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

吉 田 英 嗣^{*+}

Catastrophic Sector Collapses of Quaternary Volcanoes as Significant Sediment Sources in Japan

Hidetsugu YOSHIDA^{*+}

Abstract

The Japanese Islands are tectonically active and humid. Thus, erosion and deposition are the primary processes controlling geomorphic development. Catastrophic sector collapses at volcanoes should be considered significant in this context. This study examines the geomorphological role of volcanic sector collapses in Japan, introducing 58 cases with their respective occurrence ages and volumes ($\geq 1 \times 10^8 \text{ m}^3$). We find that the frequency of sector collapses becomes exponentially higher as the collapse magnitude decreases. The total volume of the dissected volcanic edifice caused by catastrophic collapses amounts to *ca.* 6.4 km^3 ($640 \times 10^8 \text{ m}^3$) during the last 500 years. This value can be translated into an annual denudation rate of 0.53 mm/y per unit area of the Quaternary volcanoes (*ca.* 24000 km^2), which is comparable to the contemporary denudation rate of non-volcanic mountains in Japan. Therefore, although volcanic sector collapses occur intermittently, we have to consider them as sediment sources that are indispensable to an understanding of geomorphology in Japan.

Key words : catastrophic sector collapse, frequency, magnitude, Quaternary volcano, Japan

キーワード : 巨大山体崩壊, 頻度, 規模, 第四紀火山, 日本

I. はじめに

山地の解体とそれに付随する岩屑の生産, ならびに平野域への土砂移動に関する研究は, 長らく地形学の主要テーマのひとつとされてきた。降水量が多く, 降水強度が大きい日本において, 山地では流水による地形変化とともに, 山体崩壊や地すべりといったマスマーブメントによる物質移動が活発である。そして, 日本の山地は台湾や

ニュージーランドとともに, 世界最大級の侵食速度によって特徴づけられている (Yoshikawa, 1974; Ohmori, 1983)。他方, 日本は多数の火山を有している。火山と非火山 (隆起山地) とが根本的に異なる点は, 前者がマグマを地表に噴出・付加させていくことによって成長していくのに対し, 後者は地殻変動によって成長していく, ということであろう。とはいえ, 土砂の供給源としての山塊, という見方からは, 両者は同列に扱われる

* 中央大学理工学部

+ 現所属 : 関東学院大学経済学部

* Faculty of Science and Engineering, Chuo University

+ Present address : College of Economics, Kanto Gakuin University

べき対象であるといえる。

筆者は数年来、火山体、とくに成層火山および溶岩円頂丘で発生する巨大山体崩壊をターゲットに、地形学の見地から研究を続けてきている（吉田, 2004; 吉田・須貝, 2006; Yoshida and Sugai, 2007a）。日本では1888年に発生した磐梯火山の崩壊以降、巨大山体崩壊に関連した研究がなされてきたが（Sekiya and Kikuchi, 1889; 水野, 1962; 鈴木, 1966; 守屋, 1980）、この現象の一般性が世界的に認知されるようになったのはアメリカ合衆国のセントヘレンズ火山での崩壊（Voight *et al.*, 1981, 1983; 宇井・荒牧, 1983; Glicken, 1996, 1998）を経験してからといっても過言ではない。火山体は素因・誘因の双方の面で最も崩壊しやすいこと、崩壊土砂の流動体にあたる岩屑なだれは崩落高度の10倍以上の距離を時速100 km以上で流走することが珍しくなく、きわめて危険性が高いこと、地質学的時間スケールでは頻発する「通常の現象」であることなどが明らかにされるにつれ、近年、火山の巨大山体崩壊のメカニズムに迫る火山学的研究や災害科学的な視点に立つ研究が多数なされるようになってきた（Crandell *et al.*, 1984; 町田, 1984; 町田ほか, 1987; 宝田, 1991; Siebert, 1992; Capra and Macias, 2002; 吉本ほか, 2003）。

このように、火山の巨大山体崩壊に関しては研究活動が本格化してから約30年が経ち、知見が蓄積されてきている。このため、さまざまな観点からの議論が可能となりつつある。本稿ではその一環として、この現象が土砂供給という点でどのような意味を有しているのかを議論する。とくに、日本の第四紀火山で発生した巨大山体崩壊の履歴と規模を整理し、非火山山地からの土砂供給との比較を通じて、巨大山体崩壊の地形学的な役割を検討したい。

II. 火山体の解体に関する既往研究

地形学の既往研究において、火山の巨大山体崩壊は「山地の解体」という観点から論じられることが多い（岩塚・町田, 1962; 町田, 1962, 1964; 鈴木, 1969; 大八木, 1987; 守屋, 1987）。例えば

鈴木（1969）は、火山体の原形の復元に大幅な誤差が生じないような日本の成層火山について、火山体を形成し終わってからの経過時間（侵食期間）と現在の侵食の度合い（侵食比）との関係式を構築した。侵食比は侵食期間の対数関数であると解され、火山体でははじめ急速に侵食が進むが、経過時間が 10^6 年に達するころには 0.1 mm/y のオーダーの侵食速度に落ち着くことなどが示された（鈴木, 1969）。東北地方の火山についてK-Ar年代測定値を多数導入した林ほか（1999）や、伊豆小笠原諸島の複数の火山島をフィールドとし、詳細なDEMを用いた小花和ほか（2008）、火山体斜面の復元に客観的なアルゴリズムを導入し、恣意性を減じることを試みた大澤ほか（2009）の検討は、いずれも鈴木（1969）のアプローチや目的を踏襲したものである。例えば林ほか（1999）によれば、数10万年から百数10万年というタイムスパンでは、溶岩を主体とする火山では 0.02 mm/y 前後、火砕岩を主体とする火山では 0.1 mm/y 前後の侵食速度となる。つまり、上記の諸研究は大局的な意味で鈴木（1969）による検討の追試である。一方、これらに共通した課題としては、（1）気候条件の違いが侵食の過程に影響すると考えられるものの、その検討は不十分であること（鈴木・横山, 1981）、（2）現在は火山で一般的に発生する現象とみなされている巨大山体崩壊が考慮されていないこと（守屋, 1987）、があげられる。本研究が着眼している（2）に関して、鈴木（1969）において御岳の伝上崩れの規模（ $0.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 規模）の崩壊は開析谷の一部として議論（解析）の対象とされているが、それ以上の規模のものとなると考慮されていないことをうかがい知れる（藤田ほか, 1987）。

さて、1980年におけるセントヘレンズ火山の山体崩壊を受けて、世界の火山の巨大山体崩壊に着目したカタログが複数作成された（Siebert, 1984; Siebert *et al.*, 1987 など）。日本の事例に特化したカタログとしてはUi（1983）やUi *et al.*（1986）によるものがあつたが、最近、井口（2006）が新たなカタログを作成している。また、Yoshida *et al.*（2008）は上記の課題（2）を念頭

に置きながら、過去の事例をもとに、日本で発生しうる火山の巨大山体崩壊の規模が $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ にも達すること、これが、日本のほぼ全域を対象とした隆起山地における現在の定常的な侵食量の約 100 年分に相当することを示した。しかしながら、Yoshida *et al.* (2008) ではいくつかの代表的な崩壊の「規模」にのみ注目した論考にとどまっており、さらなるデータの蓄積と考察が課題として残されていた。以下、次章では日本において現在知りえる巨大山体崩壊の発生履歴を上記のカatalogや新たな情報収集によって整理し、次々章では「侵食速度」を指標に用いて、火山の巨大山体崩壊の土砂供給源としての意義を示す。

III. 日本の火山における巨大山体崩壊の発生履歴

巨大山体崩壊の土砂供給源としての役割を示すうえで、発生年代と規模（体積）は必須の情報である。そこで、既存のカatalogを用いて日本における第四紀火山の巨大山体崩壊の発生年代と体積とがともに明らかな事例をピックアップした。その結果、Siebert (1984) からは 11 件、Siebert *et al.* (1987) からは 13 件、井口 (2006) からは 37 件（うち $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上のものは 34 件）を選択できた（表 1）。なお、Ui (1983) および Ui *et al.* (1986) のカatalogには発生年代の項目がなかったので本稿では比較の対象外とした。これらによれば、報告が最近になるほど該当事例が増えてきていることは明らかである。このことは、認定された岩屑なだれの件数が Ui (1983), Siebert (1984), Ui *et al.* (1986), Siebert *et al.* (1987), 井口 (2006) の順に、31 件, 38 件, 71 件, 65 件, 128 件と増えてきている傾向と同調し、関連する研究の蓄積を思わせる。しかしながら、発生年代、規模とがともに判明している事例数を全体に対する比率であらわすと、29%, 20%, 29%と低水準のままである。すなわち、岩屑なだれや巨大山体崩壊が新たに発見されたとしても、年代や規模の算出には至らないケースが多いことが示唆される。

こうした状況を考慮し、本研究では改めて文献調査を実施し、山体崩壊の発生年代と規模との双方が何らかの形式で示されている事例を抽出した。本研究では、鈴木 (1969) などの検討では対象外とされる $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上の規模を有するものに注目している。このうち、年代が直接示れておらずとも、絶対年代が判明している地層との層序関係から発生年代の範囲をある程度特定できる事例までをリストに加えることにした。また、磐梯火山における頭無岩屑なだれのように（中馬・吉田, 1982; 山元・須藤, 1996）、存在そのものに関して研究者間の見解の不一致が著しいと判断される事例については、誤解を生じさせないために今回は除外している。なお、崩壊の規模に関して、崩壊源の体積、堆積物の体積のどちらが示されているかは既往研究ごとに異なる。本研究では基本的には崩壊源の体積を引用するが、堆積物の体積のみ提示されている事例や値がどちらのものか不明な事例についても、示された値をそのまま引用することにする。

結果を表 2 に示す。本研究では、体積規模 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上で発生年代の明らかな巨大山体崩壊について、日本においては 58 件を抽出することができた。文献調査に際しては、新たに認定されたもの、堆積物の対比が改められることによって単一の事例にまとめられたり、あるいは複数の事例に分割されたりするものをそれぞれ複数認めることができた。このことは表 2 に示す事例に限ったことではない。表 2 にあげたものについて、巨大山体崩壊の土砂供給源としての意義を論じるうえで重要である体積規模に着目すると、従来示されていた値と大幅に変わったものがいくつかあり、渡島駒ヶ岳や渡島大島などにおける巨大山体崩壊がそれに該当する。こうした変更は、例えば、海中に堆積した岩屑なだれ堆積物の量を見積もることのできるデータが最近になって得られたことに起因し（Satake and Kato, 2001; 吉本ほか, 2003）、このようなリストを定期的に更新していく必要性を示している。

発生頻度を年代別にみると、明らかに最近ほど多い（図 1）。この解釈は、歴史記録があるか

表 1 既往のカタログ (Siebert, 1984; Siebert *et al.*, 1987; 井口, 2006) における発生年代と規模が明らかな日本の巨大山体崩壊.

Table 1 List of catastrophic sector collapses in Japan, with occurrence age and volumes compiled from Siebert (1984), Siebert *et al.* (1987) and Inokuchi (2006).

文献	No.	火山名	岩屑なだれ	発生年代		体積 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)
				(万年前)	(西暦)	
Siebert (1984)	1	有珠	—	0.8-0.7		3
	2	駒ヶ岳	—		1640 A.D.	2.5
	3	渡島大島	—		1741 A.D.	4
	4	磐梯	—		1888 A.D.	15
	5	赤城	—	更新世		40
	6	妙高	—	0.778		2.3
	7	妙高	—	1.96		8
	8	黒姫	—	更新世		1.2
	9	八ヶ岳	—	更新世		2.7
	10	八ヶ岳	—	更新世		100
	11	雲仙	—		1792 A.D.	4.8
Siebert <i>et al.</i> (1987)	1	有珠	—	0.8-0.7		3
	2	駒ヶ岳	—		1640 A.D.	2.5
	3	渡島大島	—		1741 A.D.	4
	4	田代岳	—	更新世		5.5
	5	磐梯	—		1888 A.D.	15
	6	赤城	—	更新世		40
	7	妙高	—	0.778		2.3
	8	妙高	—	1.96		8
	9	黒姫	—	更新世		1.2
	10	蓼科 (八ヶ岳)	—	更新世		3.4
	11	八ヶ岳	—	更新世		97
	12	富士	—	0.25		18
	13	雲仙 (眉山)	—		1792 A.D.	3.4
井口 (2006)	1	洞爺・有珠	善光寺岩屑流	0.8-0.7		3
	2	渡島駒ヶ岳	クルミ坂岩屑流		1640 A.D.	2.5
	3	渡島大島	西山岩屑流		1741 A.D.	4
	4	岩木	十面沢泥流	> 1		13
	5	岩手山	平笠岩屑なだれ	1-0.5		23
	6	岩手山	小岩井泥流	> 4		25
	7	岩手山	青山町泥流	> 2.7		7.6
	8	岩手山	滝沢泥流	> 4		> 7.5
	9	岩手八幡平	松尾火山泥流	> 3.3		> 2
	10	鳥海山	象潟岩屑流	0.27-0.26		26
	11	鳥海山	西由利原泥流	1.978		52
	12	蔵王	酢川泥流	> 4		27.3
	13	磐梯山	裏磐梯岩屑流・新期琵琶沢泥流		1888 A.D.	12
	14	磐梯山	古期琵琶沢泥流		806 A.D. ?	5
	15	磐梯山	翁島泥流	8-7		45
	16	那須岳	御富士山岩屑流	4-3		15-20
	17	富士山	御殿場岩屑流	0.258-0.236		20
	18	妙高	田口泥流	0.77-0.18		2.3
	19	妙高	矢代川泥流	1.79		5
	20	妙高	関川泥流	2		8
	21	黒姫	駒爪泥流	1-0.6		5-7
	22	黒姫	なべわり川岩屑流	3.5-3.1		8-10
	23	飯縄	牟礼岩屑流	30-20		30-50
	24	浅間 (黒斑山)	塚原泥流・応桑泥流	2.37		> 20
	25	八ヶ岳	大月川岩屑流		888 A.D.	3.49
	26	八ヶ岳	韭崎岩屑流	更新世中期		> 100
	27	八ヶ岳	相木川泥流	更新世前期		12
	28	八ヶ岳	観音寺泥流	更新世前期		> 60
	29	立山	大鷲くずれ		1858 A.D.	4.1
	30	白馬大池	稗田山		1911 A.D.	1.5
	31	御岳	伝上川		1984 A.D.	0.32
	32	白山	大白川岩屑流	0.44		1.16
	33	由布岳	塚原泥流	< 0.63		0.4
	34	飛岳	若杉岩屑なだれ	< 7		1
	35	小鹿山	東山岩屑なだれ	< 50		2
	36	水口山	津江岩屑流		1596 A.D.	0.3
	37	雲仙	眉山岩屑流		1792 A.D.	3.4

表 2 発生年代と規模 ($\geq 10^8 \text{ m}^3$) が明らかな日本の巨大山体崩壊.Table 2 List of catastrophic sector collapses in Japan, with occurrence age and volumes ($\geq 10^8 \text{ m}^3$), newly surveyed by the present author.

No.	火山名	岩屑なだれ	発生年代 (万年前) (西暦)	体積 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	文献
1	尻別	留寿都岩屑なだれ	10-5	20	守屋 (2003); Yoshida <i>et al.</i> (2010)
2	羊蹄	羊蹄岩屑なだれ	4	7.2	第四紀火山カタログ委員会 (2000); 江草ほか (2003)
3	有珠	善光寺岩屑なだれ	0.8-0.7	10-20	宝田 (2002); Takarada and Melendez (2006)
4	渡島駒ヶ岳	クルミ坂岩屑なだれ	1640 A.D.	17.2-20.0	吉本・宇井 (1998); 吉本ほか (2003)
5	渡島大島	西山岩屑なだれ	1741 A.D.	24	Satake and Kato (2001)
6	岩木	十腰内 (十面沢) 岩屑なだれ	65	13	一色・大沢 (1967); 井村 (1995); 三村・関口 (2001)
7	田代岳	岩瀬川岩屑なだれ	> 2.5	1	宝田 (1991)
8	岩手	青山町岩屑なだれ	15	7.6	井口 (1988); 土井 (2000)
9	岩手	大石渡・小岩井岩屑なだれ	12	25	土井 (1991, 2000)
10	岩手	平笠岩屑なだれ	0.6	20-30	井口 (1988); 土井ほか (1991); 土井 (2000)
11	八幡平	松尾岩屑なだれ	5	2	森野 (1996); 井口 (1988); 土井 (2000)
12	秋田駒ヶ岳	先達川岩屑なだれ	2.2	> 1	土井ほか (1997)
13	鳥海	象潟岩屑なだれ	0.26	28.5	加藤 (1977); 林 (1984)
14	鳥海	西鳥海馬蹄形カルデラ	9	14	井口 (1988); 伴ほか (2001)
15	鳥海	由利原泥流	1.978	52	加藤 (1984)
16	栗駒	須川岩屑なだれ	1.8-1.7	3.7	藤田・藤縄 (1997); 藤縄ほか (2001)
17	月山	笹川岩屑流	< 40-30	50 $\pm$ 30	Ichimura (1955); 宇井 (1975)
18	白鷹	畑谷岩屑なだれ	80	> 20	三村・鹿野 (2000)
19	白鷹	針生岩屑なだれ	90	> 13	三村・鹿野 (2000)
20	蔵王	酢川泥流	7	30	阿子島・山野井 (1985); 八本ほか (2005)
21	磐梯	1888 岩屑なだれ	1888 A.D.	12.13	Sekiya and Kikuchi (1889)
22	磐梯	琵琶沢岩屑なだれ	0.25	1	山元・須藤 (1996)
23	磐梯	翁島岩屑なだれ	4.6-3.0	40-45	鈴木ほか (1995); 山元・須藤 (1996)
24	那須	観音川岩屑なだれ	1.74	3	堀ほか (1991); 山元 (1999)
25	那須	御富士山岩屑なだれ	4-3	< 10	藤田 (1988)
26	女峰赤薙	行川岩屑なだれ	15-12	> 7.9	橘 (2004)
27	赤城	梨木岩屑なだれ	22	40-80	守屋 (1970); 早田 (1990); 新井 (1993); 竹本 (1998)
28	小野子	平沢岩屑なだれ	> 55	14	中村 (1997)
29	富士	御殿場岩屑なだれ	0.29	17.6	宮地ほか (2004)
30	妙高	杉野沢岩屑なだれ	0.27	1	早津 (2008)
31	妙高	田口岩屑なだれ	0.9	2	早津 (2008)
32	妙高	矢代川岩屑なだれ	1	5	早津 (2008)
33	妙高	関川岩屑なだれ	1.9	14	早津 (2008)
34	妙高	二本木岩屑なだれ	4.5	3	Kawachi and Hayatsu (1994)
35	妙高	田切岩屑なだれ	9	> 3	Kawachi and Hayatsu (1994)
36	黒姫	なべわり川岩屑なだれ	4.3	8-10	早津 (2008)
37	黒姫	寺尾岩屑なだれ	25-15	> 50	早津 (2008)
38	飯縄	越水岩屑なだれ	20	5	Kawachi and Hayatsu (1994)
39	飯縄	牟礼岩屑なだれ	23-22	30-50	早津 (2008)
40	新潟焼山	西尾野川岩屑なだれ	0.18	1	早津 (2008)
41	浅間	鎌原土石なだれ	1783 A.D.	1.38	井上 (2009)
42	浅間	応桑 (塚原・塩沢) 岩屑なだれ・中之条 (前橋) 泥流	2.4	40	Yoshida and Sugai (2007b)
43	八ヶ岳	大月川岩屑なだれ	888 A.D.	> 3.5	河内 (1983a, b); 井上ほか (2009)
44	八ヶ岳	韭崎岩屑なだれ	24-20	> 90	甲府盆地第四紀研究グループ (1969); 河内・町田 (2006)
45	八ヶ岳	相木川岩屑なだれ	80-100	1	河内 (1989); Kawachi and Hayatsu (1994)
46	八ヶ岳	観音寺泥流	80-130	> 60	井口 (1989)
47	立山 (弥陀ヶ原)	大蔵崩れ	1858 A.D.	1.3-2.7	町田 (1986); Ouchi and Mizuyama (1989)
48	白馬大池	稗田山崩れ	1911 A.D.	1.5	町田 (1964)
49	御岳	開田岩屑なだれ・木曾川泥流	5	16-27	藤井 (1976); 大沢 (1989); 中村ほか (1992)
50	白山	大白川岩屑なだれ	0.44	1.2	清水ほか (1985)
51	経ヶ岳	唐谷川岩屑なだれ	3-4	3	山田 (1986); 山崎ほか (1987)
52	高平岳	松塚岩屑なだれ	13-80	1	星住・三村 (1988)
53	高平岳	鉄輪岩屑なだれ	13-80	5	星住・三村 (1988)
54	飛岳	若杉岩屑なだれ	< 7	1	星住・三村 (1988)
55	小鷹山	東山岩屑なだれ	< 50	2	星住・三村 (1988)
56	野船岳一花牟礼火山群	田代岩屑堆積物	> 40	9	星住・三村 (1988)
57	雲仙	眉山岩屑なだれ	1792 A.D.	4.4	井上 (1999)
58	九重	松の台岩屑なだれ	1	1.5	小林ほか (2008)

図 1 巨大山体崩壊の発生年代の頻度分布 ($N = 58$). 値に幅があるものについては平均値を, 上限値または下限値のみが示されているものについてはそれらの値を用いた.

Fig. 1 Frequency distribution of occurrence age of catastrophic sector collapses in Japan ($N = 58$). Mean values are calculated and adopted for some cases taking on a range of values. The upper or the lower limit is used in cases where those values just occur.

図 2 巨大山体崩壊の規模 (体積) の頻度分布 ($N = 58$). 値に幅があるものについては平均値を, 上限値または下限値のみが示されているものについてはそれらの値を用いた.

Fig. 2 Frequency distribution of magnitude (volume) of catastrophic sector collapses in Japan ($N = 58$). Mean values are calculated and adopted for some cases taking on a range of values. The upper or the lower limit is used in cases where those values just occur.

年代測定が行われている 29 件を対象に解析した井口 (2006) と同様である。そしてまた, この結果が必ずしも現実の発生頻度を示しておらず, みかけ上のものであると考えられる, という点でも井口 (2006) の見解と一致する。すなわち, 一般の地形にもあてはまることだが, 古いものほど認識が難しくなる, ということであろう。

図 2 には崩壊の規模の頻度分布を示した。これによると, 小規模なものほど度数は大きくなる傾向が明瞭である。すなわち, $30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上 $40 \times 10^8 \text{ m}^3$ 未満の事例数に限っては期待よりも少ないものの, 崩壊規模と頻度とには基本的にはべき乗則の関係が成立することが想定される。この傾向は, 大規模な崩壊が生じるためにはそれに見合った規模の山体が形成されている必要があることに対応しているとも考えられる。すなわち, 韮崎岩屑なだれや梨木岩屑なだれは, 日本でも一級の山体規模を誇る八ヶ岳火山や赤城火山を由来とする。その一方で, 巨大崩壊より規模の小さな崩壊ほど火山体の規模を選ばずに発生すると考えることができる。例えば, 富士火山では, 給源山

体の規模という観点からは $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ に迫る巨大山体崩壊が生じるといえるが, それは想定される崩壊規模の上限であって, 現実にはより規模の小さな崩壊が多発してきた。御殿場岩屑なだれ ($17.6 \times 10^8 \text{ m}^3$) はその一例といえる。上記の八ヶ岳火山でも, 韮崎岩屑なだれ ($90 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上) よりもかなり小規模な大月川岩屑なだれ ($3.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上) が発生しており, 大規模な火山では大規模な崩壊しか生じない, ということでもない。以上をまとめると, 崩壊が大規模になるほど発生しうる火山が限られてくるために, 火山体の規模と巨大山体崩壊の頻度とには一定の関係が成立するものと推測される。また, $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 未満の崩壊では崩壊地形の規模が小さいために認定が困難であるとの推測もある (守屋, 1987)。その意味では, 火山体で発生する山体崩壊には規模の下限が存在する (井口, 2006) と考えるよりは, 規模の小さな崩壊ほど第四紀を通じて多数発生してきたがそれらのすべてを認定できているわけではない, と考えることがむしろ合理的であると思われる。

IV. 土砂供給源としての火山の巨大山体崩壊

前章では巨大山体崩壊の発生履歴を示し、頻度と規模に関する記述と考察を行った。現時点で得られるデータに関する限り発生頻度は最近ほど高い(図1)が、これは既述のとおり古い時代に発生した崩壊ほど見落とされている可能性が高いことの反映と思われる。そこで、ここでは井口(2006)と同様に、最近の発生頻度が第四紀における実際の発生頻度に近い、との仮定のもと、500年前以降という時間的枠組で巨大山体崩壊の果たしてきた役割を量的な観点から明確化する。なお、最近500年間という期間は、Siebert(1992)によって世界全体での巨大山体崩壊の発生頻度を論ずる際に採用された期間でもある。

まず、現時点で知りえる巨大山体崩壊によって失われた山体部の量を表2に基づき求めると、最近500年間では約 6.4 km^3 ($640 \times 10^8 \text{ m}^3$)と算出される。ここで、巨大山体崩壊による土砂供給を非火山からの土砂供給と同列に扱うために、単位面積あたりの侵食速度に置き換えて議論する。日本全体では、いわゆるカルデラ火山が形成した火砕流台地を除く第四紀火山の占める面積は国土の6%にあたる約 2.4 万 km^2 である(Yoshikawa *et al.*, 1981)。したがって、上記の値を用いて第四紀火山地域における単位面積あたりの平均侵食速度を求めると 0.53 mm/y となる。この値は、火山の巨大山体崩壊のみによる値で、平均侵食速度の「最小値」とみなすことができる。

一方、日本の非火山山地においては各種の方法により侵食速度が求められている。これまでに、河成段丘、扇状地、沖積錐あるいは山地斜面の地形学的な解析に基づき、山地の侵食過程やその速度に関する議論がなされてきた(磯ほか, 1980; 阿子島, 1983; 小口, 1991)。また、ダムの堆砂データからは最近数十年間程度の侵食速度が直接に求められ(Yoshikawa, 1974; Ohmori, 1978; Tanaka, 1982; 宮崎・大西, 1994)、さらには地形の起伏状態(基準高度分散量: 1 km^2 四方の区画内における標高の標準偏差; Ohmori, 1978)と

侵食速度の関係式(Ohmori, 1983)により、日本全国で現在の侵食速度が推定されている(藤原ほか, 1999)。いずれの研究でも、 $0.3 \sim 0.5 \text{ mm/y}$ 程度の値が平均侵食速度として報告されている。いわゆる丘陵地を除く日本の山地のほぼ全域(約 18 万 km^2)を対象とした藤原ほか(1999)が示す表を用いれば、日本全体で山地の平均侵食速度は 0.5 mm/y と算出される。

基準高度分散量から求めた非火山山地の侵食速度は、現行(最近数十年間程度)の侵食を反映したものと解釈される。一方、気候変化をはじめとした侵食に関わるさまざまな要因の時間変化に伴って、この値は変化すべきものと捉えられる。このことに有益な知見を与える既往の成果としては、阿子島(1983)、小口(1991)などがある。阿子島(1983)は最近2万年間の、小口(1991)は晩氷期以降(1.3万年前以降)の山地流域における侵食速度を、高度分散量を用いた方法とはまったく独立に検討したが、得られた侵食速度の値は現在の値と大差ないことが示されている。すなわち、両者はオーダーレベルで一致しているという。より厳密には、晩氷期以降の平均侵食速度は現在の値の50~60%(小口, 1991)ないし80%前後(Oguchi, 1996a)を示し、日本の流域における長い(1万年以上)緩和時間がその一因とされる(Oguchi, 1996b)。したがって、この関係を日本全国の山地に適用できると仮定すれば、大局的にみて現在は山地で侵食作用がより活発に働いている時代であるといえ、最近500年間程度の侵食速度は基準高度分散量から求めた現在の侵食速度と大差ないと考えられる。

以上から、最近500年間の平均侵食速度を日本の非火山山地と火山地とで比較すると、前者では $0.3 \sim 0.5 \text{ mm/y}$ 、後者では $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上の巨大山体崩壊が寄与する分のみで 0.5 mm/y 前後、ということになる。つまり、非火山山地における定常的な削剥とはほぼ同等の削剥が火山地において巨大山体崩壊のみによってなされたということであり、火山の巨大山体崩壊は平野部への土砂供給源という点で明らかに無視できない程度に寄与していることがわかる。また、既述のとおり、本研

究が収集したデータは発生年代と規模とが推定されているものに限定されている。さらには、古い時代に発生した未発見の事例が多く存在するであろうことも示唆される。これらはいずれも、 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ を超えるような火山の巨大山体崩壊が、より長期的な観点においても土砂移動を考えるうえで重要な現象と位置づけられる可能性を示すことにほかならない。

V. おわりに

小論では、日本における第四紀火山の巨大山体崩壊の発生履歴を整理し、量的な見地から土砂供給源として一定の評価を与えた。1980年にアメリカ合衆国で発生したセントヘレンズ火山の巨大山体崩壊以降に蓄積されてきた知見を主とし、日本では崩壊の規模($1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上)と発生年代が示されている事例として、従来まとめられていた数の倍近い58件を抽出できた。これらについてみると、規模の小さな崩壊ほど発生頻度は高くなり、頻度と規模との関係にはべき乗則の成立が想定された。そして、巨大山体崩壊によって失われた山体部の合計量は、見落としがほとんどないと考えられる最近500年間では約 6.4 km^3 ($640 \times 10^8 \text{ m}^3$)であり、これらを日本の火山地(約 2.4 万 km^2)における平均侵食速度に換算すると 0.53 mm/y となった。この値は日本の非火山山地における現在の平均侵食速度($0.3 \sim 0.5 \text{ mm/y}$)と比べて遜色ないものであり、火山の巨大山体崩壊を土砂供給源として無視できないことがわかった。未知の巨大山体崩壊は多く存在すると考えられ、存在が示されつつも規模が明らかでない事例も多い。こうした事例についての地道な知見の積み重ね、とくに発生年代と量的規模の解明が、火山の巨大山体崩壊に対するより適切な評価につながるといえる。

謝 辞

本稿は査読者である井上公夫博士(財団法人砂防フロンティア整備推進機構)、小口 高教授(東京大学空間情報科学研究センター)のご助言によって大幅に改善された。また、本研究を遂行するにあたり、東京地

学協会平成21年度研究・調査助成金を使用した。記して謝意を表します。

文 献

- 阿子島 功(1983): 山形県馬見ヶ崎川流域における過去2万年間および最近の侵食速度. 地形, **4**, 97-106.
- 阿子島 功・山野井 徹(1985): 蔵王火山西麓の酢川泥流の発生年代と火山解体における意義. 地形, **6**, 172.
- 新井房夫(1993): 上州の火山噴火の歴史. 新井房夫編: 火山灰考古学. 古今書院, 30-53.
- 伴 雅雄・林 信太郎・高岡宜雄(2001): 東北日本弧、島海火山のK-Ar年代: 連続的に活動した3個の成層火山. 火山, **46**, 317-333.
- Capra, L. and Macias, J.L. (2002): The cohesive Naranjo debris-flow deposit (10 km^3): A dam breakout flow derived from the Pleistocene debris-avalanche deposit of Nevado de Colima Volcano (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **117**, 213-235.
- 中馬教允・吉田 義(1982): 磐梯山南麓の地質について. 福島大学特定研究報告, **3**, 21-32.
- Crandell, D.R., Miller, C.D., Glicken, H.X., Christiansen, R.L. and Newhall, C.G. (1984): Catastrophic debris avalanche from ancestral Mount Shasta volcano, California. *Geology*, **12**, 143-146.
- 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.
<http://www.geo.chs.nihon-u.ac.jp/tchiba/volcano/index.htm> [Cited 2009/8/6]
- 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.
- 土井宣夫(2000): 岩手山の地質—火山灰が語る噴火史. 滝沢村教育委員会.
- 土井宣夫・大石雅之・吉田裕生(1991): 岩手火山山麓の岩屑なだれ堆積物の ^{14}C 年代—岩手火山噴出物とそれに関連する堆積物の ^{14}C 年代(その3). 岩手県立博物館研究報告, **9**, 1-12.
- 土井宣夫・菅野康隆・東野桂一・越谷 信・矢内桂三(1997): 秋田駒ヶ岳起源の先達川岩屑なだれ堆積物について. 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, 807.
- 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, **2003**, 57.
- 藤井登美夫(1976): 御嶽火山木曾川泥流堆積物の産状とその流下・堆積様式. 愛知教育大地理報告, **45**, 114-120.
- 藤縄明彦・藤田浩司・高橋美保子・梅田浩司・林信太郎(2001): 栗駒火山の形成史. 火山, **46**, 269-284.
- 藤田和久(1988): 那須火山最近4万年間の地形発達. 金沢大学文学部地理学報告, **4**, 111-123.
- 藤田浩司・藤縄明彦(1997): 栗駒火山の岩石学的研究

- (その1): 全岩化学組成から見た特徴. 日本火山学会講演予稿集, **1997**(2), 19.
- 藤田 崇・大八木規夫・大森博雄 (司会)・奥西一夫・諏訪 浩・大八木規夫 (要約) (1987): 火山体の解体とそれに伴う土砂移動に関する討論の記録. 地形, **8**, 145-153.
- 藤原 治・三箇智二・大森博雄 (1999): 日本列島における侵食速度の分布. サイクル機構技報, **5**, 85-93.
- Glicken, H. (1996): Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens Volcano, Washington. *USGS Open-file Report 96-677*, 1-90.
- Glicken, H. (1998): Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens Volcano, Washington. *Bulletin of Geological Survey of Japan*, **48** (2/3), 55-106.
- 林 信太郎 (1984): 鳥海火山の地質. 岩石鉱物鉱床学会誌, **79**, 249-265.
- 林 信太郎・鎌田孝子・伴 雅雄・梅田浩司 (1999): 成層火山の侵食速度に関する研究—東北地方の第四紀火山におけるケーススタディ. 1999年地球惑星関連学会合同大会予稿集, Vc-013.
- 早津賢二 (2008): 妙高火山群—多世代火山のライフヒストリー. 実業公報社.
- 堀 伸三郎・川村幸二・畠山秀喜・小野晃司・山口靖 (1991): 那須火山北西麓の岩屑なだれ堆積物とその比抵抗断面. 日本火山学会講演予稿集, **1991**(1), 44.
- 星住英夫・三村弘二 (1988): 別府地域の岩屑なだれ堆積物. 日本火山学会講演予稿集, **1988**(2), 90.
- Ichimura, T. (1955): Activities of the Gassan Volcano. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, **33**, 419-432.
- 井村隆介 (1995): 岩木火山の噴火史. 日本地質学会学術大会講演要旨, **102**, 245.
- 井口 隆 (1988): 日本における火山体の山体崩壊と岩屑流—磐梯山・鳥海山・岩手山の事例研究. 国立防災科学技術センター研究報告, **41**, 163-275.
- 井口 隆 (1989): ハケ岳火山における山体崩壊と岩屑流—日本における火山体の山体崩壊と岩屑流 (その2). 国立防災科学技術センター研究報告, **43**, 169-221.
- 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.
- 井上公夫 (1999): 1792年の島原四月朔地震と島原大変後の地形変化. 砂防学会誌, **52**(4), 45-54.
- 井上公夫 (2009): 噴火の土砂洪水災害—天明の浅間焼けと鎌原土石なだれ. 古今書院.
- 井上公夫・坂口哲夫・町田尚久・平 春 (2009): ハケ岳大月岩屑なだれ (887) によって形成・決壊した天然ダム. 平成21年度砂防学会発表会概要集, 264-265.
- 磯 望・山川克己・米沢 宏・松原敏子 (1980): 岐阜県高平原流域における土石流による岩屑供給と沖積錘の成長. 地理学評論, **53**, 699-720.
- 一色直記・大沢 穠 (1967): 岩木火山北東麓の泥流丘群. 火山第2集, **12**, 149.
- 岩塚守公・町田 洋 (1962): 富士山大沢の発達—火山の谷の発達と侵蝕機構についての基礎的研究. 地学雑誌, **71**, 143-158.
- 加藤万太郎 (1977): 鳥海山北西麓, 象潟泥流の分布と形成年代について. 秋田地学, **26**, 10-14.
- 加藤万太郎 (1984): 鳥海山北麓, 由利原の形成年代と火砕流について. 日本地質学会学術大会講演要旨, **91**, 348.
- 河内晋平 (1983a): ハケ岳大月川岩屑流. 地質学雑誌, **89**, 173-182.
- 河内晋平 (1983b): ハケ岳大月川岩屑流の¹⁴C年代. 地質学雑誌, **89**, 599-600.
- 河内晋平 (1989): ハケ岳相木川岩屑なだれ堆積物. 日本火山学会講演予稿集, **1989**(2), 121.
- Kawachi, S. and Hayatsu, K. (1994): Debris avalanche and lahar deposits in the Yatsugatake Volcanic Chain and Myoko Volcano Group, central Japan. *Journal of Natural Disaster Science*, **16**, 55-69.
- 河内晋平・町田 洋 (2006): ハケ岳火山—長期間活動してきた大型火山群. 町田 洋・松田時彦・海津正倫・小泉武策編: 日本の地形5中部. 東京大学出版会, 96-101.
- 小林哲夫・筒井正明・奥野 充 (2008): 九重火山, 松の台岩屑なだれの給源と堆積物の特性. 日本地質学会学術大会講演要旨, **115**, 57.
- 甲府盆地第四紀研究グループ (1969): ハケ岳南麓の地質. 地質学雑誌, **75**, 401-416.
- 町田 洋 (1962): 荒廃河川における侵食過程—常願寺川の場合. 地理学評論, **35**, 157-174.
- 町田 洋 (1964): 姫川流域の一溪流の荒廃とその下流部に与える影響. 地理学評論, **37**, 477-487.
- 町田 洋 (1984): 巨大崩壊, 岩屑流と河床変動. 地形, **5**, 155-178.
- 町田 洋 (1986): 立山の大鳶崩れ. 町田 洋・小島圭二編: 日本の自然8自然の猛威. 岩波書店, 102-111.
- 町田 洋・古谷尊彦・中村三郎・守屋以智雄 (1987): 日本の巨大山地崩壊. 文部省科学研究費自然災害研究特別研究 (1), 報告書「崩壊の規模, 様式, 発生機構とそれに係る山体地下水の動態」, 165-182.
- 三村弘二・鹿野和彦 (2000): 東北日本, 白鷹火山の層序と歴史. 火山, **45**, 13-23.
- 三村弘二・関口辰夫 (2001): 東北日本, 岩木火山北東麓の流れ山のK-Ar年代と岩木火山の火山体形成およびその崩壊時期. 火山, **46**, 17-20.
- 三村弘二・鹿野和彦・中野 俊・星住英夫 (1988): 1984年御嶽岩屑なだれ—堆積物からみた流動・堆積機構. 地質調査所月報, **39**, 495-523.
- 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.
- 宮崎洋三・大西外明 (1994): 貯水池堆砂量の経年変化と比堆砂量に関する考察. 土木学会論文集, **497**, 81-90.
- 水野 裕 (1962): 鳥海山麓の火山噴出物とその地形に

- ついて。東北地理, **14**, 103-106.
- 森野泰行 (1996): 岩手火山起源の大規模岩屑流の層序と地形変化。駒澤地理, **32**, 83-105.
- 守屋以智雄 (1970): 赤城火山の形成史。火山第2集, **15**, 120-131.
- 守屋以智雄 (1980): “磐梯式噴火”とその地形。西村嘉助先生退官記念地理学論文集, 214-219.
- 守屋以智雄 (1987): 火山体の解体における大崩壊の意義。地形, **8**, 67-82.
- 守屋以智雄 (2003): 尻別火山。小疇 尚・野上道男・小野有五・平川一臣編: 日本の地形2 北海道。東京大学出版会, 272.
- 中村庄八 (1997): 小野子火山の地質とその基盤の構造。地球科学, **51**, 346-360.
- 中村俊夫・藤井登美夫・鹿野勘次・木曾谷第四紀研究会 (1992): 岐阜県八百津町の本曾川泥流堆積物から採取された埋没樹木の加速器 ^{14}C 年代。第四紀研究, **31**, 29-36.
- 小花和宏之・徳永朋祥・小口 高 (2008): 伊豆小笠原諸島における噴出年代の異なる火山体の侵食過程に関する検討。地形, **29**, 86.
- 小口 高 (1991): 山地流域の侵食域と堆積域における最終氷期末期以降の土砂移動の量的検討。地形, **12**, 25-39.
- Oguchi, T. (1996a): Late Quaternary hillslope erosion rates in Japanese mountains estimated from landform classification and morphometry. *Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge, Supplementary Band*, **106**, 169-181.
- Oguchi, T. (1996b): Relaxation time of geomorphic responses to Pleistocene-Holocene climatic change. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **17**, 309-321.
- Ohmori, H. (1978): Relief structure of the Japanese mountains and their stages in geomorphic development. *Bulletin of the Department of Geography, University of Tokyo*, **10**, 31-85.
- Ohmori, H. (1983): Characteristics of the erosion rate in the Japanese mountains from the viewpoint of climatic geomorphology. *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F. Supplementband*, **46**, 1-14.
- 大澤幸太・小口 高・野上道男 (2009): 東日本における第四紀成層火山の開析度と形成年代の関係。地形, **30**, 56.
- 大沢隆司 (1989): 本曾川泥流の規模と流下様式。日本地質学会学術大会講演要旨, **96**, 512.
- Ouchi, S. and Mizuyama, T. (1989): Volume and movement of Tombi Landslide in 1858, Japan. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **10**, 27-51.
- 大八木規夫 (1987): シンポジウム「火山体の解体及びそれに伴う土砂移動」によせて。地形, **8**, 65-66.
- Satake, K. and Kato, Y. (2001): The 1741 Oshima-Oshima eruption: Extent and volume of submarine debris avalanche. *Geophysical Research Letters*, **28**, 427-430.
- Sekiya, S. and Kikuchi, Y. (1889): The eruption of Bandai-san. *The Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo, Japan*, **3**, 91-172.
- 清水 智・山崎正男・守屋以智雄・佐藤博明 (1985): 白山火山山頂部の崩壊と大白川岩屑流。火山第2集, **30**, 299-300.
- 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. (1992): Threats from debris avalanches. *Nature*, **356**, 658-659.
- Siebert, L., Glicken, H. and Ui, T. (1987): Volcanic hazards from Bezymianny- and Bandai-type eruptions. *Bulletin of Volcanology*, **49**, 435-459.
- 早田 勉 (1990): 群馬県の自然と風土。群馬県史編さん委員会編: 群馬県史通史編1。群馬県, 37-129.
- 鈴木隆介 (1966): いわゆる韭崎泥流について。地理学評論, **39**, 363-364.
- 鈴木隆介 (1969): 日本における成層火山体の侵食速度。火山第2集, **14**, 133-147.
- 鈴木隆介・横山勝三 (1981): 火山体の削剥速さ。地形, **2**, 53-58.
- 鈴木毅彦・木村純一・早田 勉・千葉茂樹・小荒井衛・新井房夫・吉永秀一郎・高田将志 (1995): 磐梯火山周辺に分布する広域テフラ。地学雑誌, **104**, 551-560.
- 橘 英彰 (2004): 栃木県北部, 日光火山群女峰赤薙火山で約12-15万年前に起きた大規模山体崩壊。日本地理学会予稿集, **65**, 66.
- 宝田晋治 (1991): 岩屑流の流動・堆積機構: 田代岳火山起源の岩瀬川岩屑流の研究。火山, **36**, 11-23.
- 宝田晋治 (2002): 岩屑などれの堆積構造と流動機構。2002年産業技術総合研究所北海道センター地質シンポジウム。
<http://www.gs.jp/Hokkaido/BBoard/sympo02/symp02.htm> [Cited 2009/08/21].
- Takarada, S. and Melendez, C. (2006): Depositional features and transport mechanism of debris avalanches: The 1980 Mount St. Helens, Usu Zenkoji, and 1792 Unzen Mayuyama debris avalanches. *17th International Sedimentological Congress, Fukuoka, Japan*, O-152.
- 竹本弘幸 (1998): 3. 赤城火山—北関東の火山灰のふるさとをめぐって。高橋正樹・小林哲夫編: フィールドガイド日本の火山①関東・甲信越の火山I。築地書館, 52-73.
- Tanaka, M. (1982): A map of regional denudation rate in the Japanese mountains. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **3**, 159-167.
- 宇井忠英 (1975): 月山北西山麓のいわゆる“泥流堆積物”の起源。火山第2集, **20**, 110.
- Ui, T. (1983): Volcanic dry avalanche deposits—identification and comparison with nonvolcanic debris stream deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **18**, 135-150.
- 宇井忠英・荒牧重雄 (1983): 1980年セントヘレンズ火山のドライアバランシュ堆積物。火山第2集, **28**,

- 289-299.
- Ui, T., Yamamoto, H. and Suzuki-Kamata, K. (1986): Characterization of debris avalanche deposits in Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **29**, 231-243.
- Voight, B., Glicken, H., Janda, R. and Douglass, P.M. (1981): Catastrophic rockslide-avalanche of May 18. *U.S. Geological Survey, Professional Paper*, **1250**, 347-377.
- Voight, B., Janda, R.J., Glicken, H. and Douglass, P.M. (1983): Nature and mechanism of the Mount St. Helens rockslide-avalanche of May 1980. *Geotechnique*, **33**, 243-273.
- 八木浩司・早田 勉・井口 隆・原口 強・伴 雅雄 (2005): 蔵王火山および白鷹火山の巨大山体崩壊発生時期. 第四紀研究, **44**, 263-272.
- 山田 淳 (1986): 越前経ヶ岳唐谷川岩屑流と経ヶ岳火山の解体について. 金沢大学文学部地理学報告, **3**, 83.
- 山元孝広 (1999): 田島地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所.
- 山元孝広・須藤 茂 (1996): テフラ層序からみた磐梯火山の噴火活動史. 地質調査所月報, **47**, 335-359.
- 山崎正男・富樫茂子・守屋以智雄・清水 智 (1987): 白山火山大白川岩屑流堆積物中の木片の ^{14}C 年代. 火山第 2 集, **32**, 123-124.
- 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.
- 吉田英嗣・須貝俊彦 (2006): 24,000 年前の浅間火山大規模山体崩壊に由来する流れ山地形の特徴. 地学雑誌, **115**, 638-646.
- Yoshida, H. and Sugai, T. (2007a): Topographical control of large-scale sediment transport by a river valley during the 24 ka sector collapse of Asama volcano, Japan. *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, **2007**, n°3, 29-36.
- Yoshida, H. and Sugai, T. (2007b): Magnitude of the sediment transport event due to the Late Pleistocene sector collapse of Asama volcano, central Japan. *Geomorphology*, **86**, 61-72.
- Yoshida, H., Sugai, T. and Ohmori, H. (2008): Quantitative study on catastrophic sector collapses of Quaternary volcanoes compared with steady denudation in contemporary Japanese mountains. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **29**, 377-385.
- Yoshida, H., Sugai, T. and Ohmori, H. (2010): Longitudinal downsizing of hummocks by the freely-spreading volcanic debris avalanches in Japan. *The Quaternary Research (Tokyo)*, **49**, 55-67.
- Yoshikawa, T. (1974): Denudation and tectonic movement in contemporary Japan. *Bulletin of the Department of Geography, University of Tokyo*, **6**, 1-14.
- Yoshikawa, T., Kaizuka, S. and Ota, Y. (1981): *The Landforms of Japan*. University of Tokyo Press, Tokyo.
- 吉本充宏・宇井忠英 (1998): 北海道駒ヶ岳火山 1640 年の山体崩壊. 火山, **43**, 137-148.
- 吉本充宏・古川竜太・七山 太・西村裕一・仁科健二・内田康人・宝田晋治・高橋 良・木下博久 (2003): 海域に流入した北海道駒ヶ岳火山 1640 年岩屑なだれ堆積物の分布と体積推定. 地質学雑誌, **109**, 595-606.

(2009 年 8 月 21 日受付, 2010 年 3 月 8 日受理)