくためにも、本研究と同様の試みが多くなされるべきである。同時に、地形そのものからどのようなことを議論しうるのか、という地形学全般に関わる課題に対しては、岩屑なだれがなす流れ山のみならず、多様な地形種を対象として検討する余地が多分に残されている可能性が高い。地形計測研究における今後の課題は数多く残っており、さらなる研究の展開が期待される。

謝 辞

本稿は 2 名の査読者および編集委員のコメントにより大きく改善された。本研究の概要は日本地理学会 2014 年度秋季学術大会において発表した。本研究は、国土地理協会第 7 回学術研究助成 (平成 19 年度)、東京地学協会平成 21 年度研究・調査助成金、平成 22 ~ 24 年度科学研究費補助金、明治大学 2014 年度若手研究の補助を受けて実施された。

文 献

- 第四紀火山カタログ委員会編 (2000): 日本の第四紀火山カタログ。[Committee for Catalog of Quaternary Volcanoes in Japan ed. (2000): *Catalog of Quaternary Volcanoes in Japan*. Volcanological Society of Japan. (in Japanese)]
<http://www.geo.chs.nihon-u.ac.jp/tchiba/volcano/index.htm> [Cited 2014/7/8].
- 土井宣夫 (1991): 岩手火山山麓の岩屑なだれ堆積物群。火山, **36**, 483-484. [Doi, N. (1991): Debris avalanche deposits at the foot of Iwate Volcano, Northeast Japan. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **36**, 483-484. (in Japanese)]
- 江草匡倫・中川光弘 (2001): 西南北海道、羊蹄火山山麓岩屑なだれ堆積物の給源火山体。日本火山学会講演予稿集, 84. [Egusa, M. and Nakagawa, M. (2001): The source volcanic edifice of debris avalanche of Yotei volcano, Southwest Hokkaido. *Programme and Abstracts the Volcanological Society of Japan*, 84. (in Japanese)]
- 江草匡倫・中川光弘・藤田豪平 (2003): 西南北海道、羊蹄火山の活動史: 埋積された古羊蹄火山の発見と噴出率の時間変化。日本火山学会講演予稿集, 57.

- [Egusa, M., Nakagawa, M. and Fujita, G. (2003): Volcanic history of Yotei volcano, southwestern Hokkaido: Finding of buried Old Yotei volcano and temporal change of magma discharge rate. *Programme and Abstracts the Volcanological Society of Japan*, 57. (in Japanese)]
- 星住リベカ (2004): 羊蹄火山における最近 2 万年の噴火活動史. 日本第四紀学会講演要旨集, **34**, 119. [Hoshizumi, R. (2004): Eruptive history of Yotei volcano, during the past 20ka. *Programme and Abstracts, Japan Association of for Quaternary Research*, **34**, 119. (in Japanese)]
- Hsü, K.J. (1975): Catastrophic debris stream (Sturzstroms) generated by rock falls. *Geological Society of America Bulletin*, **86**, 129-140.
- Glicken, H. (1996): Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens Volcano, Washington. *USGS Open-file Report* 96-677, 1-90.
- 井口 隆 (2006): 日本の第四紀火山で生じた山体崩壊・岩屑なだれの特徴: 発生状況・規模と運動形態・崩壊地形・流動堆積状況・発生原因について. 日本地すべり学会誌, **42**, 409-420. [Inokuchi, T. (2006): Properties of sector-collapse and debris avalanches on Quaternary volcanoes in Japan. *Journal of the Japan Landslide Society*, **42**, 409-420. (in Japanese with English abstract)]
- 柏原 信・広瀬保志・香川正人・菅 恵一・春日井昭・山岸一夫 (1976): 羊蹄火山のテフラー降下軽石・スコリア堆積物とその ^{14}C 年代について. 第四紀研究, **15**, 75-86. [Kashiwabara, M., Hirose, Y., Kagawa, M., Kan, K., Kasugai, A. and Yamagishi, K. (1976): The tephra of Yotei volcano: On the pumice-scoria fall deposits and their ^{14}C dating ages. *Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyu)*, **15**, 75-86. (in Japanese with English abstract)]
- 勝井義雄 (1996): 羊蹄火山の地質と岩石. 斎藤昌之・藤原哲夫・石山昭三・松井公平編: 5 万分の 1 地質図幅「留寿都」及び同説明書. 北海道開発庁, 附録 1-14. [Katsui, Y. (1956): Geology and petrology of Yotei volcano. in *The Geological Sheet Map "Rusutsu", Scale 1:50,000 and Its Explanatory Text* edited by Saito, M., Fujiwara, T., Ishiyama, S. and Matsui, K., Hokkaido Development Agency. Supplement, 1-14. (in Japanese)*]
- 町田 洋 (1984): 巨大崩壊, 岩屑流と河床変動. 地形, **5**, 155-178. [Machida, H. (1984): Large-scale rockslides, avalanches and related phenomena: A short review. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **5**, 155-178. (in Japanese with English Abstract)]
- 宮地直道・富樫茂子・千葉達朗 (2004): 富士火山東斜面で 2900 年前に発生した山体崩壊. 火山, **49**, 237-248. [Miyaji, N., Togashi, S. and Chiba, T. (2004): A large-scale collapse event at the eastern slope of Fuji volcano about 2900 years ago. *Bulletin of Volcanological Society of Japan*, **49**, 237-248. (in Japanese with English abstract)]
- 守屋以智雄 (1979): 日本の第四紀火山の地形発達と分類. 地理学評論, **52**, 479-501. [Moriya, I. (1979): Geomorphological developments and classification of the Quaternary volcanoes in Japan. *Geographical Review of Japan*, **52**, 479-501. (in Japanese with English Abstract)]
- 守屋以智雄 (1983): 日本の火山地形. 東京大学出版会. [Moriya, I. (1983): *Volcanic Landforms of Japan*. The University of Tokyo Press. (in Japanese)]
- Paguican, E.M.R., van Wyk de Vries, B. and Lagmay, A.M.F. (2012): Hummocks: how they form and how they evolve in rockslide-debris avalanches. *Landslides*, doi:10.1007/s10346-012-0368-y.
- 斎藤昌之・藤原哲夫・石山昭三・松井公平 (1956): 5 万分の 1 地質図幅「留寿都」及び同説明書. 北海道開発庁. [Saito, M., Fujiwara, T., Ishiyama, S. and Matsui, K. (1956): *The Geological Sheet Map "Rusutsu", Scale 1:50,000 and Its Explanatory Text*. Hokkaido Development Agency. (in Japanese with English abstract)]
- Shea, T. and van Wyk de Vries, B. (2008): Structural analysis and analogue modeling of the kinematics and dynamics of rockslide avalanches. *Geosphere*, **4**, 657-686.
- Siebert, L. (1984): Large volcanic debris avalanches: Characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **22**, 163-197.
- Siebert, L., Glicken, H. and Ui, T. (1987): Volcanic hazards from Bezymianny- and Bandai-type eruptions. *Bulletin of Volcanology*, **49**, 435-459.
- 高橋正樹 (1994): 複成火山の構造と地殻応力場 1. 火道安定型・不安定型火山. 火山, **39**, 191-206. [Takahashi, M. (1994): Structure of polygenetic volcano and its relation to crustal stress field, 1. Stable and unstable vent types. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **39**, 191-206. (in Japanese with English abstract)]
- 竹本弘幸・久保誠司 (2003): 浅間火山, 応桑岩屑なだれ堆積物のテフラ層序. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要第 2 部地球システム科学, **38**, 55-64. [Takemoto, H. and Kubo, S. (2003): Tephrostratigraphy of the Ohkuwa debris avalanche Asama Volcano, Central Japan. *Proceedings of the Institute of Natural Sciences, Nihon University, Section 2 Department of Geosystem Sciences*, **38**, 55-64. (in Japanese with English abstract)]
- 上澤真平・中川光弘 (2009): 西南北海道, 羊蹄火山の最近約 5 万年間のテフラ層序: 古羊蹄火山起源テフラの発見と岩屑なだれの発生時期. 日本火山学会講演予稿集, **42**. [Uesawa, S. and Nakagawa, M. (2009): Tephrostratigraphy of Yotei volcano during the last 50ka, Southwest Hokkaido, Japan: Recognition of tephra from Older-Yotei and the timing of debris avalanche. *Programme and Abstracts the Volcanological Society of Japan*, **42**. (in Japanese)]
- 上澤真平・中川光弘・江草匡倫 (2011): 南西北海道,

- 羊蹄火山の完新世噴火史の再検討. 火山, **56**, 51-63. [Uesawa, S., Nakagawa, M. and Egusa, M. (2011): Reinvestigation of Holocene eruptive history of Yotei volcano, southwest Hokkaido, Japan. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **56**, 51-63. (in Japanese with English Abstract)]
- 宇野リベカ (1989): テフラからみた羊蹄火山の活動. 日本火山学会講演予稿集, **110**. [Uno, R. (1989): Volcanic activities of Yotei volcano from the point of tephrostratigraphy. *Programme and Abstracts the Volcanological Society of Japan*, **110**. (in Japanese)*]
- Voight, B., Janda, R.J., Glicken, H. and Douglass, P.M. (1983): Nature and mechanics of the Mt. St. Helens landslide-avalanche of 18 May 1980. *Geotechnique*, **33**, 243-273.
- 米地文夫 (2006): 磐梯山爆発. 古今書院. [Yonechi, F. (2006): *The Volcanic Eruption of Bandai-san (Bandai-san Bakuhatu)*. Kokon Shoin. (in Japanese)*]
- 吉田英嗣 (2004): 浅間火山を起源とする泥流堆積物とその関東平野北西部の地形発達に与えた影響. 地理学評論, **77**, 544-562. [Yoshida, H. (2004): Mud flow deposits derived from the activity of Asama volcano and their impacts on the geomorphic development of the northwestern part of the Kanto Plain, central Japan. *Geographical Review of Japan*, **77**, 544-562. (in Japanese with English Abstract)]
- 吉田英嗣 (2010a): 日本における流れ山のサイズ分布. 地学雑誌, **119**, 892-899. [Yoshida, H. (2010a): Size distribution of debris avalanche hummocks in Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **119**, 892-899. (in Japanese with English Abstract)]
- 吉田英嗣 (2010b): 土砂供給源としてみた日本の第四紀火山における巨大山体崩壊. 地学雑誌, **119**, 568-578. [Yoshida, H. (2010b): Catastrophic sector collapses of Quaternary volcanoes as significant sediment sources in Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **119**, 568-578. (in Japanese with English Abstract)]
- 吉田英嗣 (2012a): 流れ山の分布にみる磐梯火山における 1888 年の山体崩壊量. 地形, **33**, 45-60. [Yoshida, H. (2012a): Evaluation of the 1888 sector-collapse volume of Bandai volcano, Japan, in terms of the size-distance distribution pattern of debris avalanche hummocks. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **33**, 45-60. (in Japanese with English abstract)]
- 吉田英嗣 (2012b): 観音川岩屑なだれが形成した流れ山の縦断分布特性—火山の巨大山体崩壊に伴う「谷埋め型」岩屑なだれの例として—. 駿台史学, **146**, 19-36. [Yoshida, H. (2012b): Longitudinal distribution pattern of hummocks of Kannongawa debris avalanche deposits, Nasu Volcanic Group, Japan, as an example of valley-filling debris avalanches due to the inland volcanic sector-collapse. *Sundai Historical Review*, **146**, 19-36. (in Japanese with English abstract)]
- 吉田英嗣 (2013): 磐梯火山・翁島岩屑なだれを生じた山体崩壊量の再検討: 1888 年の崩壊との比較. 地形, **34**, 1-19. [Yoshida, H. (2013): Reexamination of volume loss due to the catastrophic sector-collapse causing the Okinajima debris avalanche of Bandai volcano, Japan. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **34**, 1-19. (in Japanese with English abstract)]
- Yoshida, H. (2013): Decrease of size of hummocks with downstream distance in the rockslide-debris avalanche deposit at Iriga volcano, Philippines: Similarities with Japanese avalanches. *Landslides*, **10**, 665-672.
- Yoshida, H., Sugai, T. and Ohmori, H. (2010): Longitudinal downsizing of hummocks by the freely-spreading volcanic debris avalanches in Japan. *Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyu)*, **49**, 55-67.
- Yoshida, H., Sugai, T. and Ohmori, H. (2012): Size-distance relationships for hummocks on volcanic rockslide-debris avalanche deposits in Japan. *Geomorphology*, **136**, 76-87.

* Title etc. translated by H.Y.