2016年熊本地震で甚大な被害を受けた益城町市街地の地下を構成する火山性堆積物の層序と分布形態

Stratigraphy and distribution pattern of volcanogenic sediments beneath downtown Mashiki, Kumamoto, SW Japan, seriously damaged by the 2016 Kumamoto Earthquake

Abstract

中澤 努* 坂田健太郎* 佐藤善輝*
星住英夫* ト部厚志** 吉見雅行*

Tsutomu Nakazawa, Kentaro Sakata*,
Yoshiki Sato*, Hideo Hoshizumi*,
Atsushi Urabe** and Masayuki Yoshimi**

2017年8月28日受付.

2017年12月4日受理.

* 産業技術総合研究所地質調査総合センター
Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba
305-8567, Japan

** 新潟大学災害・復興科学研究所
Research Institute for Natural Hazards and
Disaster Recovery, Niigata University, 8050
Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata 950-
2181, Japan

Corresponding author: T. Nakazawa,
t-nakazawa@aist.go.jp

The 2016 Kumamoto Earthquake resulted in severe damage to houses and buildings, particularly in the central part of Mashiki Town, Kumamoto Prefecture, SW Japan. We examined drill core and standard penetration test (SPT) samples obtained from the severely damaged area to understand the influence of the underlying geology on damage caused by strong earthquake motion. The downtown Mashiki area is underlain by thick volcanogenic sediments derived from Aso volcano, comprising the Aso-3 pyroclastic flow, the Aso-4/3 interval, the Aso-4 pyroclastic flow, lahar, and loess deposits, in ascending order. The stratigraphic correlation of several boreholes in Mashiki Town reveals that the severely damaged area is characterized by a thicker fine-grained pumice bed of the Aso-4 pyroclastic flow and overlying weathered lahar deposits saturated with groundwater.

Keywords: 2016 Kumamoto Earthquake, earthquake damage, pyroclastic flow, lahar, Aso volcano, Mashiki, Kumamoto

はじめに

2016年熊本地震により、熊本県内では多くの建物被害が生じた。特に上益城郡益城町の市街地ではこの地震で極めて甚大な建物倒壊被害を被ったことが知られる。益城町市街地は阿蘇-4火砕流堆積物が形成する台地(田村ほか, 1983; 熊本県地質調査業協会地盤図編纂委員会, 2003; 星住ほか, 2004)の縁辺斜面に位置する。このうち被害が集中したのは台地縁辺斜面の下半部(裾部)である(中澤ほか, 2016; 国土技術政策総合研究所・建築研究所, 2016) (以下、この地域を「被害甚大地域」と呼ぶ)。建物被害は、明瞭な地表地震断層が現れた(Shirahama et al., 2016)布田川断層沿いよりも、断層から少し離れた益城町市街地で甚大であったことから、益城町市街地の被害はこの地域の地盤特性を強く反映していると考えられている(友澤ほか, 2017)。しかし、この地域の地下地質については、これまで詳細な報告はない。筆者らは被害甚大地域の地下の地質層序および地層の分布形態を明らかにするため、当該地域の3地点で実施されたボーリング調査(掘進長55~75 m)のコア試料等の検討を行った。吉見ほか(2017)により、これら3地点のボーリング孔の標準貫入試験結果およびPS検層結果については既に報告されているが、地質層序の詳細については検討されていない。そ

こで本論文ではこれらボーリング試料にみられる火山性堆積物の層相および層序の記載を行う。また、既存のボーリングデータと併せて、被害甚大地域の地下の地層分布形態の特徴について考察する。

地形・地質概説

今回の調査地域である熊本県上益城郡益城町は阿蘇火山の西方に位置する。町の中央部には木山川・秋津川が東から西に流れ、河川沿いには低地が発達している。この低地の南側には、主に白亜紀の堆積岩類からなる山地がみられる(Fig. 1A)。一方、低地の北側には広く台地が発達する。この台地は阿蘇-4火砕流堆積物あるいはそれを覆う段丘堆積物により形成され(田村ほか, 1983; 熊本県地質調査業協会地盤図編纂委員会, 2003; 星住ほか, 2004)、熊本市街地付近まで連続するなだらかな南西傾斜の段丘面を形成する(Fig. 1A)。

益城町市街地はこの阿蘇-4火砕流堆積物等が形成する台地の南縁の斜面に位置する(Fig. 1B)。2016年熊本地震では、益城町寺迫から熊本市東区桜木までの少なくとも3 km以上にわたって、台地縁斜面の下半部(裾部)に帯状に被害が集中した(Fig. 1B; 中澤ほか, 2016; 国土技術政策総合研究所・建築研究所, 2016)。

益城町市街地付近の地下の層序についてはこれまで詳細な

Fig. 1. Index map of the study area. A: Geological map of Mashiki and its surrounding area. The map is taken from the Seamless Geological Map (Geological Survey of Japan, AIST, 2015). B: Map showing geomorphic divisions and drill sites. Surface fault ruptures are adapted from Shirahama et al. (2016). The severely damaged area is simplified from Nakazawa et al. (2016). The base map is from the GSI Map (Geospatial Information Authority of Japan).

Age		Stratigraphic division
Pleistocene	Holo-cene	Chuseki-so
		Hotakubo/Takuma Sandy Gravel Bed
	Late	Aso-4 pyroclastic flow deposits
		Aso-4/3 interval deposits (Miyuki Fm)
		Aso-3 pyroclastic flow deposits
	Middle	Aso-3/2 interval deposits
		Aso-2 pyroclastic flow deposits
		Togawa Lava Aso-2/1 interval deposits
		Aso-1 pyroclastic flow deposits

Fig. 2. Stratigraphic summary of the strata beneath the Kumamoto Plain. Modified from the Editorial Committee of the Geotechnical Map, Geotechnical Consultant Association of Kumamoto Prefecture (2003).

報告はないが、熊本県地質調査業協会地盤図編纂委員会 (2003) によれば、熊本市周辺の台地の地下には、広域にわたり、中-後期更新世の阿蘇カルデラ形成に関わる4回の大規模火砕流堆積物(下位より阿蘇-1~4に区分; 小野ほか, 1977)が認められる。噴出年代はそれぞれ、阿蘇-1(約27万年前)、阿蘇-2(約14万年前)、阿蘇-3(約12万年前)、阿蘇-4(約9万年前)である(松本ほか, 1991)。これらの火砕流堆積物の間に挟まる礫や砂、泥からなる堆積物はそれぞれ、阿蘇-2/1間堆積物、阿蘇-3/2間堆積物、阿蘇-4/3間堆積物と呼ばれている(Fig. 2)。このうち阿蘇-4/3間堆積物は広域に認められるとし、益城町付近では渡辺・小野(1969)により布田層と名付けられている。また、熊本平野ではボーリング試料に基づいて、御幸層と命名されている(石坂ほか, 1995)。

益城町およびその周辺地域には、木山川・秋津川沿いの低地の南縁に沿って活断層とされる布田川断層が、低地の北東縁には木山断層が従来から知られている(九州活構造研究会, 1989; Fig. 1A)。今回の地震ではこれら活断層とされた箇所に沿って地表地震断層が出現した(Shirahama et al., 2016)。木山断層に沿う、低地の北東縁の地表地震断層は、益城町市街地の東から、やや不明瞭ながらもボーリング調査地点付近までトレースされた(Fig. 1B; Shirahama et al., 2016)。

調査手法

今回の調査ではGS-MSK-1(掘進長55.0 m)、GS-MSK-2(掘進長75.45 m)、GS-MSK-3(掘進長55.40 m)の3地点でボーリング調査を実施した(Fig. 1B; Table 1)。

Table 1. Details of drilling surveys.

Borehole no.	Place name	Latitude	Longitude	Elevation of ground surface	Depth	Sampling
GS-MSK-1	Miyazono, Mashiki Town	32° 47' 17.36" N	130° 49' 0.02" E	T. P. +17.45 m	55.00 m	Continuous coring
GS-MSK-2	Yasunaga, Mashiki Town	32° 47' 12.44" N	130° 48' 50.66" E	T. P. +10.32 m	75.45 m	SPT sampler; 30 cm/m
GS-MSK-3	Yasunaga, Mashiki Town	32° 47' 13.83" N	130° 48' 33.12" E	T. P. +19.16 m	55.40 m	SPT sampler; 30 cm/m

T.P.: Tokyo Peil; mean tidal level in Tokyo Bay

このうち GS-MSK-1 では掘削径 86 mm のコアパックサンプラーを用いて、全層準コア試料を採取した。GS-MSK-1 掘削孔では PS 検層も行われている(吉見ほか, 2017)。また GS-MSK-1 と同じ敷地内では、動的変形試験実施のためにトリプルチューブサンプラーによる不攪乱試料の採取も行われた(新垣ほか, 2017)。深度 10 m までは GS-MSK-1 本孔コアのほか、この別孔コア(GS-MSK-4)の観察を併用した。一方、GS-MSK-2 および GS-MSK-3 では標準貫入試験が実施されている(吉見ほか, 2017)。このため、この 2 孔で検討したのは、深度方向 1 m ごとに 30 cm 間で実施される標準貫入試験のサンプラーで採取された試料(通称ペネ試料; 以下、これをペネ試料と呼ぶ)である。ペネ試料はこのような限られた区間の試料であり、少なからず攪乱されているため、堆積構造等は観察できないが、堆積物の構成粒子は十分確認できる。

全層準コア採取を実施した GS-MSK-1 では、コア試料を半割にし、半割面で観察される層相を記載した。また、深度約 10 m までの泥質部分については、プラスチックケースを用いて半割コア試料から厚さ約 1 cm ではぎ取り、その試料の軟エックス線画像も観察に併用した。このほかコア試料から定間隔で試料を分取し、粒度、密度、含水率、色調の測定を行った。

粒度分析は、コアより約 2~3 m ごとに分取した堆積物試料 20~30 g(より大きい粒径粒子からなる深度 30~50 m については約 300 g)を乾燥機で十分に乾燥させた後に秤量し、まず 250 メッシュ(目開き 0.063 mm)の篩上で水洗により泥分を除去した。また篩上の試料を再び乾燥させ乾燥状態で 5 メッシュ(目開き 4 mm)および 9 メッシュ(目開き 2 mm)の篩にかけ、5 メッシュの篩上を中礫サイズ、9 メッシュの篩上を細礫サイズ、9 メッシュの篩下を砂サイズ、それらの合計と水洗前試料の乾燥重量との差を泥サイズとして、それぞれの粒径の重量 % を算出した。なお今回の分析では泥サイズおよび砂サイズの細分は行っていない。また分取した試料中に中礫サイズを超える大きさの粒子は目視で確認されなかった。

堆積物の密度・含水率は、容積 7 ml のキューブ型の容器を、約 20 cm ごとにコア試料の半割面に埋め込んで試料を採取し、採取した試料の乾燥前と乾燥後の重量測定値をもとに、湿潤かさ密度、乾燥かさ密度および含水率を算出した。堆積物の粒径が大きい深度 30~50 m では、前述の粒度分析用に分取した棒状コア試料を事前にノギスを用いて体積を

測定し、乾燥前と乾燥後の重量測定値をもとに湿潤かさ密度、乾燥かさ密度、および含水率を算出した。

火砕流堆積物については、ボーリング試料観察時に肉眼的に観察される特徴(構成粒子、粒径、層厚など)を詳細に記載した後、代表する部分から屈折率測定用試料を分取した。分取した試料は室内において、250 メッシュクロス上で水洗し泥分を除去した後、乾燥させ、鏡下の観察により、まず重鉱物組成を定性的に把握した。そして火山ガラス、直方輝石(斜方輝石)、普通角閃石が含まれる場合はそれらの屈折率を測定した。測定粒子は、なるべく粗粒な軽石を粉砕し、篩により分別した粒子径 0.063~2 mm の火山ガラス・重鉱物粒子を使用するようにした。屈折率の測定は、株式会社古澤地質製の温度変化型屈折率測定装置 MAIOT(古澤, 1995)を使用し、顕微鏡下でそれぞれ 30 点以上の測定を行い、屈折率のレンジとモード値を把握した。

ボーリング試料の記載

今回検討した 3 地点のボーリング試料には主に火山性の堆積物が観察された。これらの堆積物は、下位より、阿蘇-3 火砕流堆積物、阿蘇-4/3 間堆積物、阿蘇-4 火砕流堆積物、ラハール堆積物、土壌層(レス堆積物)に区分される。以下にそれぞれの地層の層相および記載岩石学的特徴、含水率、密度などを記載する。

1. 阿蘇-3 火砕流堆積物

分布深度: GS-MSK-2 の深度 75.45(孔底)~71.50 m、および GS-MSK-3 の深度 55.40(孔底)~33.35 m(Fig. 3)。GS-MSK-1 では掘削深度以深に分布すると考えられる。

層相: ペネ試料のみの検討であるが、観察した限りではスコリアを主体とする暗褐色の火山砂および火山灰からなる。スコリアは暗灰~灰色を呈し、比較的良く発泡しているものからあまり発泡のよくないものまでみられる。また、黄白~茶白色の軽石もみられる。砂~礫サイズの黒色ガラス質岩片を少量含むほか、先阿蘇火山岩類由来の輝石安山岩を主体とする異質岩片がやや多く含まれる。上部は土壌化により赤褐色を呈する。

重鉱物: 直方輝石および単斜輝石が含まれる(Table 2)。GS-MSK-3 の 47.15 m 試料では極めて少量であるが普通角閃石も確認された。

屈折率: GS-MSK-2 の深度 73.15~74.00 m から分取した試料に含まれる直方輝石(γ)の屈折率は 1.700~1.709 (1.701~1.702; 括弧内はモード値を示す、以下同じ)(Table

Fig. 3. Lithologic facies and N-values of standard penetration tests (SPT) in boreholes GS-MSK-2 and -3. N-values are adapted from Yoshimi et al. (2017). See Figure 8 for the legend.

2). また、GS-MSK-3の深度47.15~48.00 mの試料に含まれる直方輝石の屈折率(γ)は1.700~1.704(1.701~1.703)、同じくGS-MSK-3の深度40.15~41.00 mの試

料の直方輝石の屈折率(γ)は1.699~1.704(1.700~1.701)である(Table 2)。

対比・解釈：後述する阿蘇-4火砕流堆積物の下位に位置し、重鉱物組成は基本的に両輝石型であること、また直方輝石の屈折率が低く、町田・新井(2003)の阿蘇-3火砕流堆積物の値にほぼ一致することから、本堆積物は阿蘇-3火砕流堆積物と考えられる。本堆積物はスコリアを主体とし軽石を伴い、斑晶はさほど多くないという特徴から、阿蘇-3火砕流堆積物のうちのAso-3B火砕流(小野ほか, 1977)に対比され则认为られる(Fig. 4)。上部は土壌化していることから、堆積後にしばらく陸上露出していた可能性が高い。

2. 阿蘇-4/3間堆積物

阿蘇-3火砕流堆積物と後述する阿蘇-4火砕流堆積物の間の堆積物をここでは阿蘇-4/3間堆積物と呼ぶ。

分布深度：GS-MSK-2の深度71.50~48.10 m(Fig. 3)。GS-MSK-1では深度55.00~51.00 mに最上部の礫混じり泥層のみが観察される(Fig. 5)。GS-MSK-3では欠如していると考えられる。

層相：ベネ試料のみのため詳細は不明であるが、下部は礫層、上部は砂質泥層あるいは泥質砂礫層からなる。下部の礫層は主に先阿蘇火山岩類の輝石安山岩の礫からなる。採取された礫は礫径が30~60 mm程度のものが多い。なおGS-MSK-2の深度69~70 mからは溶結凝灰岩が棒状に採取されたが、採取された試料では溶結面が直立しているのが観察されたことから、これらも礫と判断される。礫質のベネ試料ではマトリックスは確認できないが、採取時に流失した可能性が高い。

上部は主に火山灰質の砂質泥層からなり、径1~10 mm程度の軽石・スコリア・岩片を多く含む層を数層挟在する(Fig. 6-1)。この軽石・スコリア・岩片層は層厚約15~60 cmで、上方に粗粒化するのがしばしば観察される。一部には斜交層理が認められる。GS-MSK-1コアの深度54.81~54.85 mには径1~20 mmの軽石およびスコリア

Table 2. Petrographic properties of pyroclastic flow deposits observed in the examined sediment core and SPT samples.

Unit	Borehole	Depth	Heavy mineral composition	Refractive index		
				opx (γ)	ho (n_2)	glass shards (n)
Aso-4, Unit 4	GS-MSK-1_core	8.55–8.60 m	ho, mt > opx > cpx	1.697–1.700 (1.699–1.700)	1.686–1.691 (1.688–1.690)	—
Aso-4, Unit 3	GS-MSK-1_core	10.40–10.45 m	ho, opx, mt > cpx	1.697–1.701 (1.699–1.700)	1.687–1.692 (1.688–1.689)	1.508–1.514 (1.511–1.512)
Aso-4, Unit 3	GS-MSK-1_core	28.80–28.85 m	ho, opx, mt > cpx	1.699–1.701 (1.700)	1.684–1.690 (1.688)	1.507–1.511 (1.511)
Aso-4, Unit 2	GS-MSK-1_core	37.10–37.20 m	ho, opx, mt	1.697–1.702 (1.699)	1.686–1.693 (1.688)	1.509–1.512 (1.511)
Aso-4, Unit 1	GS-MSK-1_core	49.10–49.20 m	ho, opx, mt	1.698–1.702 (1.699–1.700)	1.686–1.691 (1.688)	1.508–1.512 (1.511)
Aso-4, Unit 1	GS-MSK-1_core	49.60–49.64 m	ho, mt > opx	1.698–1.702 (1.699)	1.685–1.690 (1.687–1.688)	1.508–1.515 (1.512)
Aso-4/3 interval	GS-MSK-1_core	54.81–54.85 m	opx > mt > cpx	1.700–1.703 (1.700–1.701)	—	1.501–1.504 (1.502–1.503)
Aso-4, Unit 2	GS-MSK-2_SPT	44.15–45.00 m	ho, opx, mt > cpx	1.697–1.702 (1.699)	1.685–1.690 (1.687)	1.508–1.514 (1.508, 1.511)
Aso-3	GS-MSK-2_SPT	73.15–74.00 m	opx, cpx, mt	1.700–1.709 (1.701–1.702)	—	—
Aso-4, Unit 2	GS-MSK-3_SPT	31.15–32.00 m	ho, opx, mt > cpx	1.697–1.700 (1.699–1.700)	1.686–1.691 (1.687–1.688)	1.508–1.513 (1.512)
Aso-3	GS-MSK-3_SPT	40.15–41.00 m	opx, cpx, mt	1.699–1.704 (1.700–1.701)	—	—
Aso-3	GS-MSK-3_SPT	47.15–48.00 m	opx, cpx, mt >> ho	1.700–1.704 (1.701–1.703)	1.690–1.694 (1.691–1.692)	—

opx: orthopyroxene, cpx: clinopyroxene, ho: hornblende, bi: biotite, mt: magnetite

This study		Previous studies	
Loess deposits			
Lahar deposits			
Aso-4 pyroclastic flow deposits	Unit 4	Aso-4T Pyroclastic Flow Deposits (Hoshizumi et al, 1988)	
	Unit 3	Aso-4A Pyroclastic Flow (Ono et al, 1977)	Pumice Flow
	Unit 2		Aso-4, Oyatsu white pumice- flow deposits (Watanabe, 1978)
	Unit 1	Ground layer	
Aso-4/3 interval deposits		Futa Formation (Watanabe and Ono, 1969) Miyuki Formation (Ishizaka et al., 1995)	
Aso-3 pyroclastic flow deposits		Aso-3B Pyroclastic Flow (Ono et al., 1977)	

Fig. 4. Correlation of stratigraphic divisions with previous studies.

Fig. 5. Lithologic facies, S- and P-wave velocities, density, color, and particle size composition of core GS-MSK-1 recovered from Miyazono, Mashiki Town. S- and P-wave velocities are adapted from Yoshimi et al. (2017). See Figure 8 for the legend.

Fig. 6. Core photographs of GS-MSK-1. 1: Aso-4/3 interval deposits, depth 53.00–53.50 m. 2–6: Aso-4 pyroclastic flow deposits; 2: Unit 1, depth 50.00–50.50 m; 3: Unit 2, depth 36.50–37.00 m; 4: Unit 3, depth 19.03–19.53 m; 5: Unit 4, depth 6.30–6.80 m; 6: Soft X-ray image of Unit 4, depth 6.30–6.80 m. 7: Lahar deposits, depth 3.00–3.50 m. 8: Soft X-ray image of lahar deposits, depth 3.00–3.50 m. 9: Loess deposits, depth 2.03–2.53 m.

が散在するのが確認された。本堆積物は全体に暗灰色を呈するが、上部は風化し褐色を帯びる。

重鉱物：GS-MSK-1 コアの深度 54.81～54.85 m の軽石には直方輝石および単斜輝石が含まれる (Table 2)。普通角閃石は検出されない。

屈折率：GS-MSK-1 の深度 54.81～54.85 m の軽石 (火山ガラス) の屈折率 (n) は 1.501～1.504 (1.502～1.503)、軽石に含まれる直方輝石の屈折率 (γ) は 1.700～1.703 (1.700～1.701) である (Table 2)。

密度・含水率：GS-MSK-1 コアで 2 層準のみの測定であるが、湿潤密度は 1.59～1.76 g/cm³、乾燥密度は 1.04～1.27 g/cm³、含水率は 28～35% である (Fig. 5)。

対比・解釈：本堆積物は阿蘇-3 火砕流堆積物と後述する阿蘇-4 火砕流堆積物の間に位置し、一部に斜交層理や逆級化などの堆積構造が認められることから、河川あるいはラハールによる堆積が考えられる。本堆積物下部の礫層は GS-MSK-3 では認められないことから、谷地形の埋積層と考えられる。GS-MSK-1 コアの本ユニット上部には逆級化する

スコリア・軽石・岩片の層がみられる。これは後でも述べるが、ラハールの流動機構のひとつである土石流 (debris flow) にみられる特徴 (Smith, 1986; Smith and Lowe, 1991) である。前述したように阿蘇-4/3 間堆積物は、阿蘇カルデラ南西側斜面域では布田層 (渡辺・小野, 1969)、熊本平野の地下では御幸層 (石坂ほか, 1995) と呼ばれている。本堆積物はこれらに相当すると考えられる (Fig. 4)。

3. 阿蘇-4 火砕流堆積物

調査地域の阿蘇-4 火砕流堆積物は構成粒子、粒径などの違いによりユニット 1～4 の 4 つのユニットに区分した。以下にそれぞれのユニットごとに記載し、対比・解釈は最後にまとめて記述する。

(1) ユニット 1

分布深度：GS-MSK-1 の深度 51.00～41.00 m (Fig. 5)、GS-MSK-2 の深度 48.10～45.00 m、GS-MSK-3 の深度 33.35～33.00 m (Fig. 3)。

層相：主に礫サイズの異質岩片からなり、軽石が混じる (Fig. 6-2)。GS-MSK-1 コアの本ユニットは、礫サイズの粒子が

全体の50~80%を占め、このうちのほとんどが中礫サイズである。径20 mm以上の粒子が目立つが、全体として上方に細粒化し、上方に礫サイズ粒子の量比が小さくなる。礫サイズ粒子の多くは角礫あるいは亜角礫で、岩質は先阿蘇火山岩類由来の輝石安山岩を主体とし、流紋岩やチャート、変成岩類を含む。礫サイズの灰白~黄白色の軽石もふつうに見受けられ、これらはよく発泡して多孔質である。礫支持であり、間隙は主に分級の悪い砂サイズの軽石や岩片が埋めている。ユニット上部に向け細粒分が増加する。

GS-MSK-2やGS-MSK-3のペネ試料でも本ユニットに相当する岩片が卓越する層準が認められたが、GS-MSK-1コアに比べ層厚は小さい。

重鉱物：やや褐色を帯びた普通角閃石、および直方輝石を含む。

屈折率：火山ガラスの屈折率(n)は1.508~1.515(1.511~1.512)、普通角閃石の屈折率(n_2)は1.685~1.691(1.687~1.688)、直方輝石の屈折率(γ)は1.698~1.702(1.699~1.700)である(Table 2)。

密度・含水率：GS-MSK-1コアの3層準のみの測定であるが、湿潤密度は1.49~2.00 g/cm³、乾燥密度は1.26~1.64 g/cm³、含水率は16~19%(Fig. 5)。層準により値の変化が大きい。

(2)ユニット2

分布深度：GS-MSK-1の深度41.00~31.00 m、GS-MSK-2の深度45.00~31.00 m(Fig. 3)、GS-MSK-3の深度33.00~27.00 m(Fig. 5)。

層相：主に礫サイズの軽石からなり、同じく礫サイズの岩片を含む(Fig. 6-3)。コア試料で観察する限りでは、岩片が多い下位ユニットから漸移する。礫サイズ粒子は全体の20~50%程度で、細礫サイズに比べ中礫サイズがやや多い。全体として上方に細粒化し、上方に礫サイズの量比が小さくなる。ほとんどは礫支持であり、礫間には分級の悪い砂サイズの軽石、岩片、および火山灰が埋めている。軽石はユニット1と同じく灰白~黄白色で多孔質である。岩片は角礫あるいは亜角礫で、主に輝石安山岩からなる。

重鉱物：やや褐色を帯びた普通角閃石、直方輝石、および少量の単斜輝石を含む(Table 2)。

屈折率：火山ガラスの屈折率(n)は1.508~1.514(1.511~1.512)、普通角閃石の屈折率(n_2)は1.685~1.693(1.687~1.688)、直方輝石の屈折率(γ)は1.697~1.702(1.699~1.700)である(Table 2)。

密度・含水率：GS-MSK-1コアの5層準のみの測定であるが、湿潤密度は1.51~1.81 g/cm³、乾燥密度は0.95~1.36 g/cm³、含水率は25~37%である。密度は上方にむけて大きくなる(Fig. 5)。一方、含水量は上部ほど少ない(Fig. 5)。

(3)ユニット3

分布深度：GS-MSK-1の深度31.00~8.92 m(Fig. 5)、GS-MSK-2の深度31.00~8.80 m、GS-MSK-3の深度27.00~11.80 m(Fig. 3)。

層相：軽石質の火山砂からなり、礫サイズの軽石が散在する(Fig. 6-4)。全体が塊状で、黄灰色を呈する。砂から礫サイ

ズの岩片を含む。粒径は全体を通して大きな変化はなく、泥サイズ粒子が約25%、砂サイズ粒子が約50%、礫サイズ粒子が約25%である。軽石は白~黄白色で、よく発泡し多孔質である。

重鉱物：やや褐色を帯びた普通角閃石、直方輝石、および少量の単斜輝石を含む(Table 2)。

屈折率：火山ガラスの屈折率(n)は1.507~1.514(1.511~1.512)、普通角閃石の屈折率(n_2)は1.684~1.692(1.688~1.689)、直方輝石の屈折率(γ)は1.697~1.701(1.699~1.700)である(Table 2)。

密度・含水率：GS-MSK-1コアでの湿潤密度は0.80~1.83 g/cm³、平均1.49 g/cm³、乾燥密度は0.55~1.54 g/cm³、平均1.08 g/cm³である。含水率は15~44%で、平均28%である(Fig. 5)。

(4)ユニット4

分布深度：GS-MSK-1の深度8.92~6.47 m(Fig. 5)。GS-MSK-2およびGS-MSK-3では認められない。

層相：橙色を呈する火山灰からなり、礫サイズの軽石および岩片が散在する(Figs. 6-5, 6-6)。塊状で、全体に風化が著しく火山灰および軽石は粘土化している。ユニット下部には岩片が多く含まれる。下位ユニットとの境界は明瞭である。粒度分析は下部の1層準のみであるが、泥サイズ粒子が約25%、砂サイズ粒子が約50%、礫サイズ粒子が約25%を占める。

重鉱物：やや褐色を帯びた普通角閃石と直方輝石、および少量の単斜輝石が含まれる(Table 2)。

屈折率：普通角閃石の屈折率(n_2)は1.686~1.691(1.688~1.690)、直方輝石の屈折率(γ)は1.697~1.700(1.699~1.700)である(Table 2)。粘土化が著しく火山ガラスは検出できなかった。

密度・含水率：GS-MSK-1コアでの湿潤密度は1.50~1.86 g/cm³、平均1.69 g/cm³、乾燥密度は0.97~1.52 g/cm³、平均1.25 g/cm³である。含水率は19~38%で、平均27%(Fig. 5)。岩片が多く含まれる下部で密度が大きく、上部で小さい。一方、含水率は下部で小さく、上部で大きい(Fig. 5)。

(5)対比・解釈

ユニット1~4とも、下位の堆積物と異なり普通角閃石を含むことを特徴とする。火山ガラス、普通角閃石、直方輝石の屈折率は調査地域付近に広く分布する阿蘇-4火砕流堆積物の値(町田・新井, 2003)と一致し、これに対比される。

このうちユニット1は阿蘇-4火砕流堆積物の最下部にあたり、岩片を多量に含み、細粒物に乏しいことを特徴とする。また、ユニット2は軽石に富むものの、ユニット1同様に細粒物を欠いている。これらは、小野ほか(1977)のAso-4A最下部の異質角礫火砕流に相当し(Fig. 4)、火砕流の基底部にみられるグラウンドレイヤー(Walker et al., 1981)であると考えられる。

ユニット3は、火山灰基質と軽石を主体とする淘汰の良くない火砕流堆積物であることから、小野ほか(1977)のAso-4Aの軽石流に相当すると考えられる(Fig. 4)。また層

Fig. 7. Typical facies stacking pattern of lahar deposits in core GS-MSK-4.

相および分布から判断すると、Watanabe (1978) の区分で、本調査地域近傍の益城町小谷を模式地とする Oyatsu white pumice-flow deposits に相当すると考えられる (Fig. 4)。

ユニット 4 は阿蘇-4 火砕流堆積物の最上部に相当すること、また橙色を帯びた色調が特徴的であることから、阿蘇-4 火砕流堆積物最上部の Aso-4T 火砕流堆積物 (星住ほか, 1988) に対比される可能性が高い (Fig. 4)。基底部に異質岩片に富むグラウンドレイヤーを伴うことも Aso-4T 火砕流堆積物にみられる特徴であり (Suzuki-Kamata and Kamata, 1990)、この解釈を支持する。

4. ラハール堆積物

分布深度：GS-MSK-1 の深度 6.47～2.56 m (Fig. 5)、GS-MSK-2 の深度 8.80～3.90 m、GS-MSK-3 の深度 11.8～3.9 m (Fig. 3)。

層相：黄灰色を呈し、火山灰質基質をもつ不淘汰な砂礫層からなる (Figs. 6-7, 6-8)。砂礫は多くは径 20 mm 以下の、黄橙色あるいは黄白色の軽石、灰色から暗褐色のスコリア・岩片粒子からなる。全体に風化による粘土化が著しく、現在は岩片も多くが粘土化し、スクレーパーで簡単に削れるほど軟らかくなっている。ふるいをういた粒度分析では泥サイズ

粒子が約 75% をも占めるが、これは粘土化した結果であり、もともとは砂礫サイズ粒子を多く含む堆積物である。

GS-MSK-1 別孔 (GS-MSK-4 コア) の観察に基づけば、本堆積物は、全体で 10～50 cm 程度の厚さの、火山灰質砂質泥基質を持つ不淘汰な礫層と水平層理の発達する火山灰質泥質砂層からなるサイクル (Fig. 7) の繰り返しである。このうち礫層は径 2～30 mm 程度の礫からなり、礫支持であるが極めて分級が悪く、礫間は火山灰質砂質泥で埋められている。礫層の基底部は逆級化を示すことが多い。しかしこの逆級化部にも径 10～40 mm 程度の軽石塊が散在することがある。基底部で逆級化した礫層は中部で最も粗粒となり、上部では正級化する。礫層中に層理はみられない。礫層の上位には、水平層理の発達する礫泥じりの火山灰質泥質砂層が重なる。水平層理は砂が多い部分と泥が多い部分の細かな互層により形成されているが、全体としてこの泥質砂層の粒度は下位の礫層から連続的に上方に細粒化する。また泥質砂層の最上部にはリップルが観察されることがある。その上位はさらに細粒化して砂質泥層となるが、その直上には次のサイクルの不淘汰礫層が累重し、これを繰り返す。

本堆積物の最上部は土壌化により上方に漸移的に強く褐色

を帯びるようになる。褐色を帯びた層準には炭化した植物根跡もみられる。本堆積物の上位には明瞭な層相境界を介して後述のレス堆積物が累重する。

密度・含水率：GS-MSK-1 コアでの湿潤密度は $1.43\sim 1.65\text{ g/cm}^3$ 、平均 1.55 g/cm^3 、乾燥密度は $0.77\sim 1.10\text{ g/cm}^3$ 、平均 0.95 g/cm^3 である。下位の阿蘇-4 火砕流堆積物に比べて小さい値を示す(Fig. 5)。また含水率は $33\sim 47\%$ (平均 39%)で、コアの他の層準と比べて大きく、特に上部で大きい値を示す(Fig. 5)。

対比・解釈：本堆積物は、火山噴出物起源の不淘汰な再堆積粒子からなる。本堆積物のうち、不淘汰礫層はふつう塊状で、基底部に逆級化がみられ、上部では正級化する。これは土石流堆積物(debris flow deposits)にみられる特徴(Smith, 1986; Smith and Lowe, 1991)である。また礫層の上位に重なる泥質砂層は上方に細粒化し、水平層理が発達する。これは高密度流堆積物(hyperconcentrated flood flow deposits)の典型的な特徴(Smith, 1986; Smith and Lowe, 1991)である。本堆積物ではこのような不淘汰礫層と泥質砂層がセットで確認されることから、土石流から高密度流への移行が推定される。このような流動機構の移行は流下する過程で生じ(Pierson and Scott, 1985)、堆積物としては土石流堆積物の上位に高密度流堆積物が覆うことが多く報告されている(Kataoka and Nakajo, 2004; 山元・川辺, 2014)。泥質砂層の最上部にみられるリップルは、さらに通常の掃流に移行したことを示している可能性がある。本堆積物の最上部は土壌化し、さらに後述のレス堆積物が明瞭な層相境界をもって累重することから、本堆積物は一連の堆積後にしばらく陸上露出し、上部は一部削剥された可能性が高い。

5. 土壌層(レス堆積物)

分布深度：GS-MSK-1 の深度 $2.56\sim 1.30\text{ m}$ (Fig. 5)、GS-MSK-2 の深度 $3.90\sim 3.40\text{ m}$ 、GS-MSK-3 の深度 $3.90\sim 1.80\text{ m}$ (Fig. 3)。

層相：軟質な褐色の火山灰質土壌からなる(Fig. 6-9)。10 mm 以下の礫がまれに含まれる。GS-MSK-1 コアでは、本堆積物の上部に植物根跡あるいは生物の巣穴と思われる空洞に上位の盛土起源の砂が充填されているのが観察された。

密度・含水率：GS-MSK-1 コアでの湿潤密度は $1.41\sim 1.60\text{ g/cm}^3$ で平均 1.51 g/cm^3 、乾燥密度は $0.77\sim 1.15\text{ g/cm}^3$ で平均 0.96 g/cm^3 (Fig. 5)。また含水率は $27\sim 45\%$ で、平均 37% である(Fig. 5)。

孔内水位

各ボーリング孔では掘削工程で孔内水位を計測した。孔内水位は最も孔口の標高が高い GS-MSK-3 で深度 3.97 m (標高 $+15.19\text{ m}$; 深度 29.5 m まで掘削後に測定) $\sim 5.14\text{ m}$ (標高 $+14.02\text{ m}$; 深度 55.40 m まで掘削後に測定)、中間の GS-MSK-1 で深度 1.58 m (標高 $+15.87\text{ m}$; 深度 7.0 m まで掘削後に測定) $\sim 3.20\text{ m}$ (標高 $+14.25\text{ m}$; 深度 51.0 m まで掘削後に測定)、最も孔口標高が低い GS-MSK-2 で深度 0.50 m (標高 $+9.82\text{ m}$; 深度 5.5 m まで掘削後に測定)であ

る(Figs. 3, 5)。2 回以上測定している GS-MSK-1 と GS-MSK-3 では、掘削初期と最終期の孔内水位の差は 1 m 程度である。全体として孔口標高が大きい GS-MSK-1 や GS-MSK-3 で孔内水位は深く、孔口標高が最も小さい GS-MSK-2 で孔内水位は最も浅い。

考 察

益城町市街地のボーリングデータに基づけば、工学的基盤の目安となる N 値 50 あるいは S 波速度 400 m/s を確実に上回るのは、阿蘇-3 火砕流堆積物、または阿蘇-4/3 間堆積物下部の砂礫層である(Figs. 3, 8)。この上位には阿蘇-4 火砕流堆積物、ラハール堆積物が分布する。本章では、工学的基盤の上位に累重する火山性堆積物の分布形態が、被害甚大地域とそれ以外の地域でどのように異なるかを、筆者らのボーリング調査結果と既公開のボーリングデータを併用して考察する。

1. 火山性堆積物の分布形態

全国地質調査業協会連合会は熊本地震後に過去に実施されたボーリング調査のデータを緊急公開した(URL1)。また最近、益城町辻の城の防災科学技術研究所強震動観測網 KiK-net 益城観測点ではボーリング再調査が行われ、以前の KiK-net 益城孔のデータ(URL2)に比べ、より詳細な層相・PS 検層データが公表された(新井・柏, 2017)。これらにより公開された近傍の3地点のボーリング柱状図データと筆者らのボーリング調査結果の対比を行い、益城町市街地付近の地下の地層の分布形態を考察する(Fig. 8)。

公開されているボーリングデータの層相記載は土木工学的な観点から行われたものであるが、概ね筆者らのボーリング試料の層序区分と対比可能である(Fig. 8)。例えば阿蘇-4 火砕流堆積物は既存のボーリングデータでも「礫混じり砂(火山砂および軽石からなる)」あるいは「軽石混じり凝灰質砂」として記載されており、これらが筆者らの阿蘇-4 火砕流堆積物のユニット 3、あるいはユニット 3 とユニット 2 が癒着したものであることがわかる。また、その上位には「砂質シルト(火山礫や風化軽石を含む)」あるいは「礫混じり凝灰質シルト」が記載されており、これが筆者らの粘土化したラハール堆積物に相当すると考えられる。一方、阿蘇-4 火砕流堆積物の下位に記載される「砂質粘土・砂質シルト」は阿蘇-4/3 間堆積物、「礫混じり砂・砂礫(火山礫・スコリア主体)」は阿蘇-3 火砕流堆積物であると考えられる。

今回のボーリング調査結果および既存ボーリングデータに基づけば、阿蘇-4 火砕流堆積物の基底は、台地平坦面付近から今回のボーリング調査地域にかけて、すなわち台地縁辺斜面の傾斜方向に北から南へ、低くなることがわかる(Fig. 8)。最も北に位置する辻の城 KMMH16-BRI では阿蘇-4 火砕流堆積物の基底標高が 20 m 付近であるのに対し、最も南の GS-MSK-2 では標高 -38 m 付近まで低下している。また阿蘇-4 火砕流堆積物の全体の層厚も、基底標高の低下とともに、北から南へ層厚 $15\sim 25\text{ m}$ から 40 m 以上へと大きくなる。

本研究の阿蘇-4 火砕流堆積物基底のユニット 1 に相当す

Fig. 8. Borehole logs showing the distribution of volcanogenic sediments beneath downtown Mashiki. JGCA-numbered logs are from the geoinformation website of Japan Geotechnical Consultants Association (URL1), and KMMH16-BRI is from Arai and Kashiwa (2017).

る、異質岩片が卓越するユニットは、阿蘇-4 火砕流堆積物の基底面が低くなっている部分にのみ認められる (Fig. 8)。また、阿蘇-4 火砕流堆積物全体としても、南側ほど層厚が大きいことから (Fig. 8)、火砕流は当時の地形的低まりを埋めて南側で厚く堆積したことが示唆される。同様に阿蘇-4/3 間堆積物の砂礫層も GS-MSK-3 では認められず、GS-MSK-2 でのみ認められることから調査地域の南部で谷地形を埋めるように形成されたと考えられる。一方、阿蘇-4 火砕流堆積物の上位のラハール堆積物は、層厚 5~10 m で、おそらく上部が多少侵食されたことにより、台地縁辺斜面下半部、すなわち南側で若干薄くなるが、大きな層厚の変化はなく、地表面の傾斜とほぼ平行に、南に分布高度が低くなる (Fig. 8)。

以上のように、調査地域の南部は定常的に地形的な低まりが形成されやすい地域であると考えられる。このような地形的低まりが形成される要因として、台地縁辺斜面の傾斜方

向、すなわち南側が低下する継続的な構造運動が考えられる。これを示唆する地質構造については、渡辺・小野 (1969) や長谷ほか (2016) が指摘している。渡辺・小野 (1969) は、阿蘇-4/3 間噴出物である高遊原溶岩 (大峰火山; Fig. 1A) の上面の傾きから、布田川断層の北側が南東に傾動したと考えた。また、長谷ほか (2016) は、阿蘇-2 火砕流堆積物の下位とされる砥川溶岩の上面標高が、益城町市街地付近の台地面から低地にかけて、すなわち北から南へ、-22 m から -103 m へと大きく低下することを示した。本研究の結果はこれらと調和的である。このような地質構造は、低地の北縁に推定されていた木山断層あるいはそれに沿って生じた地表地震断層に相当する構造運動に起因することが考えられる。ただし、今回のボーリング調査の結果からは詳細な断層位置の特定は難しく、これを明らかにするには稠密な物理探査等の実施が望まれる。いずれにせよ、阿蘇-4 火砕流堆積物は、おそらくこのような構造運動を反映して、台地平坦面

付近や台地縁辺斜面上半部に比べ、被害が甚大であった台地縁辺斜面下半部で層厚が大きいことが明らかになった(Fig. 8).

2. ラハール堆積物と地下水面

調査地域には、表層付近に、風化により粘土化し極めて軟質となったラハール堆積物が分布する。しかし、このラハール堆積物は、前述のように被害甚大地域に相当する台地縁辺斜面下半部(今回のボーリング調査地域)のみならず、斜面上部から台地平坦面付近においても認められ、層厚はむしろ台地平坦面付近のほうが幾分大きい(Fig. 8).

ここで調査地域の地下水面に注目する。ボーリング調査の際に計測される孔内水位は掘進過程で変化し、厳密にはその地点の自然の地下水位を示さないが、掘削初期に計測された初期孔内水位は自然の地下水位(平均地下水位)に比較的近いとされる(國分・石原, 2013)。また、今回のボーリング孔では複数回水位が測定された地点で掘削初期と最終期の水位差は1 m程度である。したがって、この地域では今回の掘削深度である深度60 m程度までなら単一の測定値でも地下水面が1 m程度の誤差でどの位置にあるかの推定は可能と考えられる。これに基づけば、台地平坦面付近(Fig. 8; JGCA番号の2地点)では孔内水位は標高+16~+17 m付近にあり、表層のラハール堆積物は地下水面よりも上位に位置する。一方、被害甚大地域に相当する今回の3点(GS-MSK-1~3)のボーリング調査地域では孔内水位は標高+9.82~+15.87 mにあり、ラハール堆積物は地下水面よりも下位に位置することになる。つまりラハール堆積物は被害甚大地域の地下では地下水で飽和されている状態にあると考えられる。同じラハール堆積物でも、被害が甚大であった台地縁辺斜面下部とそれより標高が高い箇所では含水率が異なり、それに起因して風化の程度および土質特性も大きく異なることが予想される。実際に台地平坦面に近い益城町辻の城(KMMH16-BRI)ではラハール堆積物に相当すると考えられる凝灰質シルトのS波速度がおおよそ120~170 m/s(新井・柏, 2017)であるのに対し、被害が甚大であった台地縁辺斜面下部のGS-MSK-1では65~100 m/s(吉見ほか, 2017)である(Figs. 5, 8)。ラハール堆積物の分布高度が南側に低下する。この特徴的な分布形態と地下水面との位置関係が、被害の地域差を生じさせた可能性がある。

ま と め

2016年熊本地震で甚大な建物被害が生じた益城町市街地付近の地下の地質層序および地層の分布形態を知るために、被害甚大地域に相当する台地縁辺斜面下半部のボーリング試料の検討を行った。その結果、調査地域の深度約60 mまでの地層は、下位より、阿蘇-3火砕流堆積物、阿蘇-4/3間堆積物、阿蘇-4火砕流堆積物、ラハール堆積物、土壌層(レス堆積物)からなることが明らかとなった。このうち阿蘇-4火砕流堆積物は、下部に異質岩片を多く含むグラウンドレイヤーを伴うが、主体は軽石質の火山砂からなる。既存ボーリングデータも含めて台地平坦面付近から縁辺斜面下部にかけての地層の分布形態を検討したところ、阿蘇-4火砕流堆積

物は益城町市街地が位置する台地縁辺斜面では斜面傾斜方向に基底高度を下げるとともに、全体の層厚も顕著に大きくなることが明らかになった。また、阿蘇-4火砕流堆積物の上位のラハール堆積物は風化により全体が粘土化し、含水率が高く、軟質であることを特徴とする。このラハール堆積物は、台地平坦面付近から縁辺斜面下半部まで広く分布するが、台地平坦面付近では地下水面の上位に位置する一方で、斜面下半部では地下水面の下に位置する。つまり、被害が大きかった台地縁辺斜面下半部は、他に比べて阿蘇-4火砕流堆積物が厚いこと、そして表層に、地下水で飽和し、粘土化したラハール堆積物が分布することが特徴であるといえる。

謝 辞

本研究を実施するにあたって、産業技術総合研究所の長郁夫氏には益城町地下のS波速度構造について常日頃より議論をしていただいた。建築研究所の新井 洋氏からは益城町辻の城のボーリング調査結果についてご教示いただいた。担当編集委員の奥野充氏、査読者の長谷義隆氏、井村隆介氏からはたいへん有益なご意見を頂き、原稿が改善された。現地のボーリング工事は中央開発株式会社によって行われた。以上の方々に深く感謝いたします。

文 献

- 新井 洋・柏 尚稔(Arai, H. and Kashiwa, H.), 2017, KiK-net 益城の地盤ボーリング調査と微動アレイ探査(Geotechnical boring and microtremor array surveys at KiK-net Mashiki strong motion station). 2017年度日本建築学会大会(中国)学術講演会梗概集(Summ. Tech. Pap. Annu. Meet. Architect. Inst. Japan), 21127.
- 古澤 明(Furusawa, A.), 1995, 火山ガラスの屈折率測定および形態分類とその統計的な解析に基づくテフラの識別(Identification of tephra based on statistical analysis of refractive index and morphological classification of volcanic glass shards). 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan.), 101, 123-133.
- 長谷義隆・中山 洋・古澤 二・荒牧昭二郎(Hase, Y., Nakayama, H., Hurusawa, W. and Aramaki, S.), 2016, 熊本平野南部、沖積層下に認められる砥川溶岩の変位(Displacement of sub-alluvial Togawa Lava in the southern Kumamoto Plain). 御所浦白亜紀資料館報(Bull. Goshoura Cret. Mus.), 17, 5-13.
- 星住英夫・小野晃司・三村弘二・野田徹郎(Hoshizumi, H., Ono, K., Mimura, K. and Noda, T.), 1988, 別府地域の地質。地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)(Geology of the Beppu District, Quadrangle Series, Scale 1: 50,000), 地質調査所(Geol. Surv. Japan), 131p.
- 星住英夫・尾崎正紀・宮崎一博・松浦浩久・利光誠一・宇都浩三……須藤定久(Hoshizumi, H., Ozaki, M., Miyazaki, K., Matsumura, H., Toshimitsu, S., Uto K., Uchiyumi, S., Komazawa, M., Sudo, S.), 2004, 20万分の1地質図幅「熊本」(Geological Map of Japan 1: 200,000, Kumamoto). 産総研地質調査総合センター(Geol. Surv. Japan, AIST).
- 石坂信也・岩崎泰顕・長谷義隆・渡辺一徳・岩内明子・田尻雅則(Ishizaka, S., Iwasaki, Y., Hase, Y., Watanabe, K., Iwauchi, A. and Taziri, M.), 1995, 熊本平野地下に分布する最終間氷期の堆積物と平野の沈降速度(Subsidence rate and sediments of the Last Interglacial Epoch in the Kumamoto Plain, Japan). 第四紀研究(Quatern. Res. (Daiyonki-Kenkyu)), 34, 335-344.
- Kataoka, K. and Nakajo, T., 2004, Flow transformation and depositional organization of debris flow-hyperconcentrated flow-streamflow spectrum in volcanic fan-delta setting: The

- Pleistocene lower and middle formations, Yachiho Group, central Japan. *Jour. Sediment. Soc. Japan*, **59**, 17–26.
- 國分邦紀・石原成幸(Kokubun, K. and Ishihara, S.), 2013, 地盤情報データを用いた孔内水位と地層厚分布について(For ground-water level and thickness of strata distributions by the boring data base in Tokyo). 平成25年度東京都土木技術支援・人材育成センター年報(*Annu. Rep. C.E.S.T.C., TMG 2013*), 167–172.
- 国土技術政策総合研究所・建築研究所(National Institute for Land and Infrastructure Management and Building Research Institute), 2016, 平成28年熊本地震建築物被害調査報告(速報)(Quick Report of the Field Survey on the Building Damage by the 2016 Kumamoto Earthquake). 国土技術政策総合研究所資料(*Tech. Note Nat. Inst. Land Infra. Manage.*), **929**; 建築研究資料(*Building Res. Data*), **173**, 372p.
- 熊本県地質調査業協会地盤図編纂委員会(Editorial Committee of the Geotechnical Map, Geotechnical Consultant Association of Kumamoto Prefecture), 2003, 熊本市周辺地盤図(*Geotechnical Map Around Kumamoto City*). 熊本県地質調査業協会(Geotechnical Consultant Association of Kumamoto Prefecture), 270p.
- 九州活構造研究会(Research Group for Active Tectonics in Kyushu), 1989, 九州の活構造(*Active Tectonics in Kyushu*). 東京大学出版会(Univ. Tokyo Press), 553p.
- 町田 洋・新井房夫(Machida, H. and Arai, F.), 2003, 新編 火山灰アトラスー日本列島とその周辺(*Atlas of Tephra in and around Japan*). 東京大学出版会(Univ. Tokyo Press), 336p.
- 松本哲一・宇都浩三・小野晃司・渡辺一徳(Matsumoto, A., Uto, K., Ono, K. and Watanabe, K.), 1991, 阿蘇火山岩類のK-Ar年代測定ー火山層序との整合性と火砕流試料への適応ー(K-Ar age determinations for Aso volcanic rocks: concordance with volcanostratigraphy and application to pyroclastic flows). 日本火山学会講演1991年予稿集(*Progr. Abstr. Volcanol. Soc. Japan*), **2**, 73.
- 中澤 努・ト部厚志・佐藤善輝(Nakazawa, T., Urabe, A. and Sato, Y.), 2016, 2016年熊本地震による益城町市街地での家屋被害の分布と地形・地質特性(Distribution patterns of house damages in the central part of Mashiki Town caused by the 2016 Kumamoto Earthquake: Geological and geomorphological implications). 日本地球惑星科学連合2016年大会予稿(*Abstr. JpGU Meet. 2016*), MIS34–P83.
- 小野晃司・松本徳夫・宮久三千年・寺岡易司・神戸信和(Ono, K., Matsumoto, Y., Miyahisa, M., Teraoka, Y. and Kambe, N.), 1977, 竹田地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1図幅)(*Geology of the Taketa District, Quadrangle Series, Scale 1: 50,000*), 地質調査所(Geol. Surv. Japan), 145p.
- Pierson, T. C. and Scott, K. M., 1985, Downstream dilution of a lahar: Transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Resour. Res.*, **21**, 1511–1524.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター(Geological Survey of Japan, AIST), 2015, 20万分の1日本シームレス地質図2015年5月29日版(*Seamless Digital Geological Map of Japan 1: 200,000, May 29, 2015 version*). 産業技術総合研究所地質調査総合センター(Geol. Surv. Japan, AIST).
- 新垣芳一・吉見雅行・後藤浩之・栗田哲史・佐藤恭兵・細矢卓志……森田祥子(Shingaki, Y., Yoshimi, M., Goto, H., Kurita, T., Sato, K., Hosoya, T.,...Morita, S.), 2017, 益城町の2016年熊本地震被害集中域の表層に分布する凝灰質土の物理特性・動的変形特性(Physical and dynamic properties of the volcanic ash soil in the heavily damaged site of the 2016 Kumamoto Earthquake, Mashiki Town). 土木学会論文集A1(構造・地震工学)(*Jour. Japan Soc. Civil Eng., Ser. A1, Struct. Eng. Earthq. Eng.*), **73**, 552–559.
- Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y., Maruyama, T., Azuma, T., Miyashita, Y.,...Miyakawa, A., 2016, Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan. *Earth Planets Space*, **68**, 191.
- 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, Lahar: Volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow-hyperconcentrated flow continuum. *SEPM Spec. Publ.*, **45**, 59–70.
- Suzuki-Kamata, K. and Kamata, H., 1990, The proximal facies of the Tosu pyroclastic-flow deposit erupted from Aso caldera, Japan. *Bull. Volcanol.*, **52**, 325–333.
- 田村 実・渡辺一徳・谷村洋征(Tamura, M., Watanabe, K. and Tanimura, H.), 1983, 御船(5万分の1表層地質図)(*Subsurface Geological Map, Mifune*). 熊本県(Kumamoto Pref.).
- 友澤裕介・元木健太郎・加藤研一・引田智樹・石木健士朗(Tomoza-wa, Y., Motoki, K., Kato, K., Hikita, T. and Ishiki, K.), 2017, 平成28年(2016年)熊本地震における墓石転倒率と木造家屋被害調査ー断層極近傍と益城町宮園周辺の比較検討ー(Investigation of tombstones fall-down rates and damages of wooden houses due to the 2016 Kumamoto Earthquake: Comparative examination of near-fault region and Mashiki-machi Miyazono). 日本地震工学会論文集(*Jour. Japan Assoc. Earthq. Eng.*), **17**, 62–80.
- Walker, G. P. L., Self, S. and Froggatt, P. C., 1981, The ground layer of the Taupo ignimbrite: a striking example of sedimentation from a pyroclastic flow. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **10**, 1–11.
- Watanabe, K., 1978, Studies on the Aso pyroclastic flow deposits in the region to the west of Aso caldera, southwest Japan, I: Geology. *Mem. Fac. Edu. Kumamoto Univ., Nat. Sci.*, **27**, 97–120.
- 渡辺一徳・小野晃司(Watanabe, K. and Ono, K.), 1969, 阿蘇カルデラ西側, 大峰付近の地質(Geology of the vicinity of Omine on the western flank of the Aso caldera). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **75**, 365–374.
- 山元孝広・川辺禎久(Yamamoto, T. and Kawanabe, Y.), 2014, 伊豆大島2013年ラハールの堆積学的特徴: ラハール堆積物の粒度組成による分類(Sedimentary characteristics of the Izu-Oshima 2013 lahar: Classification of various lahar deposits based on grain-size distribution). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **120**, 233–245.
- 吉見雅行・後藤浩之・秦 吉弥・吉田 望(Yoshimi, M., Goto, H., Hata, Y. and Yoshida, N.), 2017, 益城町市街地の2016年熊本地震被害集中域における非線形地盤応答特性(Nonlinear site response at the worst-hit area of the 2016 Kumamoto earthquakes in the Mashiki Town, Kumamoto, Japan). 平成28年度京都大学防災研究所研究発表講演会資料(*Doc. DPRI Annu. Meet. 2017*), A05.
- [URL1] <http://geonews.zenchiren.or.jp/2016KumamotoEQ/index.html>, 2017. 6.8 閲覧
- [URL2] <http://www.geo-stn.bosai.go.jp/jps/index.html>, 2017.6.8 閲覧

(著者の貢献)

- 中澤 努 コア観察, 密度・含水率測定, 粒度分析, 層序の考察, 全体の調整, 編集委員会との対応を担当.
- 坂田健太郎 火山灰分析, 密度・含水率・色調測定, 粒度分析を担当.
- 佐藤善輝 コア観察, 軟X線撮影, 層序の考察を担当.
- 星住英夫 コア観察, 層序の考察を担当.
- ト部厚志 コア観察, 層序の考察を担当.
- 吉見雅行 ボーリング調査の立案・指揮を担当.

(要 旨)

中澤 努・坂田健太郎・佐藤善輝・星住英夫・ト部厚志・吉見雅行, 2018, 2016 年熊本地震で甚大な被害を受けた益城町市街地の地下を構成する火山性堆積物の層序と分布形態. 地質雑, **124**, 347–359. (Nakazawa, T., Sakata, K., Sato, Y., Hoshizumi, H., Urabe, A. and Yoshimi, M., 2018, Stratigraphy and distribution pattern of volcanogenic sediments beneath downtown Mashiki, Kumamoto, SW Japan, seriously damaged by the 2016 Kumamoto Earthquake. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **124**, 347–359.)

2016 年熊本地震で甚大な建物被害が生じた益城町市街地付近の地下の地質層序, 地層の分布形態を知るために, 掘削調査で得られたコア試料等にみられる火山性堆積物の層相および層序を検討した. その結果, 被害が大きかった台地縁辺斜面下半部の地下には, 他地域に比べて阿蘇-4 火砕流堆積物が厚く分布すること, そして表層には, 地下水で飽和し, 粘土化したラハール堆積物が分布することが明らかになった.

科学論文では, 学説の検証可能性を保証することが重要です. そのため, 地質学雑誌掲載論文には, 重要な証拠となった試料がどこで得られたかを示しているものがあります. 言うまでもないことですが, 見学や採取を行う場合, 各自の責任において地権者や関係官庁への連絡と許可の取得の必要があることにご注意下さい. 詳しくは, 以下のサイトをご覧ください.

<http://www.geosociety.jp/publication/content0073.html>

一般社団法人日本地質学会