

ヴェスヴィオ火山北麓で発見されたローマ時代の遺跡の埋没過程: 2006~2008年に新たに発見された472年噴火による土石流堆積物にもとづく再構築

前野 深^{1),*}・新堀賢志²⁾・金子隆之¹⁾・藤井敏嗣¹⁾・中田節也¹⁾・鎌田桂子³⁾・安田 敦¹⁾・青柳正規⁴⁾

¹⁾ 東京大学地震研究所・²⁾ 環境防災総合政策研究機構・³⁾ 神戸大学理学部・⁴⁾ 国立西洋美術館

Reconstruction of Burial Process of Roman Villa on the Northern Flank of Mt. Vesuvius, Italy: insights from laharic deposits of the 472 eruption newly discovered in 2006-2008

Fukashi Maeno¹⁾, Kenji Niihori²⁾, Takayuki Kaneko¹⁾, Toshitsugu Fujii¹⁾, Setsuya Nakada¹⁾, Keiko Suzuki-Kamata³⁾, Atsushi Yasuda¹⁾ and Masanori Aoyagi⁴⁾

¹⁾ Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²⁾ Crisis & Environmental Management Policy Institute, ³⁾ Faculty of Science, Kobe University, ⁴⁾ The National Museum of Western Art

Abstract

Burial process of Roman Villa on the northern flank of Mt. Vesuvius, Italy, was reconstructed based on sedimentation processes of laharic deposits newly discovered during 2006-2008 for the extended excavation site in NE to E parts of the Roman Villa. The laharic deposits are distributed on the lower level of the excavation site. The deposits are divided into four subunits, G1-MfL1, G1-DfL1, G1-MfL2, G1-DfL2, based on their sedimentary facies (Mf and Df facies). Mf is characterized by massive and matrix-supported facies, indicating en masse deposition from a laminar flow process, and Df is characterized by stratified and clast supported facies, indicating grain-by-grain aggradation from suspension or traction process. These different types of facies are partially transitional and attributed to variations of sediment/water ratio and internal stress condition inside flows, and may be resulted from an evolutionary process, like a flow transformation, of a single debris flow. These laharic deposits directly overlie pyroclastic fallout deposits (G1-Af) in the initial phase of the AD 472 eruption, but are eroded and covered by epiclastic deposits (G1-Mf1, 2, 3, 4 and G1-Df) derived from later- and larger-scale laharic events related to the same eruption. The later laharic deposits include more amounts of basement lava of Mt. Somma, compared with the newly discovered deposits. Characteristics and interpretation of the deposits suggest that lahars just after the 472 eruption came from the north to bury the lower level of buildings and have experienced various types of sedimentation processes. An erosion of the edifice of Mt. Somma may have mainly acted in the later laharic events.

Key words: Somma-Vesuvio, Pollena eruption, laharic deposits, debris flows, burial process

* e-mail: fmaeno@eri.u-tokyo.ac.jp (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

1. はじめに

イタリア・ヴェスヴィオ火山は世界有数の活火山であり、先史、歴史時代を含め多くの噴火を繰り返してきた。ローマ時代に栄えた古代都市ポンペイやエルコラーノを埋没させた西暦 79 年の噴火は有名であるが、その他の噴火においてもほとんどの場合火砕流や土石流が発生し (472 年, 512 年, 536 年, 1631 年, 1906 年など)、ヴェスヴィオ火山の周辺地域は噴火の度にそれらによる災害を被ってきた (Lirer, *et al.*, 2001; Mastrolorenzo *et al.*, 1993; Rolandi *et al.*, 1998; Rosi *et al.*, 1993)。本論で取り上げる、ヴェスヴィオ火山北麓のソマ・ヴェスヴィアーナ (Fig. 1) で発見されたローマ時代の遺跡は、ポンペイと同様、噴火当時の建造物や彫像が火山性堆積物により完全に埋没し、近代になってから良好な保存状態で発見された極めてまれな事例のひとつである。

この北麓で発見された遺跡は、ヴェスヴィオ火山の過去の噴火活動の理解を進展させるだけでなく、埋没前の遺跡周辺地域における人間社会や自然環境の動態を知る上での物証として、火山学的、考古学的に重要である。これまでの研究により、遺跡を埋める火山性堆積物の ^{14}C 年代値は 472 年付近に収斂することから、この遺跡の主要部分は西暦 79 年後の最大の噴火である、通称「ポッレナ噴火」により埋没したと考えられている (Kaneko *et al.*, 2005)。ポッレナ噴火の推移の大枠については近年の地質学的研究により明らかにされつつあるが (Rosi and Santacroce, 1983; Mastrolorenzo *et al.*, 2002; Santacroce and Sbrana, 2003; Rolandi *et al.*, 2004; Sulpizio *et al.*, 2005)、この噴火の社会・自然環境への影響は良くわかっていない。472 年噴火が起こった 5 世紀後半は、

ローマ帝国が東西に分裂し急速に弱体化していく時期に相当し、噴火に関する記録が十分に残せないほど社会情勢が混乱していた可能性がある。そのような社会的背景の中での火山噴火と人間との関わりを知るために、この遺跡は重要な手掛かりを与えると考えられている (松山・他, 2009)。

遺跡が 1930 年代初頭に発見された際、その存在位置や埋没状況などから「アウグストゥスの別荘」と憶測され、当時の研究者や一般の人々の関心を集めた。しかし、その後実態は解明されないまま、遺跡は 70 年近く放置されてきた。2002 年より開始された学際研究「火山噴火罹災地の文化・自然環境復元」(研究代表者: 青柳正規) で、東京大学を中心とする研究グループによりこの遺跡の本格的な発掘調査が初めて行われ、その実態が明らかになりつつある (Figs. 2, 3)。2002 年から 2005 年までの発掘調査では、9 m 近くの高さを有する建物の壁、連続アーチ、大理石の円柱などからなる複数の部屋 (Vano)、また、土器や彫刻、壁画など多数の遺物と遺構が発掘された。Niihori *et al.* (2007) では、2005 年までに発掘された遺構 (主に Vano 1~4; Fig. 2) およびそれらを埋めた堆積物に関する記載を示し、遺跡の埋没過程に関する考察を行った。

2006 年以降、発掘調査区域がそれまでよりも北東側に約 1.6 倍拡張され (Fig. 2)、発掘面積は 2008 年までにおよそ 1500 m² に達している (松山・他, 2009)。この調査区域の拡張に伴い、新たな遺構 (Vano 6~11、および Area 12) が次々と発見されており (Figs. 2, 3)、例えば東端では鮮やかな色彩を有する壁画装飾が施された 2 つのアプシス (Vano 7, 10) が発掘されたほか (Fig. 3a,

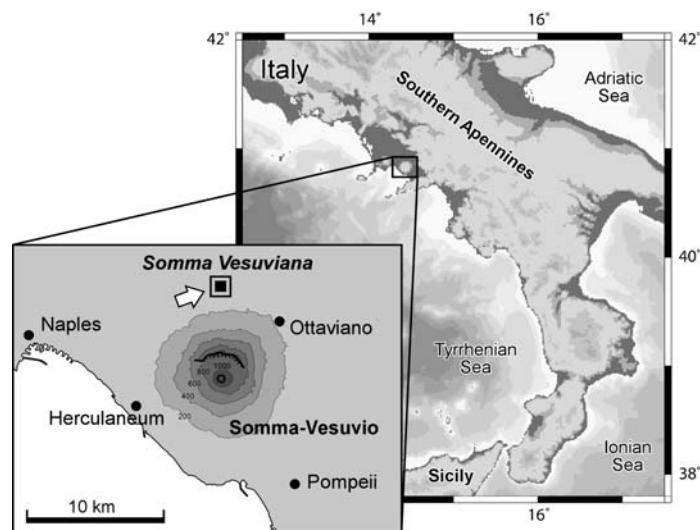


Fig. 1. Location of Somma-Vesuvius volcano and excavation site in Somma-Vesuviana.

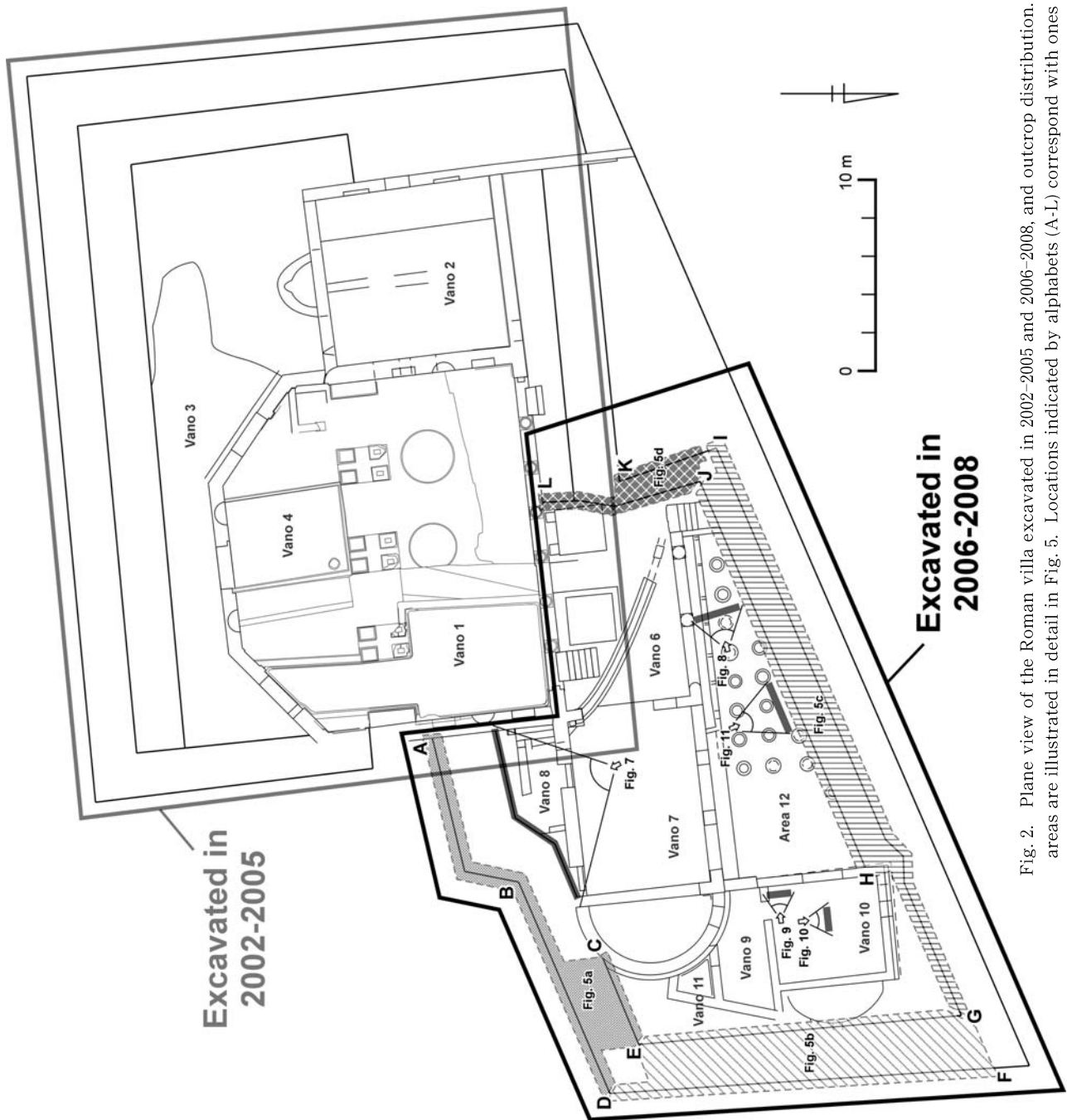


Fig. 2. Plane view of the Roman villa excavated in 2002-2005 and 2006-2008, and outcrop distribution. Outcrop of shaded areas are illustrated in detail in Fig. 5. Locations indicated by alphabets (A-L) correspond with ones in Fig. 5.

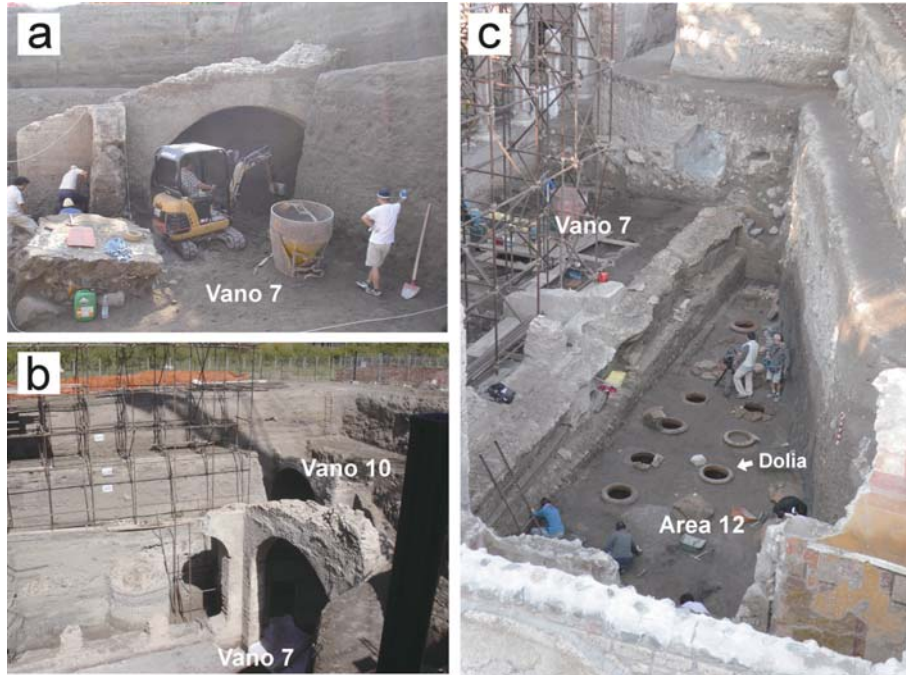


Fig. 3. Photographs of (a) the eastern side (Vano 7) of newly excavated in September 2006, (b) Apsis (Vano 7 and 10), taken in September 2007, (c) Dolias in Area 12, taken in September 2008.

b), 北側の Area 12 では、葡萄酒を醸造するための大瓶 (dolia) が多数出土した (Fig. 3c). また、2006 年以降に発掘された遺構や遺物は Vano 1~4 よりも 3 m 以上低いレベルに存在し、一部は、従来の研究 (Perrotta *et al.*, 2006a; 2006b; Niihori *et al.*, 2007) では未記載の 472 年噴火に関連する堆積物に埋められていることがわかってきた. このように 2006 年以降に発掘調査は急速に進展し、この遺跡に関する新たな知見が蓄積されつつあるものの、堆積物の特徴や層序については十分に整理されておらず、遺跡の埋没過程についても再検討する必要性が生じている. そこで本論では、まず 2006 年以降に発見された Vano 6~11 および Area 12 における堆積物の層序、層相及び構成物を記載する. つぎに、Niihori *et al.* (2007) の知見と合わせて、堆積物の特徴を整理しその形成過程を考察し、遺跡の埋没過程について議論する.

2. 472 年噴火の推移

472 年噴火に関する従来の研究の成果 (Rosi and Santacroce, 1983; Mastrolorenzo *et al.*, 2002; Rolandi *et al.*, 2004; Sulpizio *et al.*, 2005) をまとめると、この噴火はおおよそ下記のステージ I ~ III に区分される.

ステージ I では、少なくとも 7 回のサブ・プリニー式噴火が発生し、ヴェスヴィオ火山東側に降下火砕物を堆積させた (Sulpizio *et al.*, 2005). 分布主軸は東北東方向

であるが、遺跡でも総層厚数 cm~10 cm 程度で明瞭に認識される (Niihori *et al.*, 2007). 噴煙柱高度は 12~20 km, 噴出率は $7 \times 10^6 \sim 3 \times 10^7$ kg/s と推定されており、後半ほど噴火の強度が増し、噴煙柱が高くなるという推移を経たと考えられている (Sulpizio *et al.*, 2005).

ステージ II は、サブ・プリニー式噴煙柱の形成と崩壊に伴う火砕流や火砕サージの発生で特徴づけられる. 北麓および南麓には、このステージに由来する炭化木片を含む淘汰の悪いスコリア流堆積物やデューン構造が顕著に発達した火砕サージ堆積物が形成された (Mastrolorenzo *et al.*, 2002; Rolandi *et al.*, 2004). 火砕流や火砕サージの灰神楽の一部は、遺跡にまで到達したと考えられている (Niihori *et al.*, 2007).

ステージ III では、マグマ水蒸気爆発が発生し、それに伴う複数枚の火砕サージおよび火砕流が発生した. 北麓および南西麓には複数回にわたり火砕流が流下した. 東側には明瞭な堆積物は存在しないものの、火砕流の灰神楽に相当する細粒火山灰層が同一の層準に堆積している (Sulpizio *et al.*, 2007).

ステージ III が終了し噴火が沈静化した後、山麓の広い地域が土石流により埋め立てられた. 北麓にある遺跡はステージ I ~ III の堆積物に覆われたものの、その層厚は全体でせいぜい数 cm~30 cm 程度であり (Kaneko *et al.*, 2005; Niihori *et al.*, 2007), 遺跡の大部分は 472 年噴火

後に発生した複数回の土石流と、その後の 1631 年までの噴火に伴った堆積物により埋没した (Perrotta *et al.*, 2006a; 2006b, Niihori *et al.*, 2007).

3. 堆積物の記載

遺跡を埋める堆積物は、腐食土壌および風化火山灰層を境にして大きく Group 1 (G1), Group 2 (G2), Group 3 (G3A, G3B, G3C) の 5 ユニットに区分されている (Kaneko *et al.*, 2005; Niihori *et al.*, 2007). G1 は 472 年噴火に関連する噴火堆積物である. G2 および G3A~C の正確な年代値は出されていないが, Niihori *et al.* (2007) による全岩化学組成にもとづく考察では, G2 の候補として 6 世紀噴火 (512 年, 536 年), G3C の候補として 1631 年噴火が挙げられている. また, Niihori *et al.* (2007) は G1 を, 主に降下火砕物からなる G1-Af と 6 枚の土石流堆積物 (G1-Mf1~4 および G1-Df1~2) に細分しており, 本研究ではそれらを踏襲する (Fig. 4). 過去の発掘域と 2006 年以降の発掘域では基本的に同一の層序でこれらの堆積物が認められ, 各露頭面においては Fig. 5a-d のように区分できる.

以下の記載で subunit 名に用いる Af は降下火砕物 (air fall deposits), Mf および Df は土石流堆積物 (laharic deposits) の層相を表す. 土石流堆積物については, Smith (1986) および Vallance (2000) による分類を参考にして区分した. Mf は, 粗粒岩塊を含み淘汰が悪く, 基質支持かつ塊状無層理の構造が卓越する層相 (massive, matrix-supported facies) を示し, Df は主に砂~礫サイズ粒子で構成され淘汰が良く, 層構造 (成層および斜交層理) が卓越する層相 (stratified, clast-supported facies) を示す. これら subunit の記載的特徴と解釈について Table 1 にまとめた.

2006 年以降の拡張域では G1-Mf1 の下位から 472 年噴火に関連する新たな堆積物が複数枚発見された. 本研究では, それらを下から G1-MfL2, G1-DfL2, G1-MfL1, G1-DfL1 と命名する (Fig. 4). 堆積物の分布と層序関係については Fig. 6 に示した. G1-MfL2, G1-DfL2 は, 床面が最も低い Area 12 のみに存在する. G1-MfL1, G1-DfL1 は, 広く認められるが南西側で侵食により欠落する. 以下に, 新たに見出されたこれら堆積物の記載および解釈を記す. すでに Niihori *et al.* (2007) で記載されている G1-Af, G2, G3A~C については概略のみ示すことにする.

3-1 Group 1

i) G1-Af

G1-Af は, 472 年噴火のステージ I~III に対応する噴



Fig. 4. Model column of deposits related to the 472 eruption of Vesuvius volcano in areas excavated in 2006–2008. Mf means massive, matrix-supported debris flow facies. Df means stratified, clast-supported debris flow facies. G1-Mf1 directly covers G1-Af in a southern area.

火堆積物である. Niihori *et al.* (2007) は Vano 1~4 において G1-Af をさらに 8 層に細分して記載している. 発掘拡張域においても, アプシス内部など局所的に一部の層が欠落するものの, 基本的には下記に示す G1-Af1~8 からなり, 建造物の床面およびその上に散らばったレンガ片の上を直接覆っている (Figs. 4, 5, 6, 7).

G1-Af1: 白色~明灰色スコリアからなる降下火砕堆積物. スコリアの平均粒径は約 1 cm.

G1-Af2: 明灰色降下火山灰からなる堆積物.

G1-Af3: 主に暗灰色スコリアからなる降下火砕堆積物. 少量の異質岩片を含む. スコリアの平均粒径は約 2 cm.

G1-Af4: 暗灰色降下火山灰からなる堆積物.

G1-Af5: 主に暗灰色降下スコリアからなる堆積物. 異質岩片, 溶岩, 深成岩, 炭酸塩岩も含まれる. スコリアの平均粒径は約 3 cm.

Table 1. Characteristics and interpretation of flow deposits

Unit	G1-MfL1, L2; G1-Mf1-4	G1-DfL1a, 1c, 2	G1-Df
<u>Characteristics</u>			
Stratification	None or minor within depositional units; massive	Horizontal stratification; discontinuous and thicker than upper flow-regime lamination	Cross-stratification and horizontal stratification
Grading	None; reverse; reverse-to-normal	Normal; reverse-to-normal	Variable and as a result of sequential processes rather than a single process
Clast framework	Muddy matrix-supported; rarely clast-support	Clast-support with poorly sorted; Sand-matrix supported	Clast-support with an open framework or finer grained matrix of infiltrated sand
Clast long-axis & orientation; imbrication	Variable, based on location within flow; minor imbrication	Variable, based on location within flow; random clast orientation	Perpendicular to flow; usually imbricated
Facies name	Mf (massive, matrix-supported)	Df (stratified, clast-supported)	Df (stratified, clast-supported)
<u>Interpretation</u>			
Mode of deposition	en masse	Rapid grain-by-grain aggradation from both suspension and traction	Grain-by-grain, dominated by traction processes
Sediment support mechanisms	Matrix strength, grain dispersive pressure, buoyancy	Turbulence, grain dispersive pressure, buoyancy	Turbulence
Flow type	Laminar at time of deposition but may be turbulent on steep slopes	Partly turbulent at all times; however, high sediment load dampens out small eddies	Fully turbulent

G1-Af6：火山豆石を含む暗灰色降下火山灰からなる堆積物。

G1-Af7：暗灰色火山灰からなるサージ堆積物。

G1-Af8：明灰色粘土質降下火山灰からなる堆積物。

G1-Af1～8 全体の最大層厚は、Vano 8 の西壁付近では 30 cm 程度 (Fig. 7) であるが、Area 12 では約 5～10 cm (Figs. 5c, 5d, 8), アプシス内部では約 2 cm (Fig. 9) である。これらのうち G1-Af1～5 はステージ I に、G1-Af6 はステージ II に、G1-Af7～8 はステージ III にほぼ対応すると考えられている (Niihori *et al.*, 2007)。

ii) G1-MfL2

〔記載〕塊状無層理かつ淘汰が悪い基質支持の堆積物 (Fig. 4, Table 1) で、層厚は約 1 m である。級化構造は明瞭でない。大瓶 (dolia) 群が存在する Area 12 のみに認められ、そこでは G1-Af を直接覆う (Fig. 5c)。土石流堆積物群の中での最下位層を構成し、遺跡の中で最も低いレベルに存在する (Fig. 6)。

構成物は、新鮮な灰色溶岩 (長径<3 cm, 亜円～亜角形状), 赤～茶色変質溶岩およびスコリア (長径<8 cm, 亜角～角形状), 472 年噴火の本質スコリア (長径<15 cm) が主体をなし、この他にポンペイ噴火 (AD 79) やアベリーノ噴火 (4365 y.b.p.) のものと思われる白色軽

石、生木が含まれる。また、本質スコリアは発泡が悪く、カリフラワー状の形態を有するなど、ステージ II～III の噴出物に良く似ている。基質は、灰色かつ粘土～砂質である。

〔解釈〕塊状無層理で淘汰が悪いことや、本質スコリアを含むものの生木が混入しており高温であった証拠はないことから、G1-MfL2 は土石流堆積物と考えられる。粘土～砂質の基質により支持されていることから (matrix-supported), 比較的粘性の高い流れであったと考えられる。構成物については、後述の上位層 (G1-Mf1～4) に比べて基盤溶岩類が少なく、一方で本質スコリアや生木の量が露頭レベルで認識できるほどに多い。このことは G1-MfL2 が、噴火直後の地表付近の堆積物や植物を主な母材として形成されたことを示唆する。

iii) G1-DfL2

〔記載〕全体に成層構造 (plane bedding) が発達し、基質に乏しく淘汰が良い堆積物である (Fig. 4, Table 1)。G1-MfL2 と同様 Area 12 のみに認められる (Figs. 5c, 8)。礫サイズの粒子からなる部分は、clast-supported structure を示す。正級化構造が卓越するが、逆級化構造が認められる場合もある。層厚は Area 12 の東端で最大約 6 cm, 西側に向かって約 1 cm にまで減少する。下位の

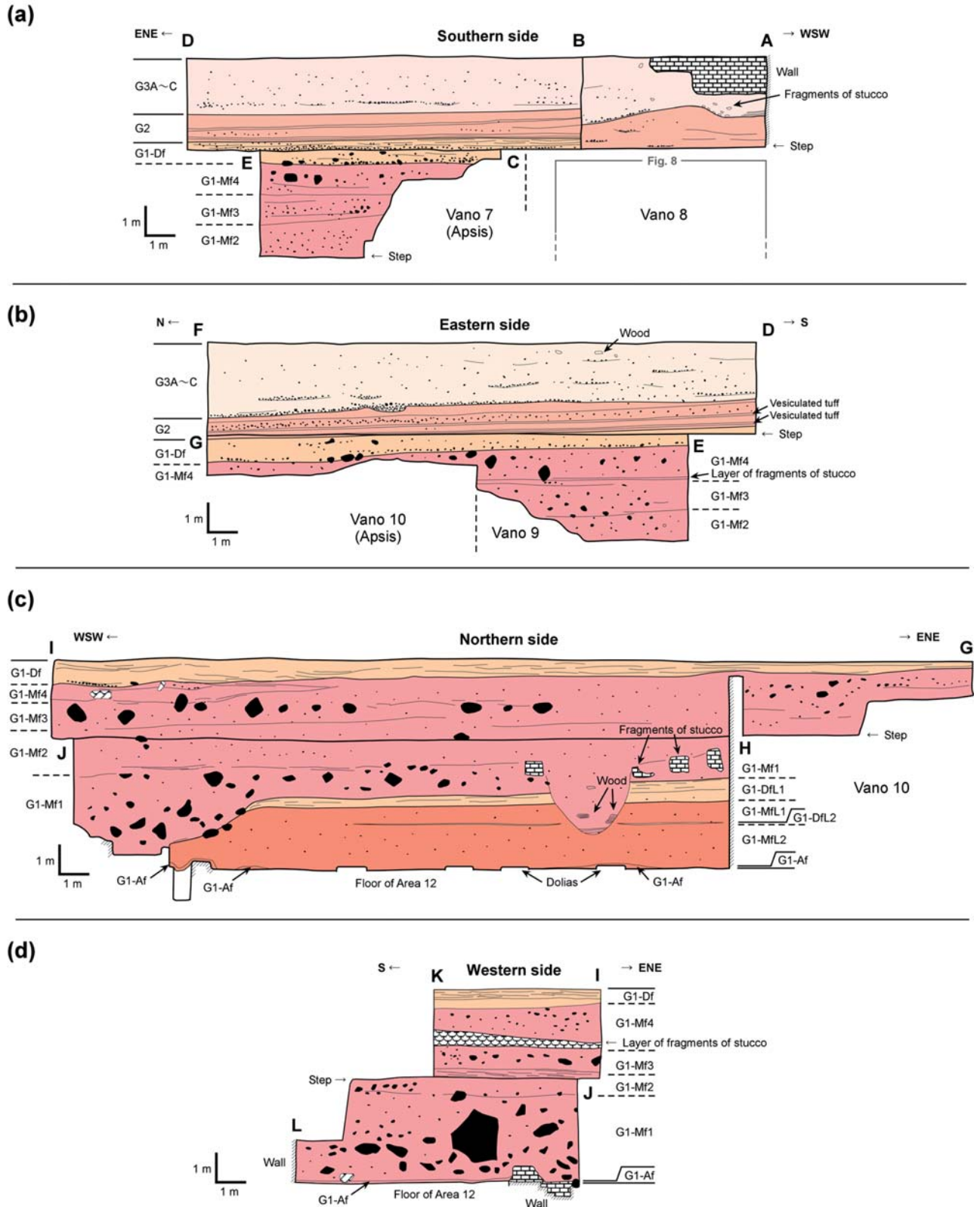


Fig. 5. Stratigraphy of the walls of area excavated in 2006–2008. (a) Southern side. (b) Eastern side. (c) Northern side. (d) Western side.

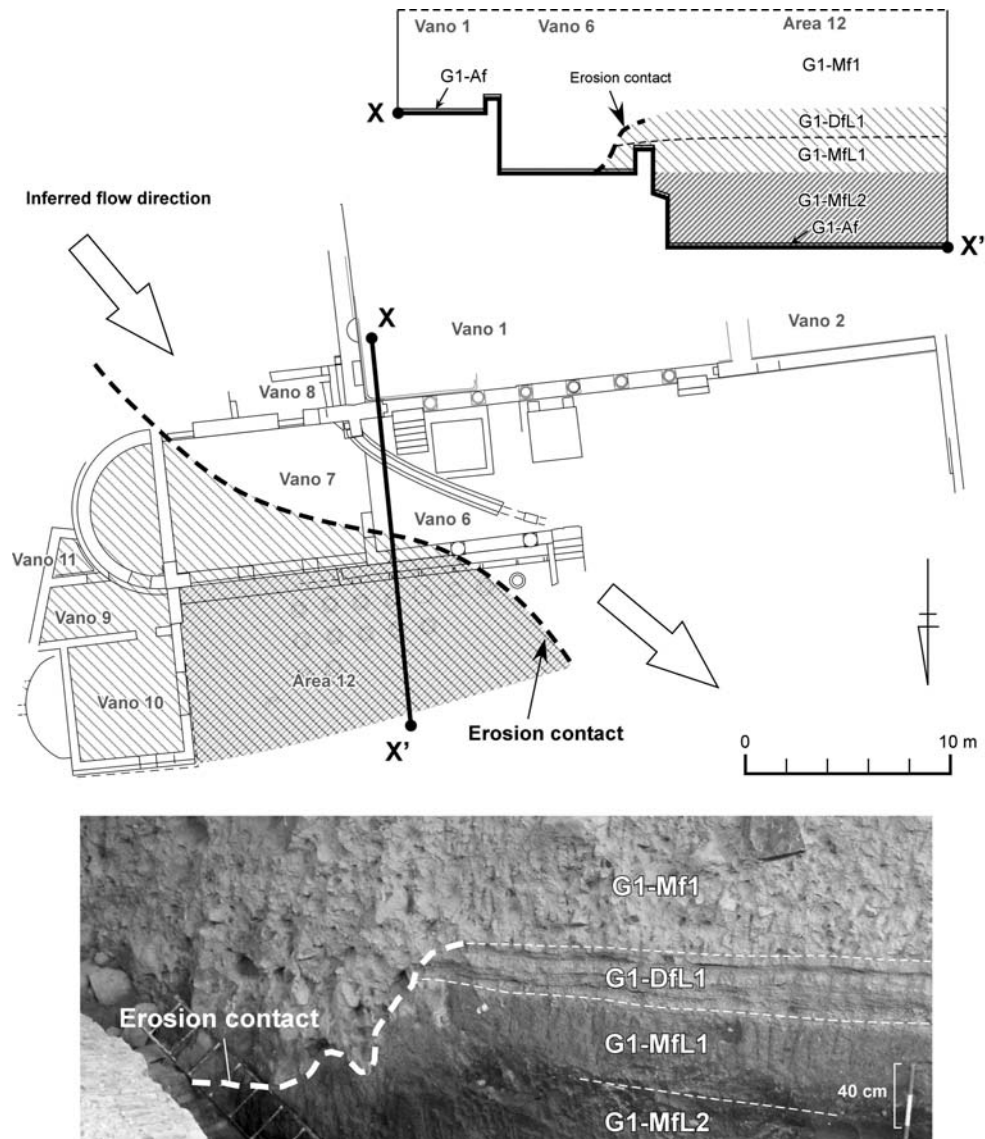


Fig. 6. Distribution of newly discovered laharic deposits. A broken line shows an erosion contact between G1-Mf1 and the lower deposits, G1-DfL1 and G1-MfL1. Upper right figure shows a cross section of deposits along the line of X-X'. On the basis of this mapping, an inferred flow direction of the laharic deposit, G1-Mf1, is shown. A photo of the erosion contact is also shown.

G1-MfL2 上面の凹凸部分を埋めるようにして堆積している。

構成物は、G1-MfL2 とほとんど同じであり、新鮮な灰色溶岩（長径<1 cm, 亜円～亜角形状）、赤～茶色変質溶岩およびスコリア（長径<1 cm, 亜円～亜角形状）、本質スコリア（長径<1 cm）が主体である。層が厚い部分では粒径が大きく礫質であるが、1 cm 程度の薄い部分は細粒で、明灰色粘土～シルト質である。

〔解釈〕 構成物は G1-MfL2 とほぼ同様に漸移的な関係にあることから、MfL2 の直後にはほぼ連続して堆積したと考えられる。また、plane bedding は堆積物粒子の

衝突や牽引などが可能なほどに粒子濃度が低く、媒体である水の割合が高い流れであったことを示している。

iv) G1-MfL1

〔記載〕 塊状無層理かつ淘汰が悪い基質支持の堆積物で（Fig. 4, Table 1）、層厚は約 1 m である。級化構造は不明瞭である。発掘拡張域のほとんどの場所で認められるが（Figs. 5c, 8）、Vano 6 および 7 の南側では同じ高さに認められないことから、後続の土石流（G1-Mf1）による侵食で欠落したと考えられる（Fig. 6）。また、Area 12 以外では G1-Af を直接覆う（Fig. 9）。

構成物は、lucite 斑晶を多く含む新鮮な灰色溶岩（長

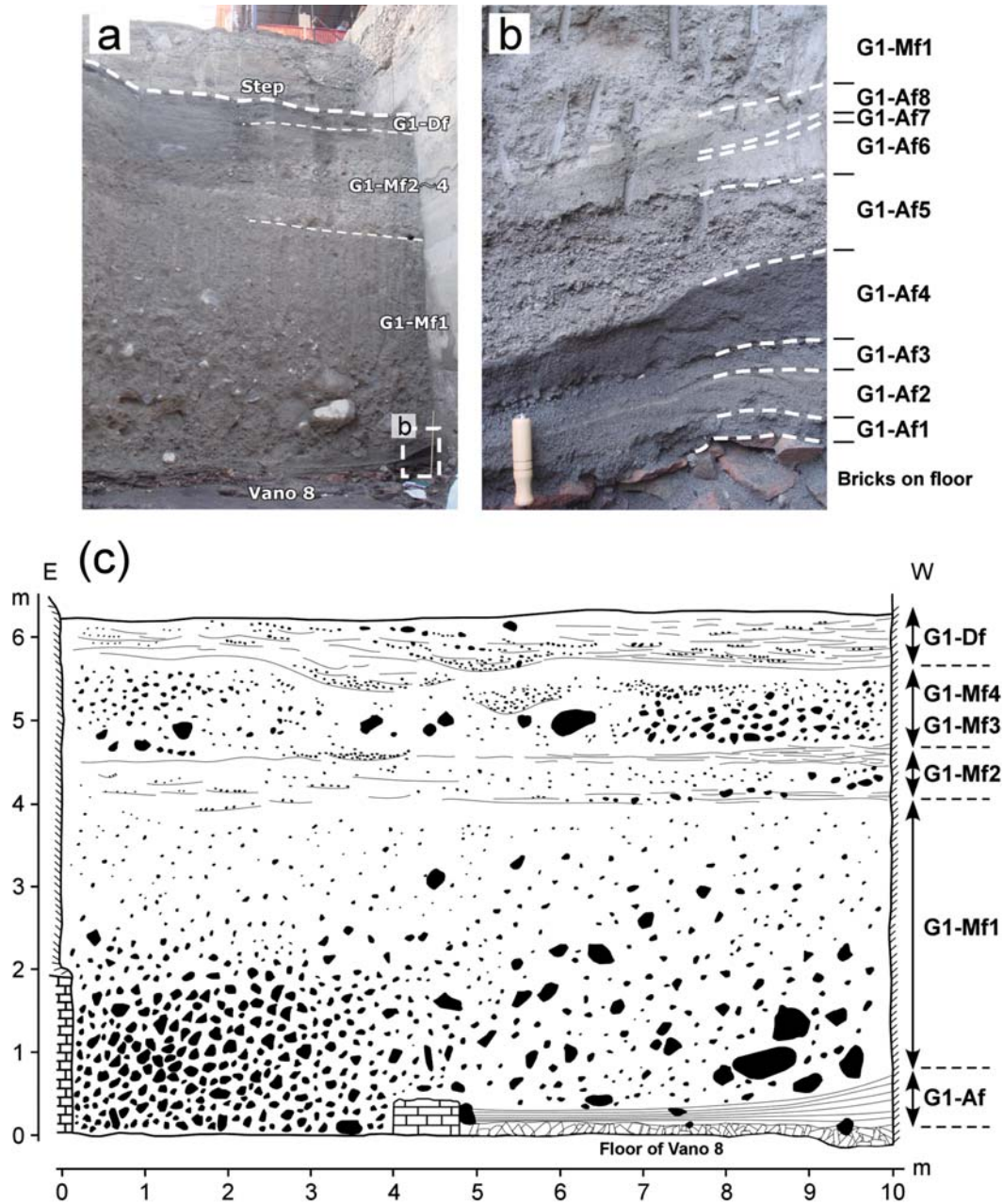


Fig. 7. (a) A photograph of a western half of Southern wall in Vano 8. The succession shows thin fallout deposits overlaid by thick laharic deposits with massive poor-sorted facies. (b) Magnification of fallout layers (G1-Af), consisting of the lowest part of Southern wall. The deposits directly lie on bricks on the floor of Vano 8 at this part. (c) A sketch of a western half of Southern wall. Coarse lava blocks concentrate in the lower part of G1-Mf1. Left-half of G1-Mf1 directly covers the floor.

径<約10 cm, 亜円~亜角形状), 低斑晶量の新鮮な灰色溶岩 (長径<7 cm, 亜角形状), 赤~紫色変質溶岩およびスコリア (長径<約10 cm, 亜円~角形状), 黄褐色変質溶岩 (長径<5 cm), 本質スコリア (長径<約10 cm, 亜角形状) が主体で, この他に生木が認められるが, G1-MfL2 よりも少量である. 基質は, 明褐色かつ粘土~シルト質である.

〔解釈〕 G1-MfL2 と同様に淘汰が悪く径の大きな構成物粒子が粘土~砂質の基質に支持されていることから, 高粒子濃度かつ比較的粘着性の高い流れにより形成された堆積物と考えられる.

v) G1-DfL1

〔記載〕 下部 (DfL1a) と上部 (DfL1c) では主に成層構造 (plane bedding) が発達し, 細粒基質に乏しく淘汰

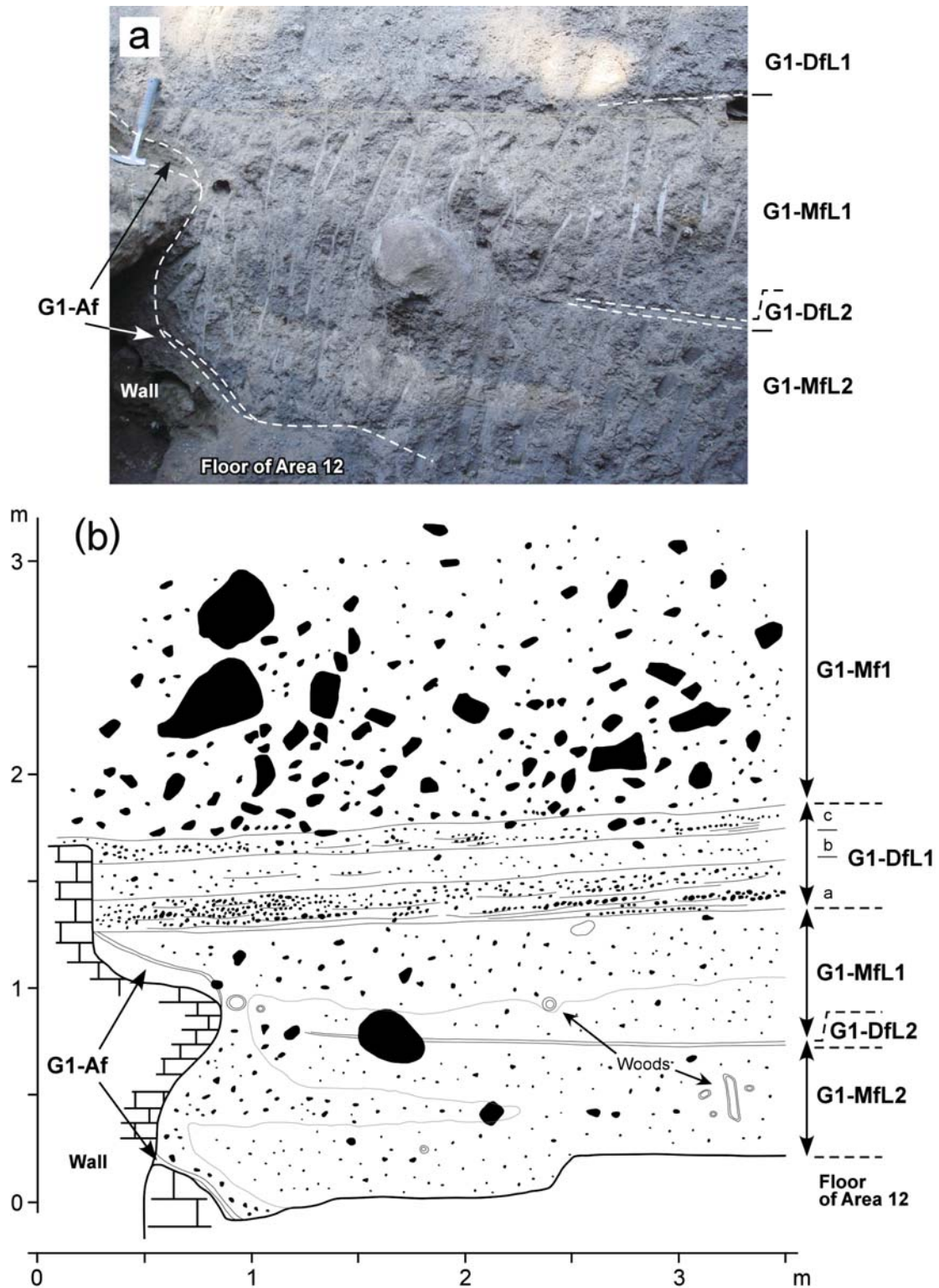


Fig. 8. (a) A photograph and (b) a sketch of fallout and laharic deposits in the western side of Area 12. The location is indicated in Fig. 2. G1-Mf1 includes more boulder-sized lava fragments than lower layers. G1-MfL1 and L2 includes much plants or woods, indicating low temperature of the flow.

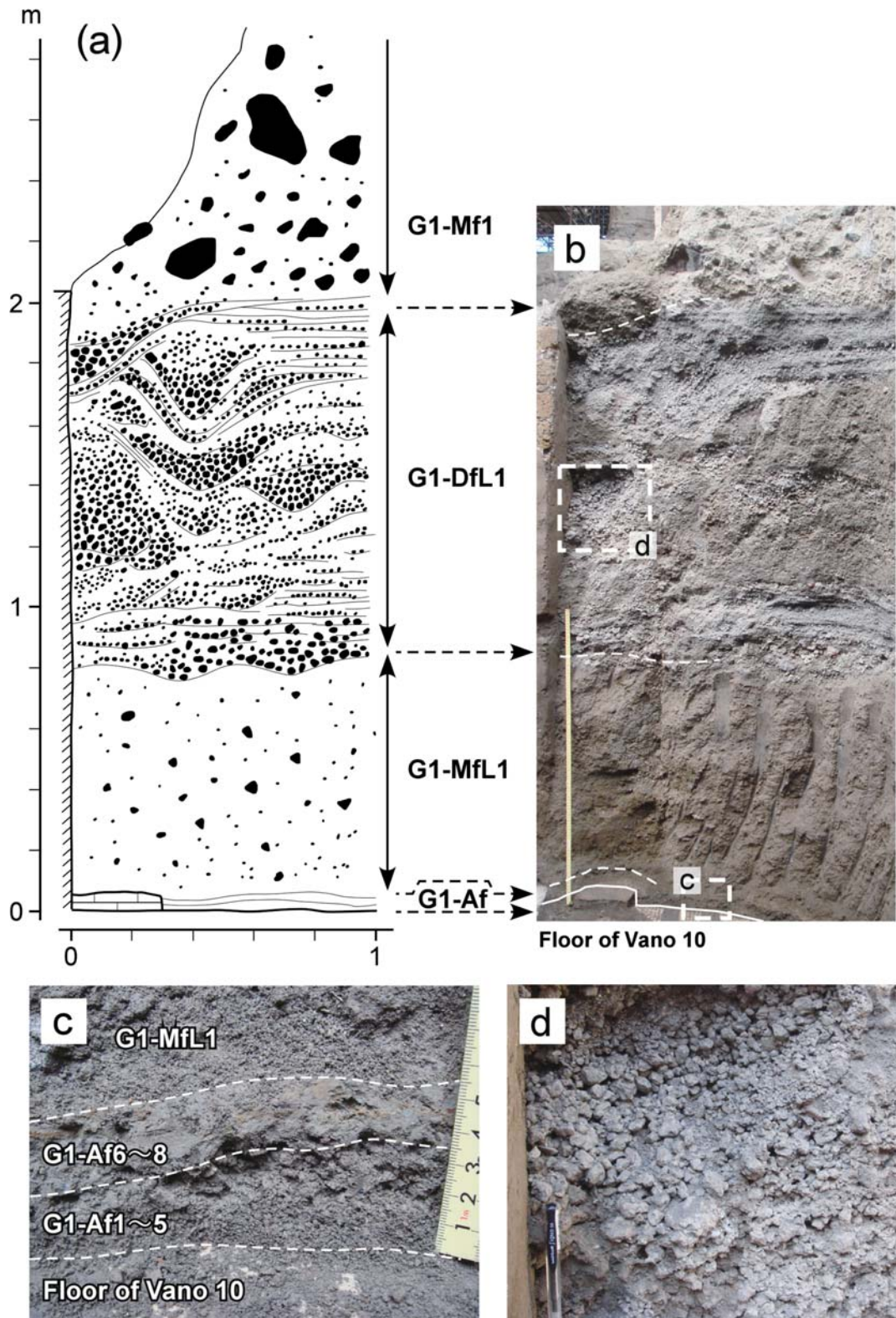


Fig. 9. (a) A sketch of laharic deposits in the western side of Vano 10. The location is indicated in Fig. 2. (b) A photograph of the same outcrop. (c) Magnification of fallout layers (G1-Af), consisting of the lowest part of the succession. (d) Magnification of a part of G1-DfL1, showing very well-sorted and clast-supported facies like a fallout deposit.

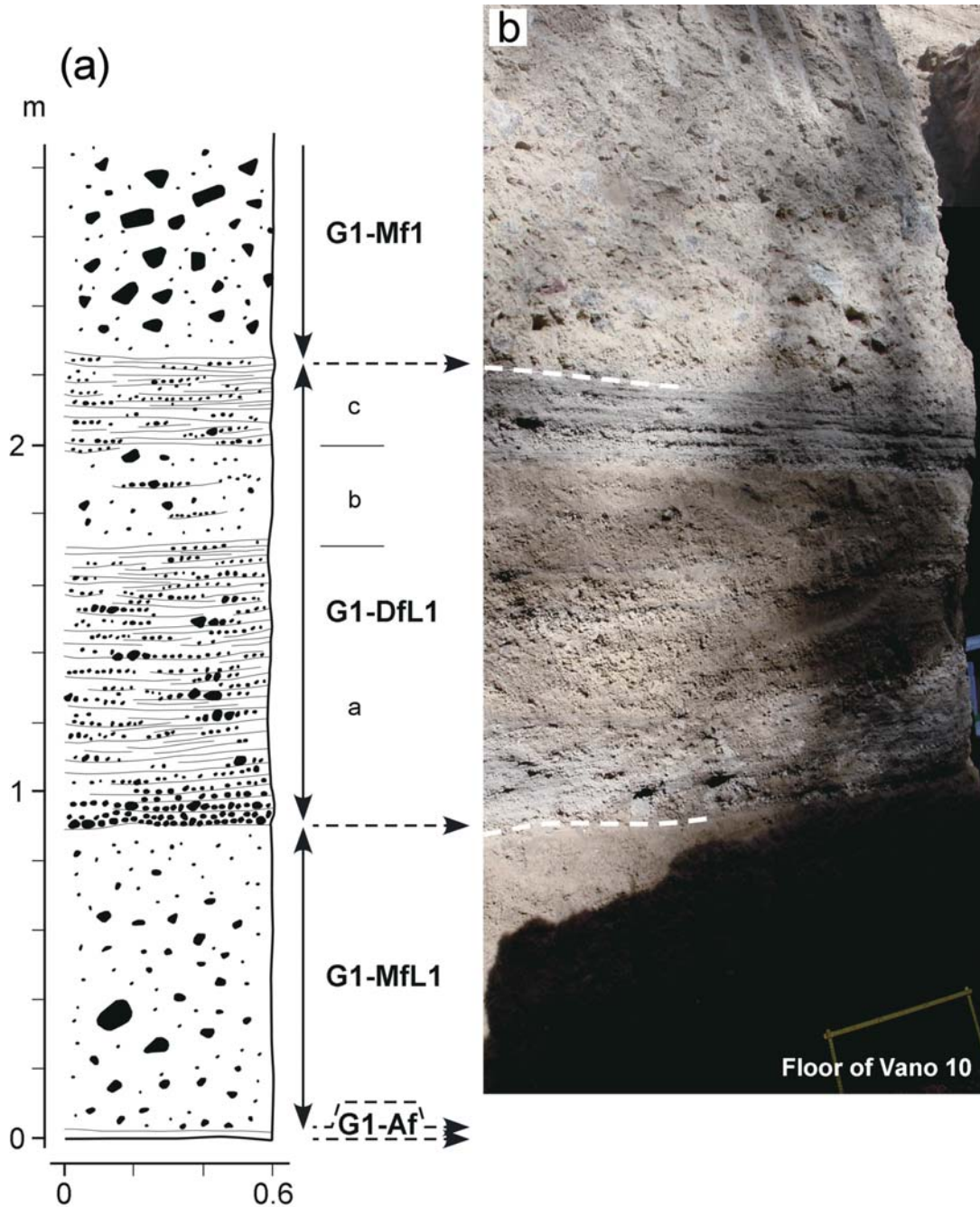


Fig. 10. (a) A sketch of laharic deposits in the northern side of Vano 10. The location is indicated in Fig. 2. (b) A photograph of the same outcrop. G1-DfL1 is basically characterized by stratified, well-sorted, and clast-supported facies (subunits a and c), but sometimes has massive poor-sorted and matrix supported facies (subunit b) like G1-Mf1.

が良く、clast-supported structure を示す (Fig. 4, Table 1). ただし中位には細粒基質に富み淘汰が悪い部分 (DfL1b) が挟在される (Figs. 8, 10, 11). 正級化構造が卓越するが、逆級化構造が認められる場合もある. DfL1 b は MfL1, MfL2 とほぼ同様の層相を示すが、DfL1a および c と漸移的であり、また層厚の変化が著しいので

Mf とは区別し、DfL1 に含めた. DfL1 の層厚は Area 12 西端で約 50 cm である (Fig. 8) のに対し、Vano 10 付近では約 1.3 m にまで厚くなるが (Figs. 5, 10), これは主に DfL1a が東側に向かって徐々に厚くなることによる. また、堆積面は緩く傾斜しており東側ほど高くなる (Fig. 5c). アプシス内部 (Vano 10) の壁際では、DfL1b

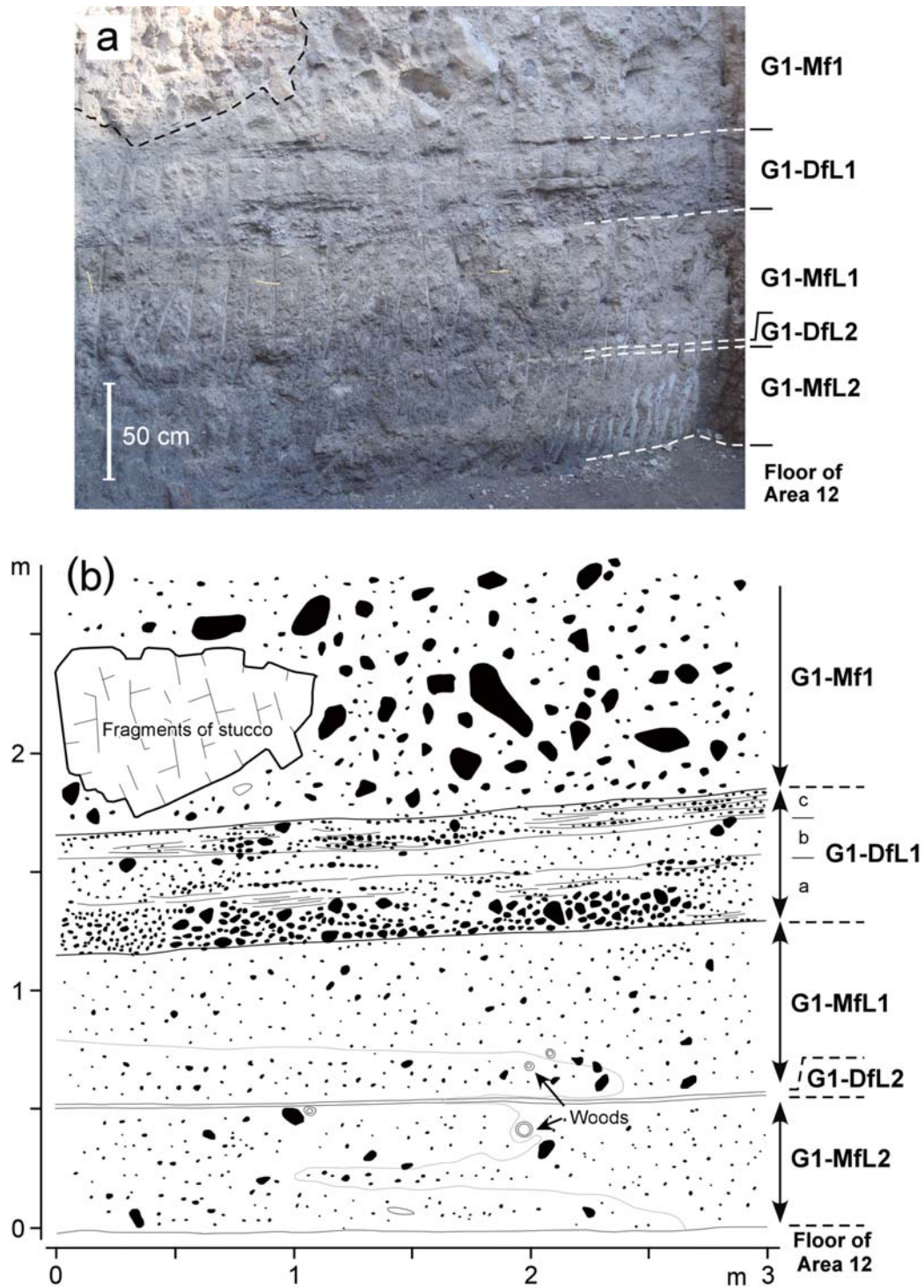


Fig. 11. (a) A photograph and (b) a sketch of fallout and laharic deposits in the northern side of Area 12. The location is indicated in Fig. 2. G1-Mf1 includes many fragments of stucco, indicating the destruction of building before or during this lahar event.

が欠落し (Fig. 9), G1-DfL1 全体が淘汰の非常に良い層相を示す (Fig. 9d).

構成物は、淘汰の良い部分、悪い部分ともに G1-MfL1 と同様で、斑晶量や変質の程度の異なる溶岩片からなり、

それらの最大長径は約 10 cm である。本質スコリアも含まれるが、粒径は最大でも 3 cm 程度である。

〔解釈〕 下位の堆積物と同様の母在を起源とした複数回の土石流により形成された堆積物と考えられる。DfL

1a および c は淘汰が良く、かつ成層構造が発達していることから、Mf よりも高含水率の土石流に由来すると考えられる。とくにアプシス内部 (Vano 10) の壁際では、一見、降下堆積物様の層相を示す場合があるが (Fig. 9d)、これは Vano 10 に流れ込んだ土石流が壁際で一時的に停留するような状況が生じて、淘汰作用が極度に進んだことが原因と考えられる。DfL1b は、一時的に細粒成分に富む高粒子濃度の流れが卓越していたことを示す。

vi) G1-Mf1

〔記載〕 G1 中では最も厚く、塊状で淘汰の悪い堆積物である。級化構造は不明瞭だが、基本的には基底部に粗粒岩塊が濃集する正級化を示す (Fig. 4, Table 1)。部分的に逆級化的な構造を示す場合もある。層厚は約 2 m である。Vano 7 の北側および Vano 12 では下位の G1-DfL1 を整合的に覆うが (Figs. 5c, 8, 11)、南西側では侵食された下位層に対し非整合な関係にある (Figs. 5c, 6)。

構成物は、lucite 斑晶を多く含む新鮮な灰色溶岩 (長径<約 1 m, 亜角～角形状)、低斑晶量の新鮮な灰色溶岩 (長径<1.5 m, 亜角～角形状)、赤～紫色変質溶岩 (長径<約 10 cm, 亜角形状)、本質スコリア (長径<約 10 cm, 亜角形状) が主体で、白色炭酸塩岩 (長径<10 cm) や深成岩 (長径<10 cm) がまれに含まれる。また、Area 12 周辺では彩色漆喰や煉瓦片など建造物の破片 (長径約 2 m) が大量に含まれる (Figs. 5c, 11)。基質は、灰褐色で、粘土～シルト質である。下位層に対する侵食構造が目立つ Vano 6 周辺では、灰色溶岩塊の粒径がとくに大きくなり、その最大長径は 1.5 m に達する (Fig. 5d)。また、Vano 6 および 7 周辺では G1-Af は侵食を受けずに直接 G1-Mf1 に覆われる場合が多い。

全体としてはほとんど塊状であるが、部分的にレンズ状に成層構造が認められる。この構造は水平方向に連続しない場合が多いため、層区分としては G1-Mf1 として一括した。成層の厚さは数 cm 以下であり、構成物は粒径 1 cm 以下 (砂礫サイズ) の溶岩片が主である。淘汰は良く、構成物の特徴は G1-DfL1 および L2 と同様である。

〔解釈〕 G1-Mf1 は、ソノマの山体を構成する古い基盤溶岩が主要な構成物として大量に含まれることから、このステージでは山体の侵食を伴いつつ土石流が発生したと考えられる。また、流れの下流に相当する遺跡北側では彩色漆喰やレンガ片が大量に含まれることから、この土石流の到達に伴い建造物の一部が崩壊して流れに取り込まれたと考えられる。例えば、Area 12 で見出された漆喰は、その彩色画が Vano 10 の北側の壁画とほぼ一致することから、現在は崩壊して存在しない Vano 10 の南側の壁画に由来すると推定されている (松山、私

信)。

G1-Mf1 堆積時には Vano 6 付近ではすでに流水等による下位層の侵食が起こっており、G1-Mf1 はそのような部分を流路として使いながら流れ、堆積物を残したと考えられる (Fig. 6)。下位層のうち G1-Af は侵食を受けない場合があるが、これは最上位の G1-Af8 が粘土質で、緻密かつ硬質であるためと考えられる。また、部分的に成層構造が認められるが、これは、G1-MfL1、DfL1 の層相変化に見られるように、土石流の含水率の局所的な変化を示していると考えられる。本論では G1-Mf1 を基本的に一つの層として区分したが、これを堆積させた流れは、実際には時間的・空間的に様ではなく、また、建造物の影響を受けて流れの様式を変化させたと考えられる。

vii) G1-Mf2～4

〔記載〕 基質に富み塊状で淘汰が悪く、基本的に正級化を示す堆積物である (Fig. 4, Table 1)。それぞれ層厚 2 m 以下で、発掘域全体にわたり認められる。また、G1-Mf1 と同様に、水平方向に連続しない淘汰の良い成層部分が局所的に認められる (Figs. 5, 7)。

構成物は G1-Mf1 とほとんど同じで、主に斑晶量の異なる比較的新鮮な溶岩片と変質溶岩片であるが、粒径は小さくなり、概ね 50 cm 程度以下である。また、G1-Mf1 よりも本質スコリアや生木が多く混入する。

G1-Mf2 は、Area 12 の北側において G1-MfL1 のレベルにまで達する深いチャンネルを埋めて堆積している (Fig. 5c)。また、G1-Mf4 の下部には漆喰の破片で構成される層が不連続に認められることがある (Fig. 5d)。

〔解釈〕 G1-Mf2 直下に存在する深いチャンネルは、G1-Mf1 と G1-Mf2 の堆積の間の休止期に、北に向かって流れる顕著な水流が存在し下位層を深く削ったことを示している。G1-Mf2 以降の堆積物は、G1-Mf1 と同様に、ソノマの山体を構成する古い溶岩が主要な構成物であることから、このステージでも基盤溶岩類の侵食・流出が進み、また、チャンネルを埋めながら下流域に堆積物を残したと考えられる。

viii) G1-Df

〔記載〕 新たな発掘域のほぼ全域に認められる。基質に乏しく淘汰の良い堆積物で、clast-supported structure が卓越しており、泥～シルトサイズの細粒物質に乏しい (Table 1)。成層および斜交構造 (cross-bedding)、侵食構造が良く発達している。級化構造は様々で、複数回の正級化および逆級化が認められる。層厚 1 m 以下で、凹凸のある G1-Mf4 の上面を埋めるように堆積している (Fig. 5)。472 年噴火後の活動休止期を示す G1-So に覆

われる。

構成物は下位の G1-Mf1~4 と同様で、主に斑晶量の異なる比較的新鮮な溶岩片と変質溶岩片からなる。粒径は減少し、概ね 10 cm 程度以下である。層相は G1-DfL1, L2 とよく似ているが、cross-bedding が良く発達している点は異なる。

[解釈]

G1-Df における cross-bedding や侵食構造の発達、流れの粒子濃度が低く、粒子の跳躍や牽引、侵食作用が起こりやすい高流速の流れであったことを示す。G1-Mf 4 までが堆積した後、それまでの土石流よりも含水率が高くかつ速い流れ、すなわち、土石流 (debris flow) よりむしろ stream/flood flow に近い流れが遺跡に流れ込んだと考えられる。構成物粒子の種類やサイズは G1-DfL1 や L2 とほとんど同様であることから、土石流の母材に大きな変化はなかったと考えられる。

3-2 Group 2~3

G2 は腐食土壌を挟み G1 上に堆積し、最下部の降下スコリア層 (G2-Af1~2) とそれを覆う成層した降下火山灰層 (G2-Af3~4)、さらにその上位の泥流堆積物 (G2-Df) からなる。総層厚は 1 m 程度である (Fig. 5a, b)。降下火山灰層は火山豆石や空隙を含み固く締まっており、いわゆるカタ (vesiculated tuff) の特徴を示す。G2 は、6 世紀噴火 (512 年または 536 年) に相当する堆積物である (Perrotta *et al.*, 2006b; Niihori *et al.*, 2007)。泥流堆積物はしばしば下位層との間に侵食面を伴い、とくに南東部 (Vano 3 付近) では深さ約 3 m のチャンネルを形成し、一部は G1-Mf1 にまで達している。

G3 は G2 上に腐食土壌を挟み堆積しており、総層厚は 2 m 程度である。腐食土壌および風化火山灰層により、G3A, 3B, 3C に細分される (Fig. 5a, b)。それぞれの層は火山豆石を含む降下火山灰および降下スコリア層、その上位の泥流堆積物という組み合わせからなるが、とくに 2006 以降の北東側の拡張域では 3 層が明瞭に識別できないことが多い。また、G2 上に形成された侵食面を埋めて堆積する。全岩化学組成にもとづき、G3C は 1631 年噴火に由来する堆積物であると考えられている (Niihori *et al.*, 2007) が、G3A, G3B については正確な年代値は出されていない。

4. 土石流堆積物の形成過程と遺跡の埋没過程

4-1 土石流堆積物の形成過程

本節では、土石流の層相と流動機構との関係や、土石流の分類に関する代表的な考え方 (e.g. Smith, 1986; Smith and Lowe, 1991; Vallance, 2000; 高橋, 2004) に

もとづき、遺跡を埋めた 472 年噴火に関連する土石流堆積物の形成過程について考察する。

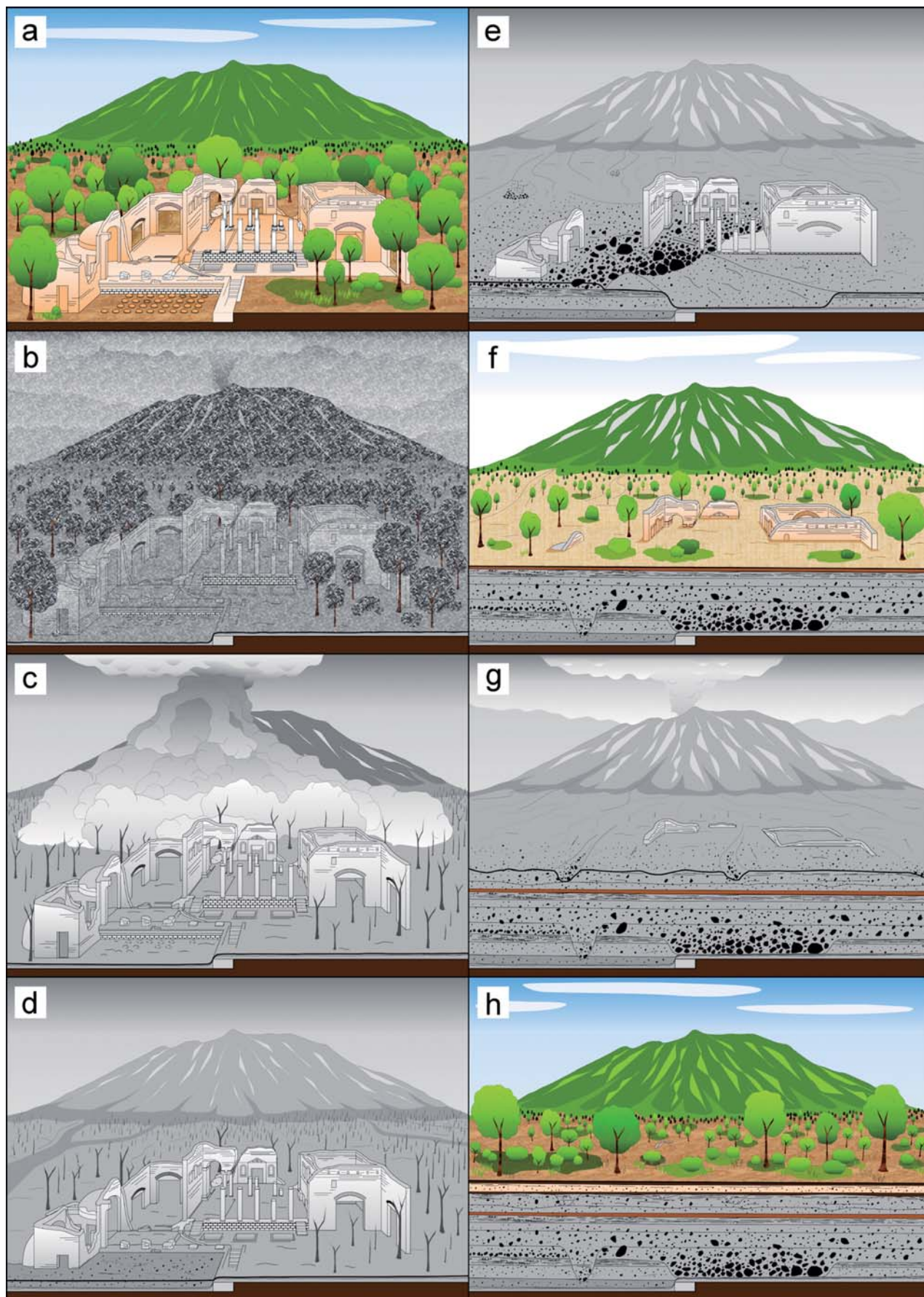
472 年噴火の土石流堆積物には、塊状かつ基質に支持され淘汰の悪い Mf 卓越層と、層構造が発達し淘汰の良い Df 卓越層が繰り返すという基本的パターンが存在する。Mf, Df とともに構成物は下位から上位に向けて変化はあるが同様に、また、隣り合う Mf と Df では漸移的な変化を示すことが多い。これらの特徴は、土石流の流動過程において特に重要な物理量である、含水率 (粒子濃度) と内部応力の種類 (粒子衝突応力, 乱流応力および粘性応力; 高橋, 2004) とその大きさに応じて形成されたと考えられる。

本研究および Niihori *et al.* (2007) の記載 (Table 1) にもとづくと、Mf の主要部分では、細粒基質が流れの支持・粒子運搬に対して重要であったと考えられ、土石流は基質の強度 (matrix strength) もしくは粘着性 (主に粘性応力) により支配された流動過程を経たと考えられる。一方、局所的に数 10 cm~数 m サイズの岩塊が濃集する部分については、粒子衝突に伴う分散圧 (grain dispersive pressure; 粒子衝突応力) が重要な役割を担ったと考えられる。このように、土石流の内部応力の種類は時間的・空間的に一様ではない可能性があり、最終的な定置時の情報である堆積物データのみから具体的な支配応力について言及するのは困難なため、ここでは Mf を形成した土石流が、高粒子濃度かつ動的応力型の土石流 (debris flow) であったという解釈にとどめる。

一方 Df については、成層構造や斜交層理、侵食面の存在から、粒子濃度が Mf よりも極度に低下してスラリーや水流 (stream flow) に近い乱流状態の流れとなり、粒子が浮遊もしくは掃流状態で流動したと考えられる。また、堆積作用より侵食作用が卓越する条件も達成されたと解釈できる。

DfL を形成した土石流は、debris flow よりも粒子濃度が低く、流れの上部では細粒粒子が浮遊する一方、下部は比較的高粒子濃度でかつ粒子衝突が起こるような、debris flow と stream flow の中間的性質をもつ流れと考えられる。このような土石流は、結果として淘汰が良く成層構造が顕著に形成されるような、掃流状集合流動 (高橋, 1982)、もしくは hyperconcentrated flow (Smith, 1986; Smith and Lowe, 1991) と呼ばれる部類の土石流と解釈するのが妥当であろう。

このような層相の多様性とそれらが交互に存在する関係は、Lirer *et al.* (2001) が AD 79 年噴火直後の土石流堆積物について議論したように、ひとつの土石流が流下する過程で発生する流れの中の全体的な物理条件の変化



と、それに伴う堆積過程の進化を示していると考えられる。AD 79 年土石流堆積物の基本的な堆積構造は、流れの前面および基底付近に形成される粗い粒子を多く含み淘汰が悪い部分から、流れの中～上位に形成される細粒かつ淘汰の良い部分への漸移的な変化で特徴づけられる (Lirer *et al.*, 2001)。こうした特徴は、土石流が、(1) debris flow としての head 部分、(2) hyperconcentrated flow としての body 部分、そしてそれらに続く (3) stream flow としての tail 部分から構成されるという、Sohn *et al.* (1999) の堆積物重力流モデルにより説明されている。一方、含水率に応じて、(1) 先行する stream flow、(2) それに引き続く hyperconcentrated flow、(3) 主要部の debris flow の順に構成されるという全く逆の構造を作り出すというモデルも存在する (Sohn *et al.*, 1999; Vallance, 2000)。2つのいずれのモデルが 472 年噴火の土石流で卓越したか判断するには広域的な堆積物データが必要になる。少なくとも Mf, Df の繰り返し構造の存在からは、472 年噴火後に発生した土石流が、高粒子濃度の本体部分と流走過程で分離した高含水率の部分からなり、それぞれが Mf および Df を堆積させるという過程が繰り返されたと推測できる。

4-2 遺跡の埋没過程

本研究および Niihori *et al.* (2007) による遺跡内での堆積物調査の結果と、遺構や遺物に関する考古学的調査 (松山・他, 2009, など) の結果にもとづき、当遺跡の埋没過程について考察する。まず、これまでの発掘状況にもとづき、472 年噴火の前の建造物の状況を復元した (Fig. 12a)。松山・他 (2009) は、北側からこの建造物にアプローチした場合、あたかも神殿であるかのような印象を与えることを意図して、この建物が傾斜地に建てられた可能性を指摘している。このような傾斜地であったことと、建造物の破壊が進んでいたことにより、遺跡北側の最も低いレベル (Area 12) からより早期の土石流堆積物が発見されていると考えられる (Fig. 6)。

Area 12 には大瓶 (dolii) が整然と並び、472 年噴火堆積物 (G1-Af 群) はそれらを直接覆うことから、噴火直前までこの場所がワインの製造・貯蔵の場になっていたと考えられる。一方で、Vano 1~4 や 8 などでは、建物の屋根を構成していたと考えられる煉瓦や、崩壊した建造物などの瓦礫が 472 年噴火堆積物に覆われている。これらのことから、472 年直前には、ワイン製造工場が存在した Area 12 以外はすでに放棄されており、建造物全体は神殿としての機能を失っていた可能性がある。

472 年噴火の初期にはサブ・プリニー式噴火が複数回発生したが、この時の降下火砕物の多くは山体東側に飛散した (Sulpizio *et al.*, 2005)。遺跡では、火山灰およびスコリアは全体で数 cm~10 cm 程度の厚さで堆積した (G1-Af1~5, Fig. 12b)。その後、噴煙柱の形成と崩壊が繰り返され、それらに伴い発生した火砕流や火砕サージがヴェスヴィオ火山の山体斜面を流下し、灰神楽の一部は遺跡にまで到達したと考えられる (G1-Af6, Fig. 12c)。噴火末期には、複数回にわたりマグマ水蒸気爆発が起こり、再び火砕流や火砕サージが発生して山腹から山麓にかけての広い地域に厚い火砕流堆積物が形成された。遺跡では、火砕流の灰神楽に由来する火山豆石を含む降下火山灰 G1-Af7 と Af8 が堆積した。

噴火の主要ステージが終焉を迎えた後、ヴェスヴィオ火山を給源として何度も土石流が発生し、山麓地域を埋没させた。遺跡では、噴火直後に発生した土石流が、建物を迂回するようにして北側から流れ込み、低いレベルにある Area 12 付近を埋没させ、G1-MfL2~DfL1 が形成された (Fig. 12d)。この初期の土石流は、地表を覆っていた生木やスコリアを混入しながら流下したと考えられる。また、Vano 6 および 7 を南東から北東にかけて分断するように土石流堆積物の侵食が起こり、部分的にチャネルが形成された (Fig. 6)。その後の土石流はソンマ山体の基盤の侵食を伴い、地表付近の構成物だけでなく lucite 斑晶に富む古い溶岩を大量に取り込み、遺跡に

Fig. 12. Burial process of the Roman villa in Somma-Vesuviana. (a) Pre-472 eruption. Buildings were reconstructed based on sedimentological and archaeological data obtained in 2002–2008. (b) Initial subplinian phase of the 472 eruption. Scoria and ash were multiply dispersed from the eruptive columns. A few to 10 cm fallout deposits (G1-Af1 to 5) remained. (c) Column collapsing occurred and produced scoria flows in the later phase of subplinian eruption. After that, many phreatomagmatic explosions occurred and pyroclastic flows were produced in the climactic phase. G1-Af6 to 8 were produced by these explosive eruptions. (d) Just after the 472 eruption, lahars buried a northern part of the villa and G1-MfLs and G1-DfLs were deposited. (e) In major laharic events after the 472 eruption, many flows occurred. The flows transported large boulders and buried channels produced by stream flows. Some parts of building may have been destroyed by these energetic debris flows. G1-Mfs and Df were deposited during this stage. (f) After the laharic events, vegetation recovered. (g) AD 512/536 eruption occurred, and the fallout and lahar deposits (G2) buried the villa again. (h) After experiences of the 1631 eruption and other eruptive events which produced G3, vegetation recovered again, and today many people live around the archeological site in Somma-Vesuviana.

流入した (Fig. 12e). この土石流発生期に G1-Mf1~4 および Df が形成された. とくに, G1-Mf1 と G1-Mf2 は, 遺跡の一部を破壊するとともに, 下位の侵食構造を埋めながら厚く堆積した.

472 年噴火とそれに引き続く土石流発生期は終わり, ヴェスヴィオ火山周辺には静穏な時期が訪れて植生が回復する (Fig. 12f). その後は, 472 年以降に発生した噴火 (512 年, 536 年, 1631 年など) により, G2 および G3 が形成された (Fig. 12g). 472 年噴火と同規模の 1631 年噴火以降では, 1906 年に比較的大きな噴火があったものの厚い土石流堆積物は山麓には残されていない. 近現代では山麓の植生は再び回復し (Fig. 12h), 最近の遺跡発掘に至る.

5. まとめ

ヴェスヴィオ火山北麓で発掘が続けられているローマ時代の遺跡「アウグストゥスの別荘」において, 新たに発見された土石流堆積物の記載を行い, 従来のデータと合わせて, その形成過程と遺跡埋没過程について考察を行った.

遺跡北側の最も低いレベルには, 少なくとも 4 枚以上の土石流堆積物 (G1-MfL1, G1-DfL1, G1-MfL2, G1-DfL2) が存在することが新たにわかった. 堆積物の層相は, 塊状無層理かつ基質支持で淘汰の悪い Mf と, 層構造が発達し淘汰の良い Df に分けられる. これらの異なる層相は, 土石流の流動過程で生じた含水率や内部応力の変化を反映したものと考えられる.

新たに見出された土石流堆積物は, 従来認識されていた堆積物 (G1-Mf1~4) よりも古く, かつ 472 年噴火の降下火砕物 (G1-Af1~8) を直接覆うことから, これまで推定されていたよりも早い時期に発生した噴火後の土石流に由来すると考えられる.

謝 辞

本研究を進めるにあたり, 松山 聡博士 (東京大学), 岩城克洋氏 (東京大学), 杉山浩平氏 (東京大学) との議論は大変有益であった. また, 諏訪浩准教授 (京都大学) には貴重なご意見を頂いた. 鈴木由希博士の丁寧な査読は, 本稿の改善に大変有益であった. 本研究は, 文部科学省科学研究費補助金特定領域研究 (16089204) 「火山噴火罹災地の文化・自然環境復元」の補助を受けて実施された.

引用文献

Kaneko, T., Nakada, S., Yoshimoto, M., Fujii, T., Yasuda, A.,

- Yoneda, M. and Aoyagi, M., 2005, Determination of burial age of the Augustus's villa (Italy). *Geochem. J.*, **39**, 573–578.
- Lirer, L., Vinci, A., Alberico, I., Gifuni, T., Bellucci, F., Petrosino, P. and Tinterri, R., 2001, Occurrence of inter-eruption debris flow and hyperconcentrated flood-flow deposits on Vesuvio volcano, Italy. *Sedimentary Geology*, **139**, 151–167.
- Mastrolorenzo, G., Munno, R. and Rolandi, G., 1993, Vesuvius 1906: a case study of a paroxysmal eruption and its relation to eruption cycles. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **58**, 217–237.
- Mastrolorenzo, G., Palladino, D.M., Vecchio, G. and Taddeucci, J., 2002, The 472 AD Pollena eruption of Somma-Vesuvius (Italy) and its environmental impact at the end of the Roman Empire. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **113**, 19–36.
- 松山 聡・青柳正規・松田 陽, 2009, イタリア南部ヴェスヴィオ山北麓に位置するローマ時代遺跡発掘調査について. 東京大学文学部次世代人文学開発センター研究紀要, **22**, 65–79.
- Niihori, K., Nagai, M., Kaneko, T., Fujii, T., Nakada, S., Yoshimoto, M., Yasuda, A. and Aoyagi, M., 2007, Detailed stratigraphical and geological characteristics of volcanic and epiclastic deposits burying a Roman Villa on the northern flank of Mt. Vesuvius (Italy). *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **82**, 119–178.
- Perrotta, A., Scarpati, C. and Luongo, G., 2006a, Volcaniclastic resedimentation on the northern slope of Vesuvius as a direct response to eruptive activity. *Landslides*, **3**, 295–301.
- Perrotta, A., Scarpati, C., Luongo, G. and Aoyagi, M., 2006b, Burial of Emperor Augustus' villa at Somma Vesuviana (Italy) by post-79 AD Vesuvius eruptions and reworked (lahars and stream flow) deposits. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **158**, 445–466.
- Rolandi, G., Petrosino, P. and Geehin, J. Mc, 1998, The interplinian activity at Somma-Vesuvius in the last 3500 years. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **82**, 19–52.
- Rolandi, G., Munno, R. and Postiglione, I., 2004, The AD 472 eruption of the Somma volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **129**, 291–319.
- Rosi, M. and Santacroce, R., 1983, The A.D. 472 Pollena eruption: volcanological and petrological data for this poorly-known Plinian type event at Vesuvius. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **17**, 249–271.
- Rosi, M., Principe, C. and Vecchi, R., 1993, The 1631 Vesuvius eruption. A reconstruction based on historical and stratigraphical data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **58**, 151–182.
- Santacroce, R. and Sbrana, A., 2003, Geological map of Vesuvius. *Universita degli studi di PISA*.
- Smith, G.A., 1986, Coarse-grained nonmarine volcanoclastic sediment: terminology and depositional process. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **97**, 1–10.
- Smith, G.A. and Lowe, D.R., 1991, Lahars: volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow-hyperconcentrated flow continuum. In: Fisher, R.V. and Smith, G.A., Eds. *Sedimentation in volcanic settings*. Tulsa, Okla., *Soc. Sed. Geol. (SEPM)*, Spec. Publ., **45**, 59–70.
- Sohn, Y.K., Rhee, C.W. and Kim, B.C., 1999, Debris flow and hyperconcentrated flood-flow deposits in an alluvial

- fan, Northwestern Part of the Cretaceous Yongdong Basin, Central Korea. *J. Geol.*, **107**, 111–132.
- Sulpizio, R., Mele, D., Dellino, P. and LaVolpe, L., 2005, A complex, Subplinian-type eruption from low-viscosity, phonolitic to tephri-phonolitic magma: the AD 472 (Pollena) eruption of Somma-Vesuvius, Italy. *Bull. Volcanol.*, **67**, 743–767.
- Sulpizio, R., Mele, D., Dellino, P. and LaVolpe, L., 2007, Deposits and physical properties of pyroclastic density currents during complex Subplinian eruptions: the AD 472 (Pollena) eruption of Somma-Vesuvius, Italy. *Sedimentology*, **54**, 607–635.
- 高橋 保, 1982, 土石流の停止・堆積機構に関する研究(3) — 土石流扇状地の二次侵食 —. 京都大学防災研究所年報, 25 B-2, 327–348.
- 高橋 保, 2004, 土石流の機構と対策. 近未来社, pp 432.
- Vallance, J.W., 2000, Lahars. In: Siggurdsson, H. et al. Eds. *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, pp. 601–616.

(Received December 14, 2009)

(Accepted February 19, 2010)