

九州尾鈴山火山深成複合岩体のカルデラ内岩屑なだれ堆積物

三村 弘二*・巖谷 敏光**

(2008年12月5日受付, 2009年9月10日受理)

Intracaldera Debris Avalanche Deposit Associated with Osuzuyama
Volcano-plutonic Complex in Kyushu, Southwest Japan

Koji MIMURA* and Toshimitsu IWAYA**

Miocene Osuzuyama volcano-plutonic complex 30 km across in diameter around 15 Ma reveals intracaldera debris, newly named Kanaiso debris avalanche deposit. The solidified deposit involves irregular blocks reaching 50 m across as a megablock and displays sedimentary characteristics clearly instead of the lost topography, such as blocks showing peculiar plastic deformation, disjunction and displacement along the joints as well as jigsaw-puzzle cracks and patchwork texture with the matrix. Imbrication and flame-shaped tail of the blocks develop near the boundary with the basement, indicating the flow direction of avalanche not from the inner caldera. Also, a concentration in orientation of the long axis develops.

The avalanche deposit consists of debris derived from the basement Shimanto supergroup of Cretaceous to Early Miocene, Iorigawa conglomerate and Welded tuff 1 of rhyolite in the lower units of the complex. But no debris derived from Welded tuff 2 of dacite in the upper unit of the complex appears in the deposit, except a few obsidian blocks in the same chemical composition of the Welded tuff 2. Neither pumice nor volcanic ash exists in the deposit obviously.

The avalanche deposit occupies two horizons in detail. The lower one overlies the basement and the solidified Welded tuff 1 and is overlain by the Welded tuff 2. Another one intercalates in the lower part of the Welded tuff 2.

These facts suggest that the Kanaiso debris avalanche deposit derived from the unstable caldera wall most probably soon after the caldera collapse of the complex. No debris avalanche appeared during the first pumice eruption to issue the Welded tuff 1. But putting a cooling lag after the first pumice eruption, avalanches occurred before the main phase in the second pumice eruption producing the Welded tuff 2.

Key words: intracaldera debris avalanche deposit, plastic deformation, imbrication, orientation of blocks, Miocene Osuzuyama volcano-plutonic complex.

1. はじめに

近年、カルデラ形成時に岩屑なだれ堆積物が伴われることが明らかになってきている。古くは始新世 50 Ma のカナダ Bennett lake cauldron subsidence complex (Lambert, 1974) や、金属鉱床が豊富な中新世 27 Ma (Lanphere, 2000) の北米 San Juan Mountain, Creede caldera (Steven and

Ratté, 1965) などで知られる。同じく San Juan caldera cluster (Lipman, 2000) で caldera-collapse landslide deposit, landslide breccia または caldera-collapse breccia あるいは megabreccia など (Lipman, 1976) と呼ぶ堆積物も、この種の岩屑なだれ堆積物を含んでいる可能性がある。

日本では、西南日本白亜紀有馬層群のカルデラ火山で

* 〒305-0034 つくば市小野崎 362-4

独立行政法人産業技術総合研究所地質情報研究部門
元主任研究員

Former chief staff of Institute of Geology and Geo-
information, National Institute of Advanced Industrial
Science and Technology.

Present address is Onozaki 362-4, Tsukuba 305-0034,
Japan.

** 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第 7

独立行政法人産業技術総合研究所地質情報研究部門
Institute of Geology and Geoinformation, National
Institute of Advanced Industrial Science and Tech-
nology, Higashi 1-1-1, Tsukuba 305-8567, Japan.

Corresponding author:

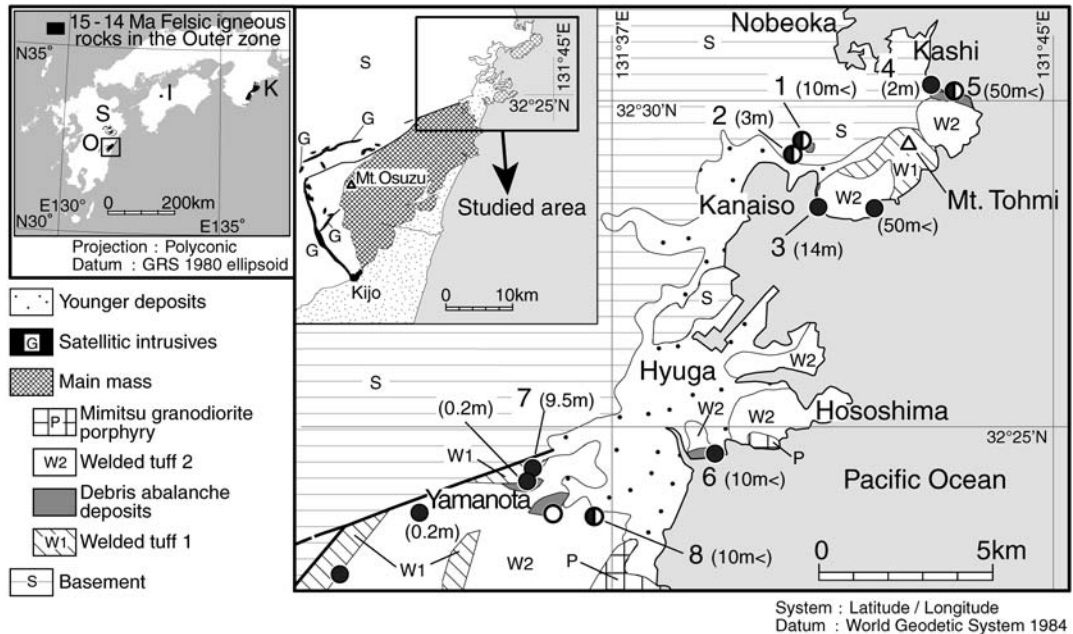


Fig. 1. Locality map based on Iwaya and Mimura (1992). Miocene volcano-plutonic complex around 15 Ma along the Outer zone: Osuzuyama (O), Okueyama (S), Ishizuchiya (I), and Kumano (K). Circle: outcrop of the debris avalanche deposit and the locality number in the text. The debris avalanche deposit contains blocks abundantly of the basement and the Iorigawa conglomerate (solid circle), abundantly of the Welded tuff 1 (open circle) or apparently even of them (half solid circle). The maximum size of the observed blocks is shown in parentheses.

図 1. 地点図。地質図は巖谷・三村 (1992) に基づく。中新世中期西南日本外帯に沿う火山深成複合岩体: 尾鈴山 (O), 大崩山 (S), 石鎚山 (I), 熊野 (K)。丸印: 岩屑なだれ堆積物の観察点と本論地点番号 (黒丸: 岩屑なだれ堆積物のブロックで基盤と庵川礫岩層が優勢, 白丸: 同溶結凝灰岩層 1 が優勢, 半黒丸: 優劣なし)。カッコ内数字は観察ブロックの最大径。

岩屑なだれ堆積物 (松浦・三村, 1987a, b; 三村・松浦, 1987) の報告があって以来, 中新世の東北日本や白亜紀～古第三紀の西南日本で同様の知見が蓄積している (今岡, 1994; 大竹, 2000; 曾根原・原山, 2005; Yamamoto, 2003)。いずれの例でも, 岩屑なだれ堆積物の存在が現在では観察できないカルデラ壁, つまりカルデラが形成されたことの証拠となる。

九州宮崎県の尾鈴山火山深成複合岩体 (巖谷・三村, 1991. Fig. 1) は中新世中期の 15–14 Ma に集中して西南日本外帯沿いに生じた大規模酸性火山深成活動の産物の一つである (木村・三村, 1991)。この尾鈴山火山深成複合岩体と同様, 中新世の西南日本外帯に沿って酸性火山深成活動を行った熊野酸性火成岩類 (荒牧・羽田, 1965; Kawakami *et al.*, 2007) や石鎚コールドロン (Yoshida, 1984; 吉田・他, 1993), 大崩山火山深成複合岩体 (Takahashi, 1986) で, カルデラ形成の証拠となる岩屑なだれ堆積物の明確な存在は知られていない。これは浸食レベルが深

く岩屑なだれ堆積物が削割されてしまっているか, 岩屑なだれ堆積物が火道から噴出した火砕物と区別されていなかったことに一因があるのかもしれない。

本研究において尾鈴山火山深成複合岩体で火道から噴出したとされる火山角礫岩 (中田, 1978) を再検討した結果, 岩屑なだれ堆積物であることがわかった。本論ではこれを金礫岩屑なだれ堆積物と呼び, その特徴について論ずる。本岩体は浸食レベルが岩体の基底まで達し, 噴出物と岩屑なだれの関係を野外で確実に判定できる。また堆積物の固化により, 流れ山地形を保つ第四紀火山の岩屑なだれ堆積物の脆い断面では困難な詳細な観察が工事中壁面のみならず海岸の広い露岩で可能である。

2. 地質概説

尾鈴山火山深成複合岩体の分布は, 宮崎市北の木城町から延岡市の南にかけて尾鈴山 (標高 1,405 m) を含む東西南北各 30 km 余におよぶ (国土地理院 5 万分の 1

層序区分 Stratigraphic succession		放射年代 Ma	
衛星岩体 Satellitics	木城花崗閃緑岩と付随岩脈 Kijo granodiorite and dikes	11-16	
主岩体 Main mass	美々津花崗閃緑斑岩 Mimitsu granodiorite porphyry	14-16	→ カルデラ内マグマ上昇 Upward of intracaldera magma
	溶結凝灰岩層2(上部) Welded tuff 2	13-17	→ 火砕流主噴火 Main re-eruption of pumice
	金礫岩屑なだれ堆積物(上部) Kanaiso debris avalanche deposit		→ カルデラ壁の崩壊 Collapse of caldera wall
	溶結凝灰岩層2(下部) Welded tuff 2	13-17	→ 火砕流再噴火 Re-eruption of pumice
	金礫岩屑なだれ堆積物(下部) Kanaiso debris avalanche deposit		→ カルデラ壁の崩壊 Collapse of caldera wall
	溶結凝灰岩層1 Welded tuff 1		→ 最初の火砕流噴火 First eruption of pumice
	庵川礫岩層 Iorigawa conglomerate		

Fig. 2. Sequence of the stratigraphy (left column) and caldera-related events (right column) at the Osuzuyama volcano-plutonic complex modified from Iwaya and Mimura (1992). See text for details.

図 2. 尾鈴山火山深成複合岩体の層序区分（左欄，巖谷・三村，1992 を一部修正）とカルデラ形成に伴う事件の発生順序（右欄）。

地形図で、^{みかど} 神門、^{つの} 都農、尾鈴山）。岩体は尾鈴山陥没地域（木村・三村，1991）の主岩体と、これを取り巻く衛星岩体からなる（Fig. 1）。

岩体の基盤は白亜紀後期から中新世前期の四万十累層群で、中新世後期から更新世前期の宮崎層群が岩体を不整合で覆う（木村・三村，1991）。岩体には中新世中期で約 15 Ma の黒雲母と全岩の K-Ar 年代値（巖谷・三村，1992）と 12 Ma 前後のアパタイトのフィッシュ・トラック年代値（Hasebe and Hoshino, 2003）がある。岩体の層序区分を Fig. 2 の左欄に示す。

主岩体は下部から、礫岩（庵川礫岩層，厚さ 100–300 m）、溶結凝灰岩（溶結凝灰岩層 1 と溶結凝灰岩層 2，累計層厚 600 m 以上）、岩屑（金礫岩屑なだれ堆積物）、貫入岩（美々津花崗閃緑斑岩）からなる。衛星岩体は基盤の四万十累層群を貫く岩脈（木城花崗閃緑岩及び関連する付随岩脈）である（佐藤，1991）。

主岩体の溶結凝灰岩層 1 は黒雲母流紋岩で、溶結凝灰岩層 2 は主に黒雲母斜方輝石デイサイトである。溶結凝灰岩層の葉理はところにより変化するが、基盤のように著しい褶曲変位は受けていない。美々津花崗閃緑斑岩は黒雲母斜方輝石花崗閃緑斑岩で主岩体に分散して分布する。

3. 金礫岩屑なだれ堆積物

金礫岩屑なだれ堆積物（以下岩屑なだれ堆積物）は尾鈴山火山深成複合岩体が基盤と接する主岩体北東部に露

出する（Fig. 1）。模式地は日向市北北東約 8 km の金磯西海岸（地点 3）で、堆積物の厚さは模式地で 20 m を超える。13 の観察地点はすべて中田（1978）の火山角礫岩の分布に一致する。中田（1978）は火山角礫岩を溶結凝灰岩層 1 下位の V.B. 1 と溶結凝灰岩層 2 下位の V.B. 2 に区分した。岩屑なだれ堆積物は溶結凝灰岩層 2 下位の V.B. 2 に相当し、溶結凝灰岩層 1 下位の V.B. 1 相当層は現地では確認できなかった。

岩屑なだれ堆積物は 2 層準で確かめられる。一つは溶結凝灰岩層 1 上位で溶結凝灰岩層 2 の下位にある下部層である（Fig. 3）。他の層準は溶結凝灰岩層 2 下部に挟まれる上部層である（Fig. 4）。岩屑なだれ堆積物が覆う下位の溶結凝灰岩層 1 と溶結凝灰岩層 2 の表面には高低差 15 m に達する起伏があり、その表層の一部はブロック化している（Figs. 3 and 4）。一方、岩屑なだれ堆積物とその上位の溶結凝灰岩層との境は高低差 20 m に達する大きな起伏を示し、岩屑なだれ堆積物との境から数 m 以内における上位の溶結凝灰岩層には顕著な柱状節理は発達していない。岩屑なだれ堆積物の上部層と下部層の層相に大きな差はなく、以下にまとめて記す。

堆積物は無層理無淘汰で、多種多様なブロック（block）と比較的均質な基質（matrix）からなる（Fig. 5）。ブロックの種類や大きさは場所により変化に富む（Fig. 1）。そのため露頭ごとで異なる地層に見えることがある。

ブロックは巨大岩塊（megablock: Mimura and Kawachi, 1981）を含む（Fig. 6）。最大の巨大岩塊は金磯東方 1.3

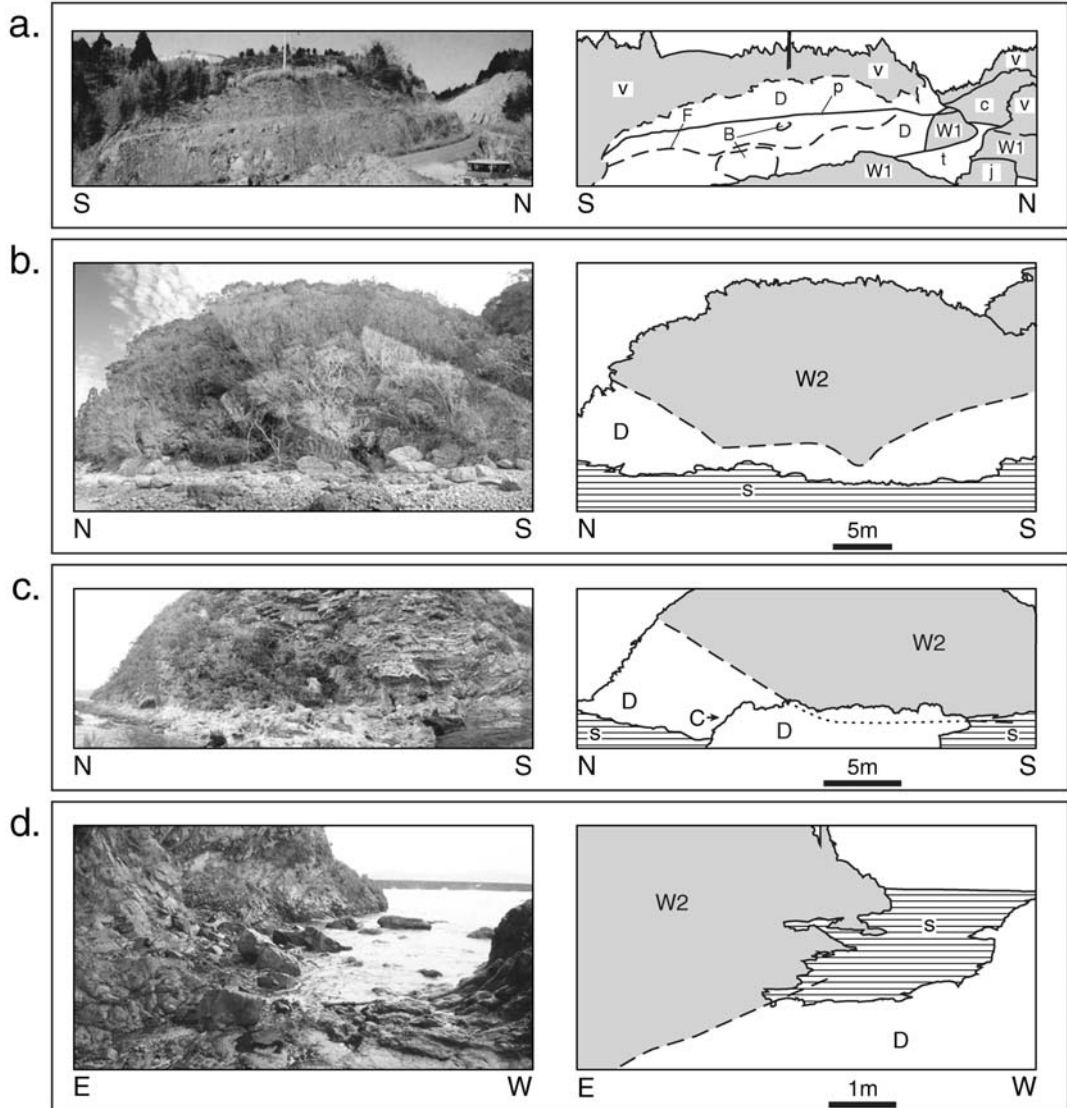


Fig. 3. Debris avalanche deposit which covers the Welded tuff 1 and underlies the Welded tuff 2. a. Debris avalanche deposit (D) on the Welded tuff 1 (W1) at locality 7 north of Yamanota, western southwest of Hyuga city. B: outstanding blocks of the Welded tuff 1, F: flow boundary shown with a wavy etching line, p: step under construction, t: road, v: vegetation, j: a jeep-type car, c: concrete-covered sidewall of the Welded tuff 1. The present crop is covered. b-d. Debris avalanche deposit (D) crops under the Welded tuff 2 (W2). b. North coast of the type locality 3. c. The type locality. d. View from the direction of C in figure c. s: sea side.

図 3. 溶結凝灰岩層 1 を覆い、溶結凝灰岩層 2 に覆われる岩層なだれ堆積物 (下部層). a. 溶結凝灰岩層 1 (W1) を覆う岩層なだれ堆積物 (D), 日向市街西南西の山の田北方 (地点 7). B: 目立つ溶結凝灰岩層 1 のブロック, F: 露頭表面のエッチングで堆積物断面に浮き出た境, p: 工事用ステップ, t: 車道, v: 植生, j: ジープ型の車, c: 溶結凝灰岩層 1 のコンクリート路壁. 本露頭は現在コンクリート側壁が覆う. 溶結凝灰岩層 2 (W2) 下位の岩層なだれ堆積物 (D), b. 模式地地点 3 の北海岸. c. 模式地. d. 図 c 中の C 方向から見た堆積物. s: 海浜.

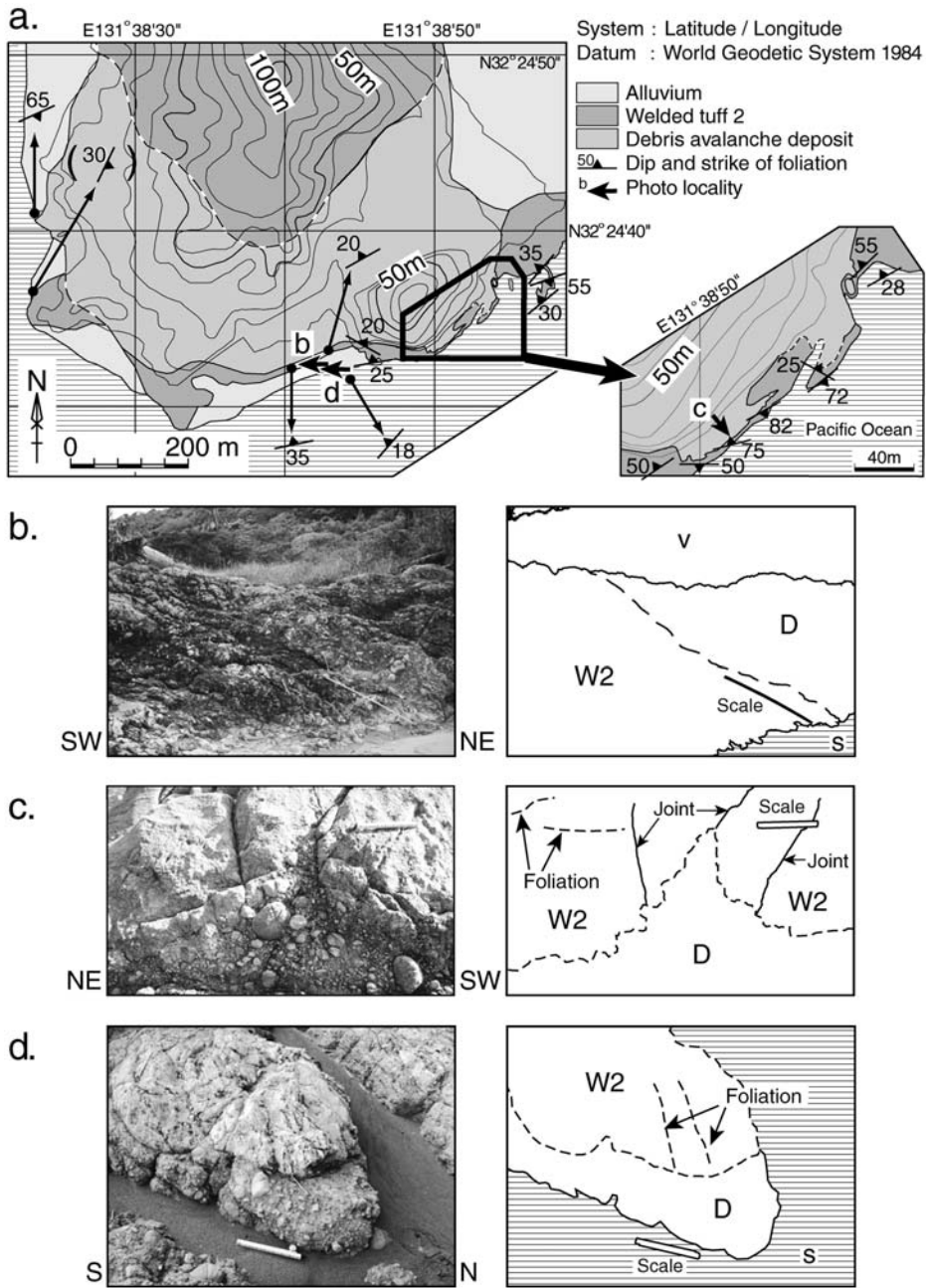


Fig. 4. Debris avalanche deposit intercalated in the Welded tuff 2. a. Distribution map around the northern sea shore of Oguragahama, locality 6. b. Contact between the debris avalanche deposit (D) and the lower Welded tuff 2 (W2). s: sea side. Scale is 1 m. c. Irregular contact cuts the foliation of the lower Welded tuff 2 (W2) on a horizontal sea-side crop. See the direction of photo in a. Scale is 20 cm. d. Debris avalanche deposit (D) cuts the foliation in the block of the lower Welded tuff 2 (W2) near their boundary. s: sea side. Scale is 20 cm.

図 4. 溶結凝灰岩層 2 に挟まる岩層なだれ堆積物 (上部層). a. 分布地点図, 小倉ヶ浜北部 (地点 6). b. 岩層なだれ堆積物 (D) と下位溶結凝灰岩層 2 (W2) の境界部分の露頭. s: 海浜. v: 植生. スケールは 1 m. c. 下位の溶結凝灰岩層 2 (W2) の葉理を切り, 不規則な境で接する岩層なだれ堆積物 (D). 海浜の水平露頭で写真の上方が下位 (図 a の撮影方位参照). スケールは 20 cm. d. 境界近くでブロック化した下位の溶結凝灰岩層 2 (W2) の葉理を切る岩層なだれ堆積物 (D). s: 海浜. スケールは 20 cm.

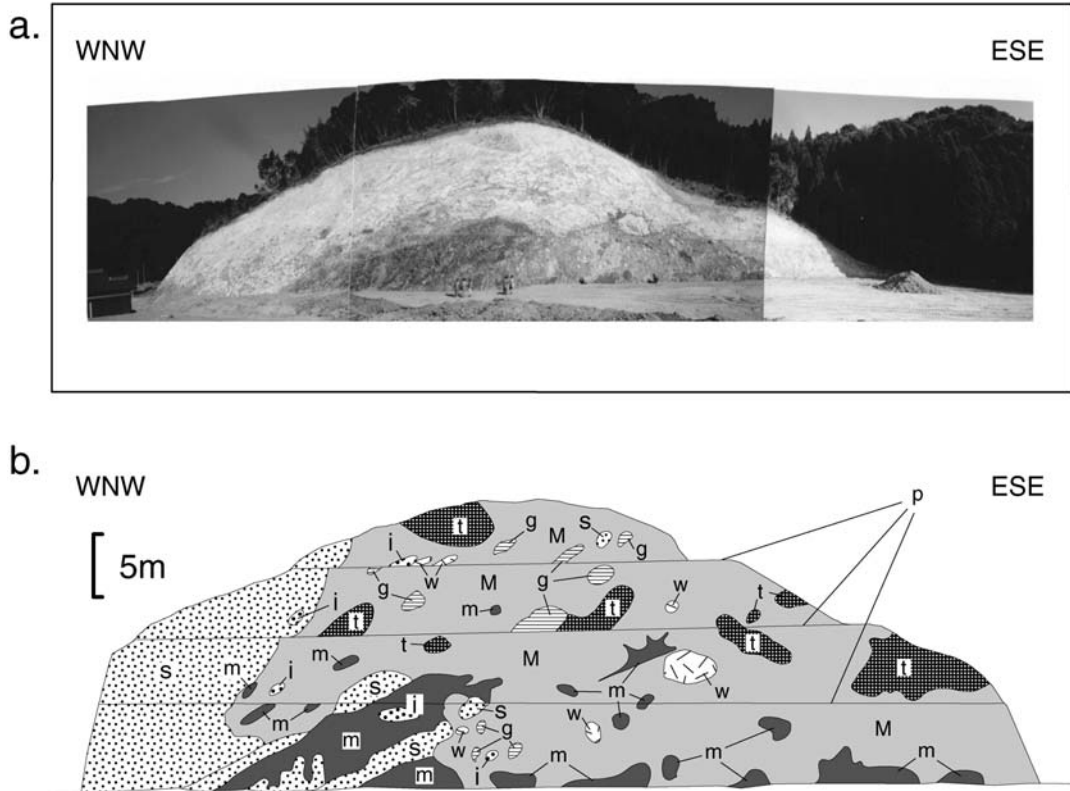


Fig. 5. Debris avalanche deposit including various blocks. a. View of the outcrop with weathered surface in light color at locality 1, western northwest of Iorigawa. Several persons are standing in front of the center of the crop. b. Sketch of the cross section of debris avalanche deposit. Included blocks are mudstone (m), silt stone (t), sandstone (s) and green stone (g) from the basement. Others are the Iorigawa conglomerate (i) and the Welded tuff 1 (w). The matrix (M) is composed with mixed fragments of the blocks. p: steps under construction. The crop is covered with concrete now.

図 5. 多種多様なブロックを含む岩屑なだれ堆積物の断面（下部層，庵川北西宅地開発工事のり面，地点 1）。a. 地表に沿い風化し明色化した堆積物の断面。露頭下中央に複数人物。b. 同露頭のスケッチ。基盤四万十累層群の泥岩 (m)，シルト岩 (t)，砂岩 (s)，緑色岩 (g) と、庵川礫岩層 (i)，溶結凝灰岩層 1 (w) のブロックを含む。基質 (M) は混交した岩塊の碎片からなる。p: 工用ステップ。その後露頭はコンクリートで覆われた。

km の海岸で長径 50 m 以上に達する。ブロックは四万十累層群の砂岩，泥岩，緑色岩と，庵川礫岩層，溶結凝灰岩層 1 および非溶結部の軽石凝灰岩で，変質で判別が難しいことがある。溶結凝灰岩層 2 のブロックは含まない。ただし日向市街西南西の向洋台 (地点 8) では溶結凝灰岩層 2 の化学組成をもつ黒曜石のブロック (径 1 m ほど) を含む。軽石やスコリアは認められない。

堆積物の基質はブロックの碎片からなり，淘汰が悪いが，異種のブロックが混在して均質に見えることが多い。碎片は，より細粒な部分との境を認識できないことが多い (Fig. 7)。明瞭な軽石，スコリアの碎片や火山灰

は認められない。基質は暗灰色ないし灰色で，風化し黄褐色を呈する。基質の量は多い部分 (地点 1-3 周辺) からごく少ない部分 (地点 6 の周辺) まであり，一定しない。

岩屑なだれ堆積物中のブロックの外形は亜角礫-角礫で不規則である。ただし砂岩や泥岩など四万十累層群のブロックは一部円礫か亜円礫である。溶結凝灰岩層 1 のブロックは外形と無関係に配列した軽石レンズと節理をもつ。これは岩屑なだれ発生時に溶結凝灰岩層 1 が冷却固化していたことを示す。ブロックには岩屑なだれ堆積物の特徴である様々な塑性変形 (rubble schrieren: Glicken, 1998) やジグソー割れ目 (jigsaw puzzle effect:

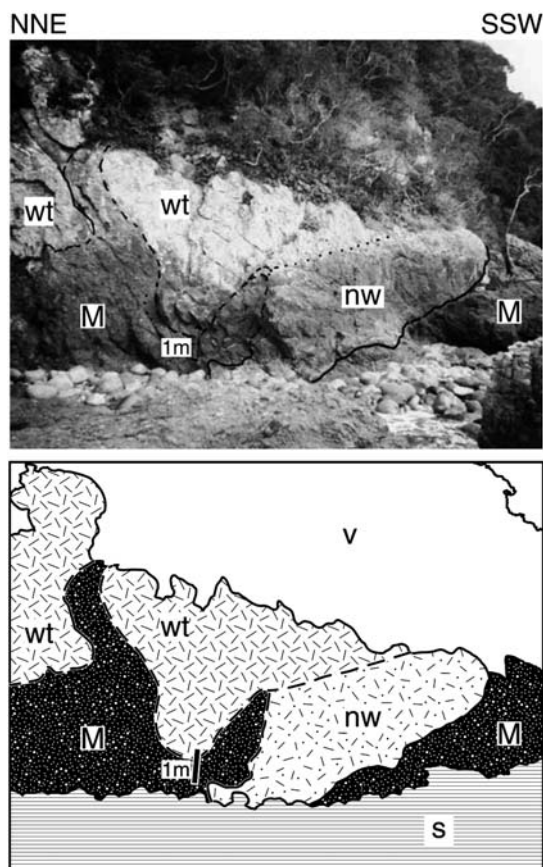


Fig. 6. Megablock in the debris avalanche deposit at locality 5 along Kashi seashore. wt: Welded tuff 1, nw: non-welded part of the Welded tuff 1, M: matrix. s: sea side, v: vegetation. 1m scale.

図 6. 岩屑なだれ堆積物（下部層）に含まれる巨大岩塊（地点 5、壑の海岸露頭）。wt: 溶結凝灰岩層 1 (nw: 非溶結部), M: 基質. s: 海浜, v: 植生. 中央左に 1m のスケール.

Shreve, 1968) が認められ, これに沿いほぐれた (dilute: Glicken, 1998) ブロックを観察できる (Fig. 8a-c and Fig. 9a). また, 開口した割れ目 (fracturing: Glicken, 1998) を持つブロックや '割れ目に沿い変位' したブロックもある (Fig. 8d,e). なかには複雑な境で密着した 2 種類の岩石ブロック (Fig. 9b) や, 多種のブロックがパッチワークを組み基質はごくわずかに認めるだけの露頭もある (Fig. 9c). 基盤の堆積岩ブロックでは特に変形が進み引きちぎれた泥岩も含む.

ブロックは基盤との境界付近で岩屑なだれの流れ方向を示す覆瓦構造 (imbrication: 三村, 2001) と火炎状突起 (中田, 1978) を有する. またブロックの長軸の方向には

偏りがある.

覆瓦構造は, 基盤との境界面に沿いブロックの長軸が斜行して並ぶ構造である. これにより模式地で岩屑なだれが北東から南西に向かい流れたことがわかる (Fig. 10). 露頭はこれと同方向に開口した割れ目を持つブロックも含む.

覆瓦状の構造は山の田 (地点 7, 地点 8) や壑の東海岸 (地点 4, 地点 5) でも観察できる. 地点 7 では岩屑なだれの底部でブロックの長軸が南西側へ傾斜する. 長軸方向の見かけの角度は S50°W から N50°E 方向を示す. 地点 8 では平らに引き伸ばされた砂質ブロック (厚さ 10 cm で長さ 2 m 程度) に対し覆瓦状に傾くブロックが認められ, 南から北への流れを示す. これらの流れ方向は地点毎に異なるが, カルデラ内から外への流れは示さない.

火炎状突起は覆瓦構造を示す壑海岸 (地点 4) で認められる. 突起は砂岩ブロックに覆瓦する泥岩ブロックの末端で, 下流方向へ炎状にほぐれかかっている (Fig. 11). 火炎状突起は Fig. 8b, c でも観察できる.

ブロックの長軸方向の偏りは, 模式地で海岸に沿う平坦な露頭面の長径約 1 m 以上のブロックで観察できる. そこで, アリゲードと巻尺を用いた平板測量で得たブロックの外形を多角形図形と仮定し, 重心から最遠頂点を結ぶ直線を長軸としてローズダイヤグラムを作成した (Fig. 12). ローズダイヤグラムからブロックの長軸はほぼ南北方向に偏ることがわかる. ただし局所的に基盤との境界近くでは境界面に沿い北東-南西にブロックの長軸方位が偏る. つまり, ブロックの長軸が偏在する方位は同一地域の覆瓦構造が示す岩屑なだれの流れ方向と斜交し, 基盤沿いでは平行する.

ブロックの長軸方位の偏りは金磯東方 1.3 km の海岸でも観察できる. ここではブロックの長軸が NE-SW 方向にほぼ平行に配列している.

4. 岩屑なだれ堆積物と火成活動史

中田 (1978) は火山角礫岩と呼んだ堆積物を, 尾鈴山火山深成複合岩体の東方海域にあった噴出口から粉体流として流走し堆積した (亀割坂角礫層 A 型: 荒牧, 1969) と考えた. 噴出口は本岩体のカルデラ内に位置する. しかし, 堆積物は巨大岩塊や塑性変形を受け, ほぐれ, 開口割れ目と割れ目に沿い変位したブロックを含む. このほか異種のブロック同士が密着し, ブロックと基質がパッチワークをなすなど顕著な岩屑なだれ堆積物の特徴を示す. 軽石や火山灰など噴火を直接示す物証も欠く. また塑性変形したブロックが示す方向配列で覆瓦構造と同方向に開口した割れ目や火炎状突起を持つブロック, ブロックの長軸方向の偏りなど規則的な構造があり, 断

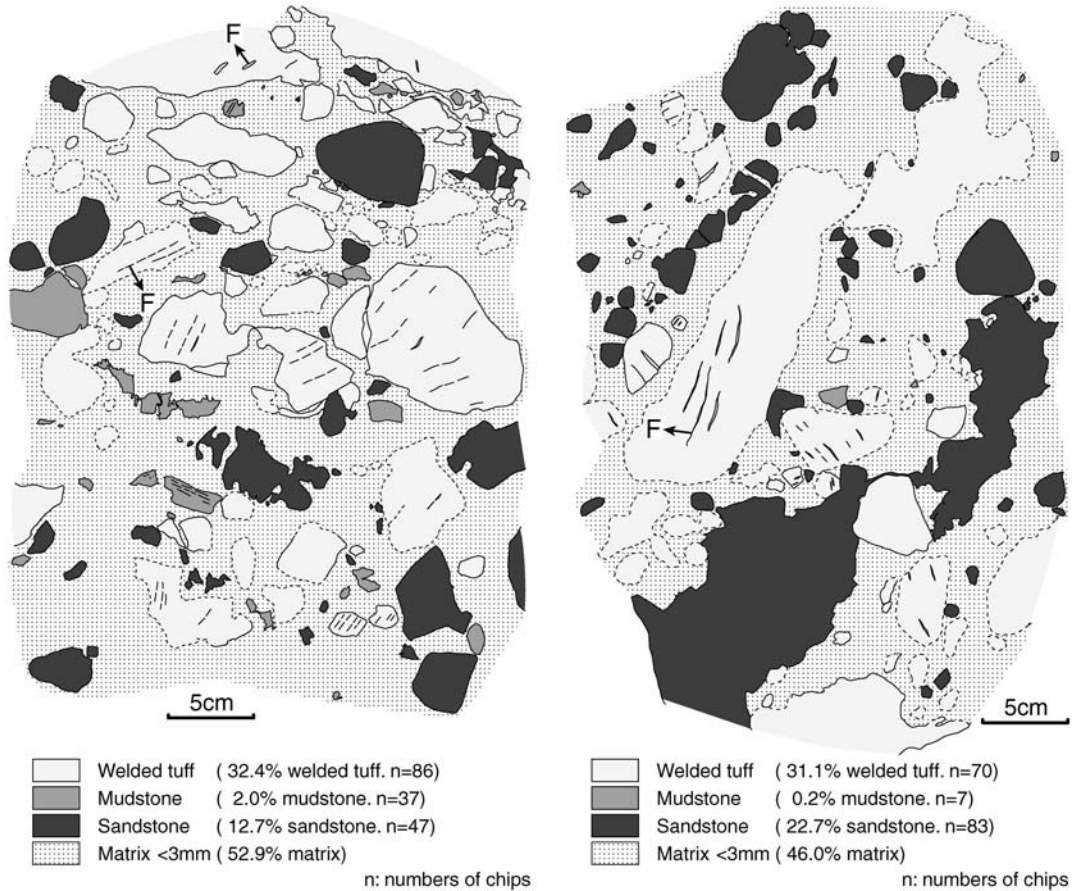


Fig. 7. Chips mixed in the matrix of the debris avalanche deposit shown on a stone wall at locality 2. Chips bear the peculiar behaviors as same as those of blocks. %: in area. F: foliation of welded tuffs.

図 7. 多種の破片が入り混じる岩屑なだれ堆積物の基質のスケッチ。破片にもブロック同様の特徴が認められる。地点 2, 公園石垣。%は面積比。F: 溶結凝灰岩の葉理。

層破砕帯のような破砕も受けていない。一方、噴出口の位置(中田, 1978 の Fig. 16)を推定した溶結凝灰岩層 2 の覆瓦構造(中田, 1978 の Fig. 14)は現地で検証できなかった。同スケッチの露頭は覆瓦構造を認定する層理面や下位層との境界面を欠く。さらにスケッチは露頭のごく一部分のみで、露頭全体に追跡でき測定し得る覆瓦構造は観察できない。この推定結果を支持するとして V.B. 1 (中田, 1978) は存在を確認できず、同じく V.B. 2 に相当する本岩屑なだれ堆積物は前記噴出口推定位置からの流れ方向を大部分指し示さない。模式地でも岩屑なだれの流れ方向は、同噴出口推定位置からの流れ方向に対して鈍角に交わる。

尾鈴山火山深成複合岩体の岩屑なだれ堆積物は、堆積物を構成する四万十累層群や庵川礫岩層と溶結凝灰岩層

1 からなるカルデラ壁が崩壊したことで説明がつく。

尾鈴山火山深成複合岩体と同じく、大規模な火砕流噴火に伴う大型のカルデラ形成 (Smith, 1960; Williams, 1941) は火砕流の噴火後 (Smith and Bailey, 1968) か、同時 (Henry *et al.*, 1997; Lipman, 1997; Steven and Ratté, 1965) に生じたと考えられている。これらのカルデラ内には火砕流堆積物と指交する岩屑なだれ堆積物が存在するという報告がある (粟田, 1993; Lambert, 1974; 大竹, 2000)。しかしカルデラ形成が噴火に先行した可能性 (藤田, 1990; 小井土・山田, 2005; 八幡, 1989) もある。カルデラ形成後は火砕流堆積物と指交する岩屑なだれ堆積物の量とブロックの大きさがカルデラ上部に向かって減少し、湖成堆積物に置き換わる (Lambert, 1974)。これは火砕流噴火とカルデラ形成後しばらく陥没が断続し、次

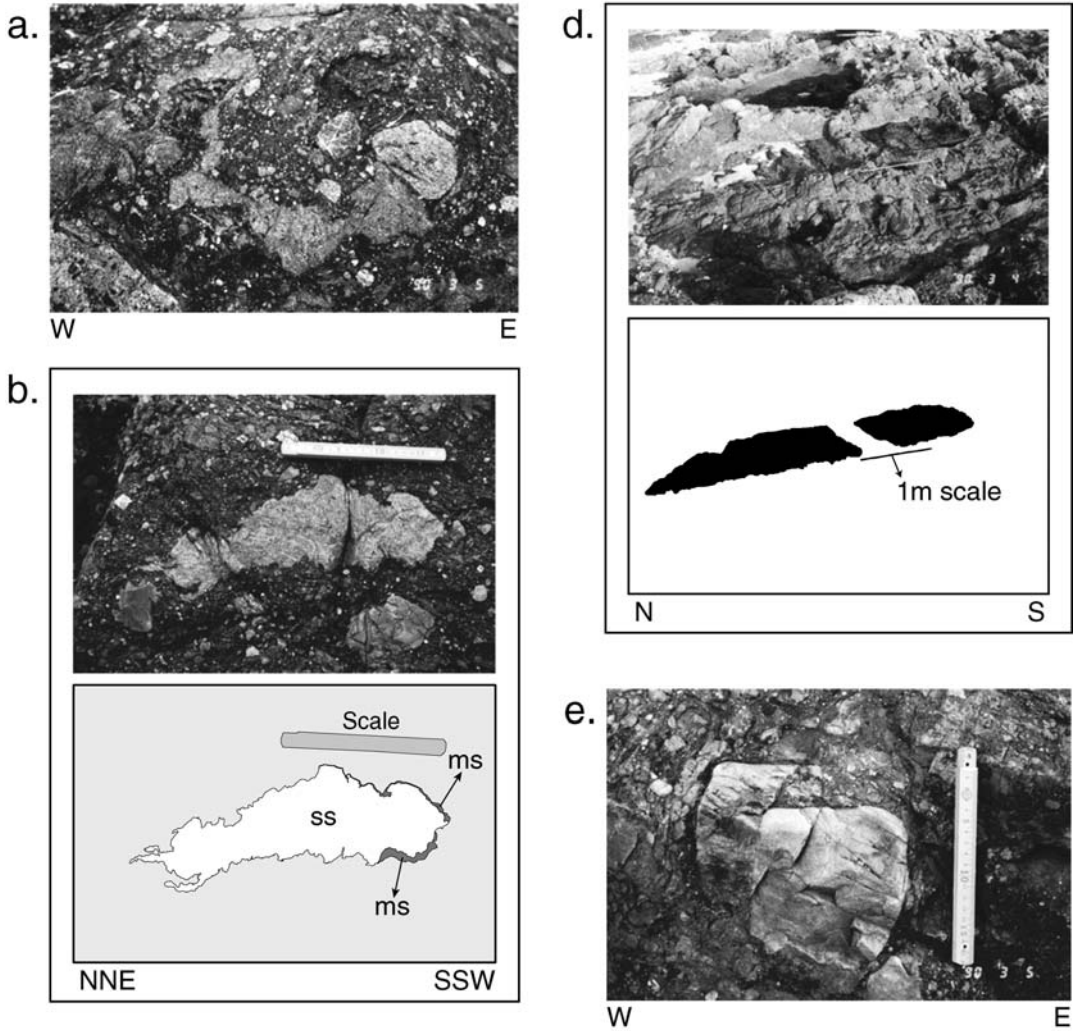


Fig. 8. Modified blocks including irregular plastic deformation in the avalanche deposit. a. Meandering block of sandstone at locality 5. The left rim of the photo is about 15 cm long. b. Thin mudstone (ms) attaches a modified block of sandstone (ss) which has a flame-shaped tail at the left end at locality 4. Scale is 20 cm. c. Jointed block of sandstone getting untied at the lower right end showing a flame like tail at locality 5. Scale is 20 cm. d. Pull-apart mudstone block along an open crack at locality 3. e. Displacement along a joint in a sandstone block at locality 5. Scale is 20 cm.

図 8. 変形したブロック. a. 塑性変形し曲がりくねった砂岩ブロック. 写真左枠長さ約 15 cm. 地点 5 付近. b. 塑性変形した砂岩ブロック (ss). 一部が泥岩 (ms) に被覆される. 左端に火炎状突起を持つ. スケール 20 cm. 地点 4. c. 割れ目の入った砂岩ブロック. 右下端が塑性変形して, 分離しかけた火炎状突起を示す. スケール 20 cm. 地点 5 付近. d. 分離した泥岩ブロック. 地点 3. e. 割れ目に沿い変位した砂岩ブロック. スケール 20 cm. 地点 5 付近.

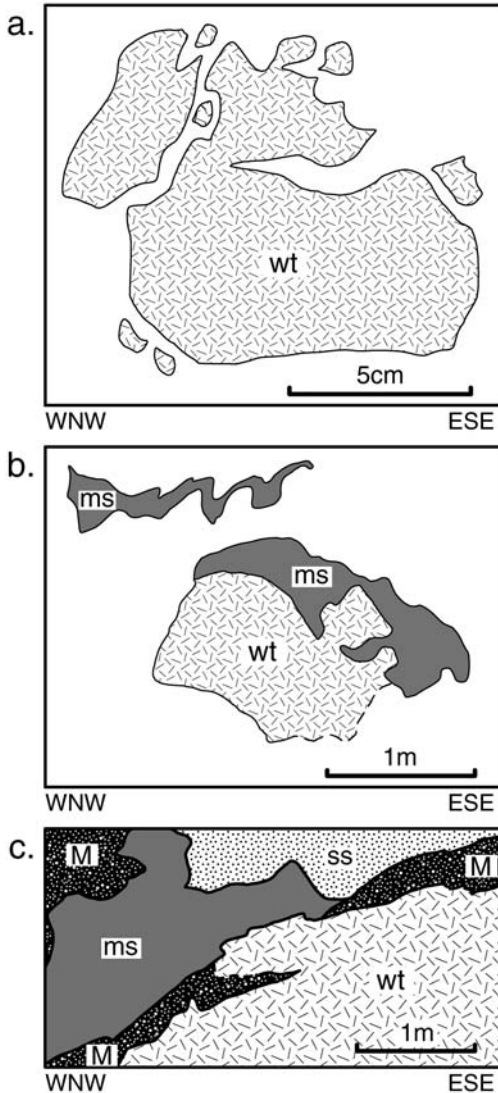


Fig. 9. Sketches of the blocks in the avalanche deposit. a. A block of the Welded tuff 1 (wt) coming loose along jigsaw cracks at locality 1. b. A conglomerated block of mudstone (ms) and Welded tuff 1 (wt) at locality 1. A ribbon-shaped block of mudstone appears in the upper left. c. Patch worked blocks of mudstone (ms), sandstone (ss) and Welded tuff 1 (wt) with rare matrix (M) at locality 2.

図 9. ブロックの露頭スケッチ. a. ジグソー割れ目に沿いほぐれている溶結凝灰岩層 1 (wt). 地点 1. b. 2 種の岩石 (ms: 泥岩, wt: 溶結凝灰岩層 1) が接着したブロック. 地点 1. 左上に塑性変形したりボン状の泥岩ブロック. c. パッチワークを組む多種のブロック (ms: 泥岩, ss: 砂岩, wt: 溶結凝灰岩層 1) と基質 (M). 基質はわずかである. 地点 2.

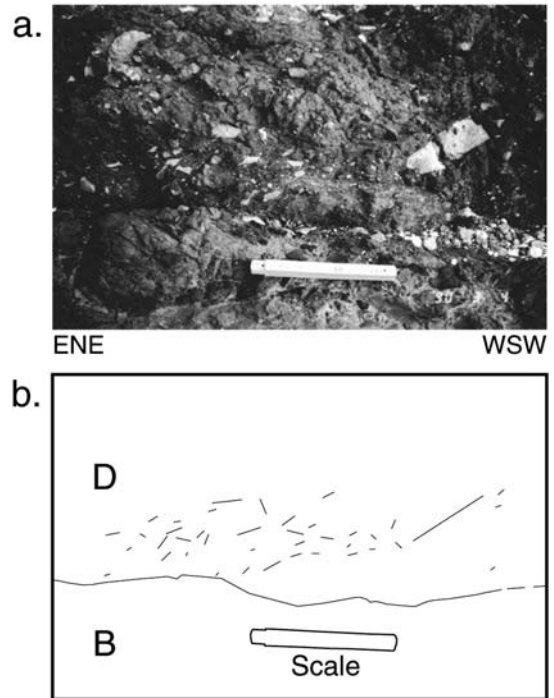


Fig. 10. Imbrications along the boundary with the basement at locality 3. a. Imbrications at the bottom of the debris avalanche deposit in the upper 2/3 of the photo on the mudstone of the basement in the lower 1/3. Scale is 20 cm. Imbrications suggests a flow direction from the left, northeast to the right, southwest. A larger block on the right hand has an open crack showing the same flow direction of the imbrications. b. Marking sketch of the long axes of blocks revealing imbrication. D: debris avalanche deposit. B: basement. Scale is 20 cm.

図 10. 基盤との境界面に沿う覆瓦構造. 地点 3. a. 写真上方 3 分の 2 が岩屑なだれ堆積物 (下部層) 基底部. 下方 3 分の 1 が基盤の泥岩. スケール 20 cm. 境界面から 20 cm 程でブロックの多くが画面左下に傾いて境界面に斜交し. 向かって左から右へ北東から南西に向かう流れを示す. 右方のより大きなブロックは流れ方向に開口した割れ目を持つ. b. a のマーキングしたブロックの長軸スケッチ. D: 岩屑なだれ堆積物, B: 基盤.

第に火砕流噴火が主となり, ついに陥没と噴火が停止し静穏なカルデラ湖が生じたことを意味する.

今回得た結果をもとにすると, 尾鈴山火山深成複合岩体の岩屑なだれを含む固有の歴史が読み取れる (Fig. 2, 右欄). 岩体は溶結凝灰岩層 1, 溶結凝灰岩層 2, 美々津花崗閃緑斑岩への活動順序を持つ. そして岩屑なだれ堆

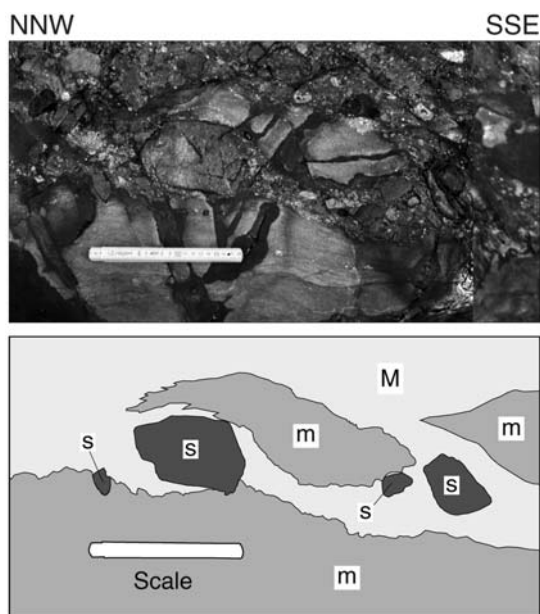


Fig. 11. Flame-shaped tail of a block indicates the flow direction of the debris. Left end of the imbricate block of mudstone (m) over a block of sandstone (s) has a tail getting untied like a flame at locality 4. Scale is 20 cm. M: matrix. Remember similar blocks shown in figs. 8b and 8c.

図 11. 流れ方向を示すブロックの火炎状突起. 砂岩ブロック (s) に覆瓦する泥岩ブロック (m) の左側末端が炎状にはぐれている. 地点 4, スケール 20 cm. M: 基質. 図 8b, c でも認める.

積物は溶結凝灰岩層 1 と溶結凝灰岩層 2 の間と, 溶結凝灰岩層 2 下部とにある. 溶結凝灰岩層 1 に伴う岩屑なだれ堆積物は見いだされないことから, 最初の火砕流噴火では岩屑なだれをもたらす陥没カルデラを生じた形跡はない. カルデラの形成に伴う岩屑なだれは最初に噴火した溶結凝灰岩層 1 の冷却後で, 2 回目の火砕流噴火である溶結凝灰岩層 2 の噴出直前である. このときカルデラ壁が崩壊し金磯岩屑なだれ堆積物 (下部層) をもたらした. 溶結凝灰岩層 2 の噴火は最初小規模で, まず溶結凝灰岩層 2 下部を形成した. その後溶結凝灰岩層 2 の主噴火に先立つカルデラ壁崩壊で再び岩屑なだれ (金磯岩屑なだれ堆積物上部層) を生じ, 続いて主噴火で溶結凝灰岩層 2 上部を形成した.

尾鈴山火山深成複合岩体では火砕流噴火とカルデラの陥没が断続し, 湖成堆積物の形成に引き継いだ形跡は無い. 2 回にわたるカルデラ壁崩壊の岩屑なだれを生じた溶結凝灰岩層 2 の噴火後は, 引き続き美々津花崗閃緑斑

岩がカルデラ内に貫入した. この活動は中田 (1978) も指摘した通り, 同時代の熊野酸性岩 (荒牧・羽田, 1965; Kawakami *et al.*, 2007) に似る.

以上尾鈴山火山深成複合岩体の岩屑なだれ堆積物について論じた. この岩体の火山角礫岩すべてが岩屑なだれ堆積物かどうかは今後の課題とする.

5. ま と め

1. 西南日本外帯で中新世中期 15-14 Ma に生じた大規模酸性火山深成活動の一つである尾鈴山火山深成複合岩体はカルデラ内岩屑なだれ堆積物 (金磯岩屑なだれ堆積物) を伴うカルデラ火山であった.

2. 岩屑なだれの発生は堆積物の層準と岩屑の構成から最初の火砕流噴火である流紋岩質溶結凝灰岩層 1 の冷却後で, 2 度目の火砕流噴火であるデイサイト質溶結凝灰岩層 2 の主噴火直前にあったことを示す.

3. 岩屑なだれ堆積物はブロックの塑性変形に, 流れ方向を示す覆瓦構造と火炎状突起, ブロックの長軸方向の偏りを持つ. これらが示す流れ方向はカルデラ内火道を目指し示さない.

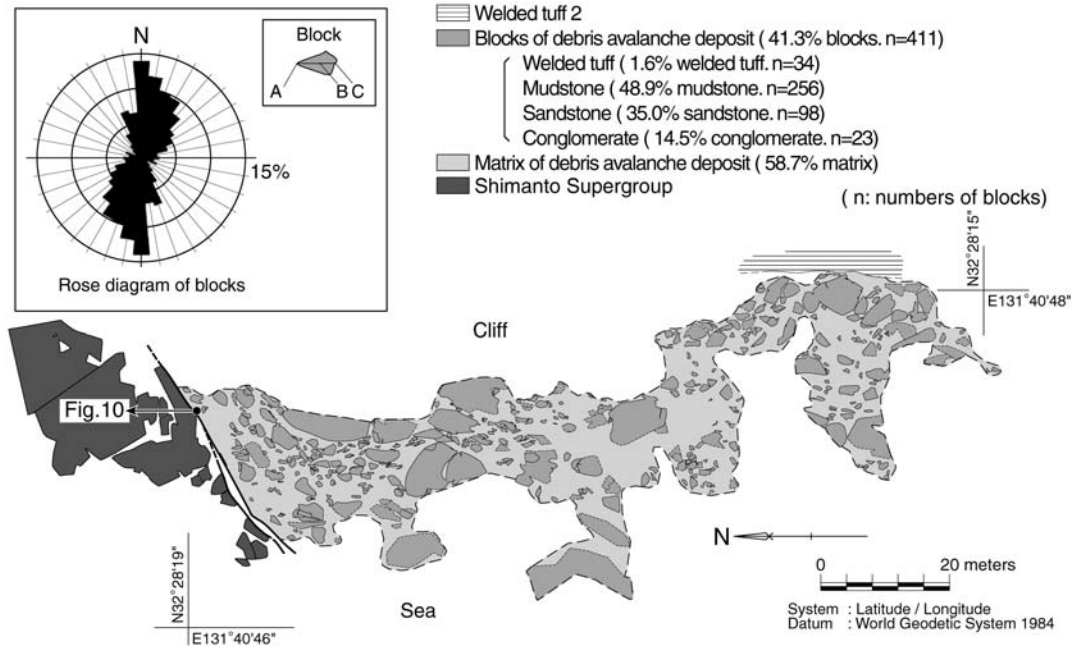


Fig. 12. Concentration in orientation of the blocks is observed crossing diagonally for the direction of the debris avalanche supposed by imbrications (Fig. 10) on the flat seashore at locality 3. Near the cropped basement, the orientation tends parallel to the flow direction. % in area. A: the vertex of the most far-off distance, B: center of gravity, C: the intersection of the extension line of the line segment AB and a block outside.

図 12. 岩屑なだれ堆積物 (下部層) 中のブロック長軸方向の偏り。地点 3 の海岸岩床露头における平板スケッチ。% は面積比。A: 最遠頂点, B: 重心, C: 線分 AB の延長線とブロック外形との交点。

謝 辞

筆者らが尾鈴山火山深成複合岩体の調査をはじめた 1980 年代当初から、当時宮崎県庁の戸戸 章氏、足立富男元宮崎県立延岡高校教諭、東京大学地震研究所中田節也教授に助言と叱正を頂いた。宮崎県と日向市、門川町教育委員会からは参考情報を受けた。ブロック長軸の現地測量では日向市の地元高校生達 3 人の助力を得た。ブロック長軸測定のパソコン処理に GIS を使い、株式会社オープン GIS 輪座利彦氏にプログラムをお願いした。電力中央研究所の三浦大助氏と匿名の査読者から詳細で建設的な査読を、産業技術総合研究所地質情報研究部門の及川輝樹氏に最終稿に至る編集の労を頂いた。

引用文献

- 荒牧重雄 (1969) 鹿児島県国分地域の地質と火砕流堆積物。地質雑, 75, 425-442.
 荒牧重雄・羽田 忍 (1965) 熊野酸性火成岩類の中部および南部の地質。地質雑, 71, 494-512.
 粟田泰夫 (1993) 後期中新世川舟カルデラ内にみられるカルデラ形成最盛期の層序。地球, 15, 705-708.

- 藤田至則 (1990) 日本列島の成立 (新版) 環太平洋変動。築地書館, 259p.
 Glicken, H. (1998) Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens Volcano, Washington. *Bull. Geol. Surv. Japan*, 49, 55-106.
 Hasebe, N. and Hoshino, H. (2003) Igneous rocks emplacement and exhumation of sedimentary basement: fission track age determination on the Osuzuyama volcano-plutonic complex and surrounding rocks, Miyazaki prefecture, southwest Japan. *Geochem. Jour.*, 37, 537-543.
 Henry, C.D., Kunk, M.J., Muehlberger, W.R. and McIntosh, W.C. (1997) Igneous evolution of a complex laccolith-caldera, the Solitario, Trans-Pecos Texas: implications for calderas and subjacent plutons. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 109, 1036-1054.
 今岡照喜 (1994) 山陰西部地域における古第三紀コールドロンの形成過程。中国地方の白亜紀～古第三紀コールドロンの形成機構, 文部省平成 4・5 年度科学研究費補助金 (一般研究 C) 研究成果報告書, 94-96.
 巖谷敏光・三村弘二 (1991) IV. 尾鈴山火山深成複合岩体一主岩体。木村克己・巖谷敏光・三村弘二・佐藤喜男・佐藤岱生・鈴木祐一郎・坂巻幸雄, 尾鈴山地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質

- 調査所, 48-73.
- 巖谷敏光・三村弘二 (1992) 宮崎県尾鈴山火山深成複合岩体の K-Ar 及びフィッシュン・トラック年代. 地質調月報, 43, 565-572.
- Kawakami, Y., Hoshi, H. and Yamaguchi, Y. (2007) Mechanism of caldera collapse and resurgence: observations from the northern part of the Kumano Acidic Rocks, Kii peninsula, southwest Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **167**, 263-281.
- 木村克己・三村弘二 (1991) II. 地質概説. 木村克己・巖谷敏光・三村弘二・佐藤喜男・佐藤岱生・鈴木祐一郎・坂巻幸雄, 尾鈴山地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 4-9.
- 小井土由光・山田直利 (2005) 濃飛流紋岩のコールドロン. 地団研専報, no. 53, 71-80.
- Lambert, M.B. (1974) The Bennett Lake cauldron subsidence complex, British Columbia and Yukon Territory. *Geol. Surv. Canada Bull.*, **227**, 179 p.
- Lanphere, M.A. (2000) Duration of sedimentation of the Creede Formation from 49Ar/39Ar ages, In *Ancient Lake Creede: its volcano-tectonic setting, history of sedimentation, and relation to mineralization in the Creede mining district.* (Bethke, P.M. and Hay, R.L. eds.) *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, **346**, 71-76.
- Lipman, P.W. (1976) Caldera-collapse breccias in the western San Juan Mountains, Colorado. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **87**, 1397-1410.
- Lipman, P.W. (1997) Subsidence of ash-flow calderas: relation to caldera size and magma-chamber geometry. *Bull. Volcanol.*, **59**, 198-218.
- Lipman, P.W. (2000) Central San Juan caldera cluster: regional volcanic framework. In *Ancient Lake Creede: its volcano-tectonic setting, history of sedimentation, and relation to mineralization in the Creede mining district.* (Bethke, P.M. and Hay, R.L. eds.) *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, **346**, 9-69.
- 松浦浩久・三村弘二 (1987a) 有馬層群佐曾利凝灰角礫岩中の巨大岩塊群について. 地調月報, **38**, 282.
- 松浦浩久・三村弘二 (1987b) 神戸市北方佐曾利コールドロン白亜紀有馬層群の噴出源. 日本火山学会講演予稿集, no. 2, 92.
- 三村弘二 (2001) 福井県経ヶ岳火山南西麓の覆瓦構造をもつ塚原野岩屑なだれ堆積物と ¹⁴C 年代. 地質調査研究報告, **52**, 303-307.
- Mimura, K. and Kawachi, S. (1981) Nirasaki debris avalanche, a catastrophic event at the Yatsugatake volcanic chain, central Japan. *Abstracts 1981 IAVCEI symposium* — *Arc volcanism* —, 237.
- 三村弘二・松浦浩久 (1987) 有馬層群中の岩屑なだれ堆積物. 日本地質学会関西支部会報 104 西日本支部会報 88 (合併号), 9.
- 中田節也 (1978) 尾鈴山酸性岩の地質. 地質雑, **84**, 243-256.
- 大竹正巳 (2000) 栗駒南部地熱地域, 赤倉カルデラの層序と火砕流噴出・陥没様式. 地質雑, **106**, 205-222.
- 佐藤岱生 (1991) V. 尾鈴山火山深成複合岩体—衛星岩体. 木村克己・巖谷敏光・三村弘二・佐藤喜男・佐藤岱生・鈴木祐一郎・坂巻幸雄, 尾鈴山地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 74-79.
- Shreve, R.L. (1968) The Blackhawk landslide. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, **108**, 47p.
- Smith, R.L. (1960) Ash flows. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **71**, 795-842.
- Smith, R.L. and Bailey, R.A. (1968) Resurgent cauldrons. In *Studies in volcanology.* (Coats, R.R., Hay, R.L. and Anderson, C.A. eds.) *Geol. Soc. Am. Memoir*, **116**, 613-662.
- 曾根原崇文・原山 智 (2005) 濃飛流紋岩中央部におけるカルデラ陥没角礫岩 (岩屑なだれ堆積物) の産状. 日本地質学会第 112 年学術大会講演要旨, 67.
- Steven, T.A. and Ratté, J.C. (1965) Geology and structural control of ore deposition in the Creede district, San Juan Mountains, Colorado. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, **487**, 90p.
- Takahashi, M. (1986) Anatomy of a middle Miocene Valles-type caldera cluster: geology of the Okueyama volcano-plutonic complex, southwest Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **29**, 33-70.
- Williams, H. (1941) Calderas and their origin. *California Univ. Pubs. Geol. Sci.*, **25**, 239-346.
- Yamamoto, T. (2003) Lithofacies and eruption ages of late Cretaceous caldera volcanoes in the Himeji-Yamasaki district, southwest Japan: implications for ancient large-scale felsic arc volcanism. *Island Arc*, **12**, 294-309.
- 八幡正弘 (1989) 屈斜路カルデラ—基盤構造とカルデラの形成過程との関連についての検討一. 地団研専報, **36**, 191-208.
- Yoshida, T. (1984) Tertiary Ishizuchi cauldron, southwestern Japan arc: formation by ring fracture subsidence. *J. Geophys. Res.*, **89**, 8502-8510.
- 吉田武義・村田 守・山路 敦 (1993) 石鎚コールドロンの形成と中新世テクトニクス. 地質学論集, **42**, 297-349.

(編集担当 及川輝樹)