

# 阿蘇火砕流堆積物の岩石物性に関する予察的考察

## A Preliminary Report on Rock Properties of Aso Pyroclastic Flow Deposits

山口宏子\*・小口千明\*\*・西山賢一\*\*\*・松倉公憲\*\*

Hiroko YAMAGUCHI, Chiaki T. OGUCHI, Ken-ichi NISHIYAMA  
and Yukinori MATSUKURA

### I はじめに

大規模火砕流は、それ以前の谷地形を埋積し、広い平坦な地形(火砕流台地)を形成する。このような台地の侵食は、火砕流の堆積直後に活発であり、比較的短期間に現在のような地形の概観が出来上がると考えられている(横山, 1985; 1987; Yokoyama, 1999)。阿蘇火山周辺においても、火砕流台地が広く分布する。これらの台地は、過去約30万年前から4回の活動期に噴出した数多くの火砕流堆積物によって構成されている。それらは噴出した順にAso-1, Aso-2, Aso-3, Aso-4と呼ばれている。特にAso-4はAso-4A, Aso-4Bと大きく2層に分類されている。Aso-1, Aso-2, Aso-3は熔結部が主であるが、Aso-4Aは熔結部のAso-4wと非熔結部のAso-4Apに区別される。Aso-4Bは熔結部を主とする。

最近、尹(1999)は阿蘇カルデラの東部と南部の火砕流台地を開析する1次谷の地形計測から、熔結部からなる東部では、高い谷密度と短くて勾配の緩い谷が特徴であり、それに対し非熔結部からなる南部の台

地では、低い谷密度と長くて深い谷が多いことを示した。そして東部の谷の特徴は、熔結凝灰岩は緻密で硬く侵食されにくく、しかも透水性が低いことにより表面流出が起こりやすいことによってもたらされたものであること、南部の谷の特徴は、非熔結の堆積物は柔らかく侵食されやすく、しかも透水性が高いので表面流出が起こりにくいことによってもたらされると解釈した。しかし、硬さについてはシュミットロックハンマー反発値により実測した値で議論しているものの、透水性に関しては間隙率からの定性的な類推であるため議論の精度は低い。

そこで本稿では、上記の議論の精度を高めるために、火砕流堆積物の物性、とくに透水性に関して、より詳細に検討することを目的とした。

### II 阿蘇火砕流堆積物の諸物性の計測

#### 1) 物性計測および試料採取地点とその概要

火砕流堆積物の岩石学的記載は、小野(1965)、小野ほか(1977, 1985)や鎌田(1997)に詳しい。以下に、これらの報告を引用しつつ、試料採取地点の概

\* 第一学群・自然学類・学生(現在, 熊本大学大学院生) \*\* 地球科学系

\*\*\* 地球科学研究科・大学院生(現在, 京都大学防災研究所COE研究員)

要を述べる。

Aso-1火砕流は、阿蘇火山の最も初期(約26-28万年前:松本ほか, 1991)の噴出物であり、カルデラの東方および北方に分布する。岩層の特徴として基底部に薄い降下軽石層をもつが、その上に強く熔結した赤褐色-橙褐色の火砕流堆積物が載る。この熔結凝灰岩は径 5mm 以下の斜長石班晶を顕著に含む。Aso-1 ではこの熔結凝灰岩を対象に、カルデラ北方の南小国町・満願寺の満願寺川右岸の露頭において、岩盤強度と試料採取を行った。

約14万年前の噴出物と考えられるAso-2火砕流は、基底まで強く熔結したAso-2A火砕流堆積物、非熔結部を主とするAso-2B火砕流堆積物、Aso-2T降下スコリア層に細分される。Aso-2Aの熔結凝灰岩を対象にカルデラ北方の南小国町・矢ヶ部の志賀瀬川右岸の露頭において、岩盤強度と試料採取を行った。

Aso-3の噴出物は、下位からAso-3W降下軽石層、Aso-3A火砕流堆積物、Aso-3B火砕流堆積物、Aso-3C火砕流堆積物の4サブユニットから構成される。これらの噴出年代は約12万年前と考えられている。無班晶の安山岩質スコリア流であるAso-3Bが最も規模が大きく、波野・萩台地の南西部では強熔結しているが、東部では弱く熔結している。この弱熔結したAso-3Bを計測対象とした。計測および試料採取は、竹田市街地北西方の市用集落にある稲葉川左岸の道路沿いののり面で行った。

約9万年前の噴出物と考えられているAso-4火砕流堆積物は、Aso-4A火砕流堆積物とAso-4Bの二つのサブユニットに分けられる。Aso-4A火砕流堆積物は底部のごく薄い部分と上部を非熔結(Aso-4Apとする)が占め、下部は熔結部(Aso-4Awとする)が占める。非熔結部(Aso-4Ap)は灰白色または淡褐色の軽石流堆積物からなり、多量の軽石を含んでいる。一方、Aso-4Awは弱熔結部と強熔結部からなる。また、Aso-4B火砕流堆積物は中～北部九州全域と山口県に分布する(渡辺, 1986)。カルデラの東側では、波野・萩台地の上部をつくり、台地の周囲に絶壁を連ねて露出している。普通角閃石班晶を特徴的に含むデイサイト熔結凝灰岩であり、この台地における平均の厚さは20 m である。Aso-4については、As-4Aw, Aso-

4Ap, Aso-4B のすべてを計測対象とした。Aso-4Awは、萩町・新藤の北方の台地から滝水川へ下る谷壁斜面の露頭で計測と試料採取を行った。Aso-4Apに関しては、台地の北東縁の菅生から北東へ台地を下る志土知方面への新しい道路のカッティング面(「井手添」集落付近)で行った。Aso-4Bについては、玉来川上流の竹田市・久保・西園(菅生の北北西 2.5 km の位置)の集落がのる台地の南縁にある道路沿いの露頭で行った。

## 2) 計測項目と計測方法

野外の露頭で、岩盤強度としてのシュミットロックハンマー反発値を計測した。計測は、いわゆる「一点法(一箇所を15回たたき続け、最初の二、三回のデータを除去する)」で行なった。

露頭から採取した試料を用い、岩石の物理的指標として、かさ密度、自然含水比を計測した。かさ密度は、握りこぶし大の非整形試料を用い、砂置換法で求めた体積と、その乾燥重量とから求めた。また、水銀圧入法により、間隙径分布(PSD)を計測した。この計測の過程で、真比重と間隙率が算出される。

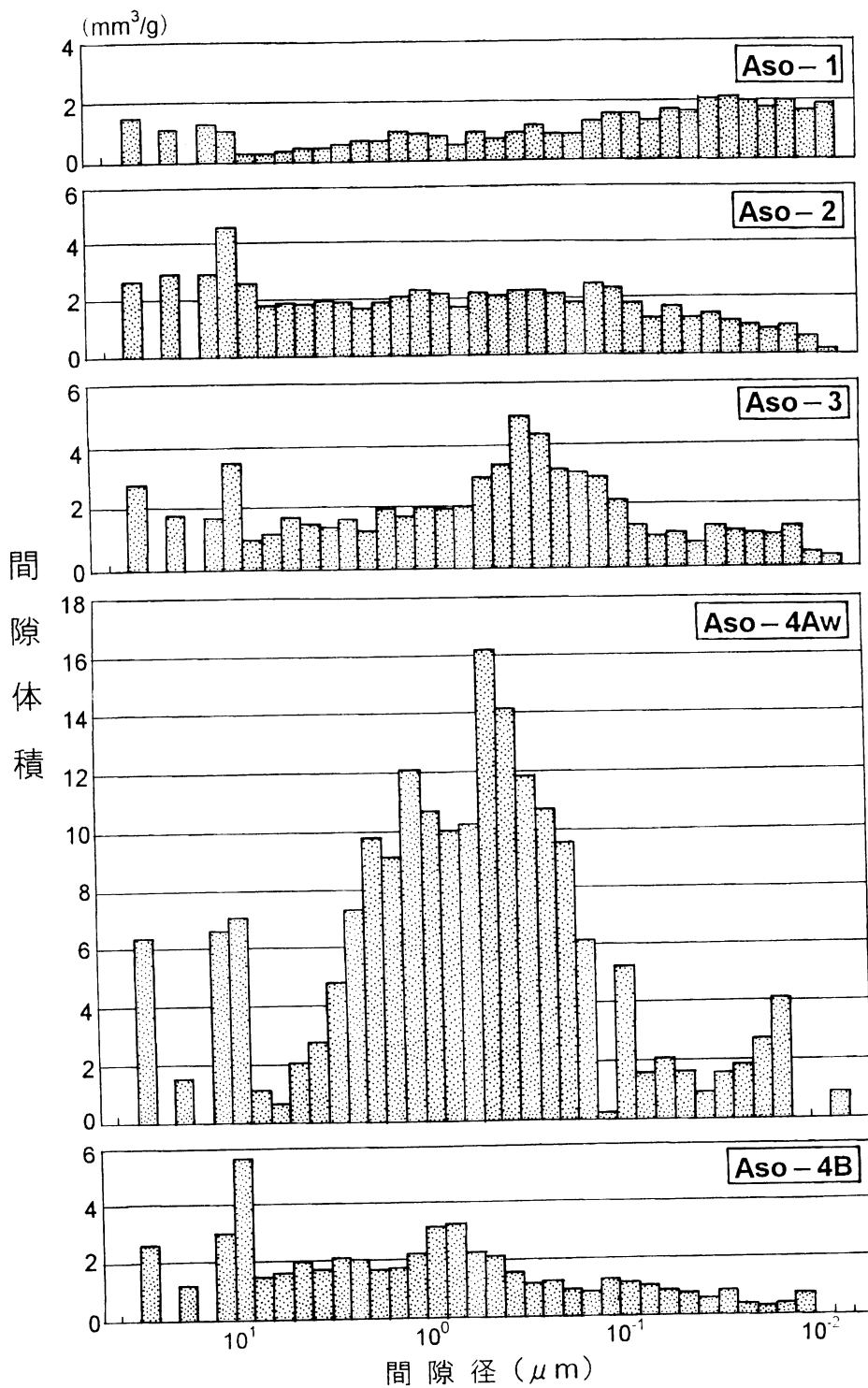
## 3) 計測結果

物理的指標とシュミットロックハンマー反発値の計測結果を第1表にまとめて示した。熔結凝灰岩の間隙率は 9 % ~ 15 % と小さく、非熔結のAso-4Ap のみが 76.7 % と極めて大きい。弱熔結のAso-3 が 30.2 % とそれらの中間的な値をとっている。また、熔結凝灰岩のシュミットロックハンマー反発値はいずれも大きな値をとる。中でもAso-1 が 56.7 % と最も大きく、Aso-4B も 47.5 % と比較的大きい。これに対し、非熔結のAso-4Ap が 22.5 % と最も小さい。弱熔結のAso-3 が 38.1 % とこれらの中間的な値をとっている。これらことから、間隙率、シュミットロックハンマー反発値ともに熔結の程度をよく反映していると考えられる。

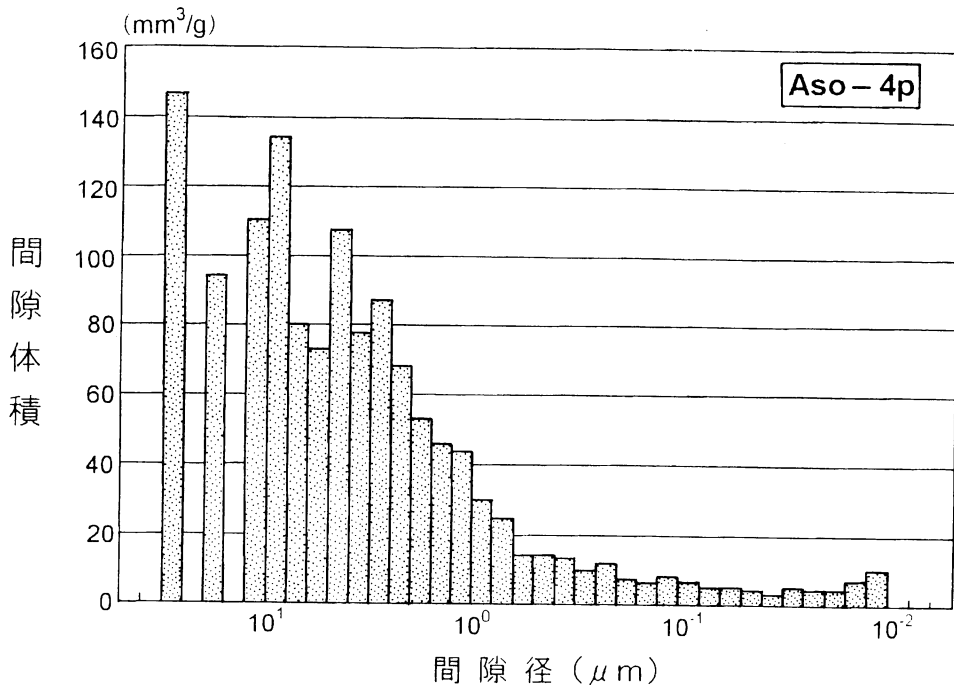
間隙径分布の計測結果を第1図および第2図に示した。熔結凝灰岩の間隙総容量はAso-1が最小で 39.2 mm<sup>3</sup>/g、最大でもAso-4Aw の 193.6 mm<sup>3</sup>/gと比較的小さいので、第1図にまとめた。しかし、非熔結のAso-4Apは間隙総容量が熔結凝灰岩と比べて数倍

第1表 阿蘇火砕流堆積物の物理的性質と強度(シュミットロックハンマー反発値)の測定値, および間隙径分布の計測結果から推定される透水係数

	Aso-1		Aso-2		Aso-3		Aso-4Aw		Aso-4Ap		Aso-4B	
	welded		welded		welded		welded		non-welded		welded	
かさ密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.29		2.23		1.98		1.57		0.58		2.11	
真比重(-)	2.50		2.61		2.28		2.24		2.50		2.36	
間隙率(%)	8.9		15.0		13.2		30.2		76.7		11.0	
自然含水比(%)	2.6		4.5		7.3		1.8		-		4.4	
シュミットロックハンマー反発値(%)	56.7		46.4		38.1		43.9		22.5		47.5	
透水係数 (m/sec)												
キヤリアーティブル	$2.39 \times 10^{-6}$		$5.19 \times 10^{-6}$		$3.48 \times 10^{-6}$		$6.72 \times 10^{-6}$		$6.14 \times 10^{-5}$		$4.30 \times 10^{-6}$	
Kozenyの動水半径ティブル	$4.58 \times 10^{-11}$		$7.27 \times 10^{-10}$		$5.76 \times 10^{-9}$		$3.81 \times 10^{-9}$		$6.85 \times 10^{-8}$		$2.19 \times 10^{-9}$	
Marshall確率論ティブル	$7.24 \times 10^{-9}$		$3.09 \times 10^{-8}$		$1.62 \times 10^{-8}$		$6.13 \times 10^{-8}$		$4.49 \times 10^{-6}$		$2.29 \times 10^{-8}$	



第1図 阿蘇火砕流堆積物(熔結凝灰岩)の間隙径分布



第2図 阿蘇火砕流堆積物(非熔結部)の間隙径分布

から数十倍も大きい  $1316.3 \text{ mm}^3/\text{g}$  となり、間隙径分布の結果を熔結凝灰岩のそれと同じスケールでは表現できないので、第2図として別に示した。熔結凝灰岩の結果を並べた第1図をみると、Aso-1, Aso-2, Aso-4B ともに  $10 \mu\text{m}$  から  $0.01 \mu\text{m}$  の間隙径がほぼ均一に分布している。これに対し、Aso-3 では間隙径  $10^{-0.5} \mu\text{m}$  のところにistogramのピークが見られ、この大きさの間隙が卓越していることを示している。Aso-4Aw では間隙径の集中がより顕著であり、 $1 \mu\text{m}$  程度の間隙径が卓越している。第2図に示したAso-4Ap の間隙径分布は、熔結凝灰岩に比較して、istogramのピークが大きな間隙側に寄っていることが読みとれる。特に  $10 \mu\text{m}$  ほどの大間隙の容量が多く、それに比較して  $1 \mu\text{m}$  以下の間隙は極めて少ない。

### III 透水係数の推定と若干の考察

#### 1) 透水係数の推定

林ほか(1999)は、間隙径分布のデータを用い、内

部空隙を円筒形もしくは平行板状の等価管路と仮定し、透水特性を評価する方法をレビューした。ここでは、それらの中から、円筒形と仮定した場合のキャピラリーモデル、Kozeny 動水半径モデル、Marshall 確率論モデルの3つのモデルに本研究で得られた間隙径分布のデータを適用し、各火砕流堆積物の透水係数を算出した。

結果を第1表に示した。それぞれのモデルで算出した透水係数は、キャピラリーモデルで  $10^{-8} \sim 10^{-11} \text{ m/s}$ 、Kozeny 動水半径モデルで  $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ m/s}$ 、Marshall 確率論モデルで  $10^{-6} \sim 10^{-9} \text{ m/s}$  となり、モデルにより値がかなり異なっている。しかし、いずれのモデルを適用しても、透水係数値の大きさの相対順位はほとんど変わらない。すなわちAso-1 の透水係数が最も小さく、Aso-4Ap のそれが最も大きい。

林ほか(1999)によれば、彼らの扱った白浜砂岩においては、Kozeny 動水半径モデルで算出した透水係数値がトランジェントパルス法で得られた実測値とよく一致しているという。一方、白川凝灰岩の場合には、Marshall 確率論モデルによる推定値が実測値と最も

よく一致するという結果になっており、岩質による適合性の差異が認められる。本稿で扱った熔結凝灰岩やシラスのようなもので、どのモデルが最も適合性が高いかは不明であり、今後の課題である。

ところで、尹(1999)は空隙率の小さいAso-4Bは、透水性が低く、空隙率の大きいAso-4Aの非熔結部は透水係数が高いと予測している。そこで、得られた間隙率と透水係数との関係をみた。その結果、いずれのモデルで計算された透水係数の値を用いても、間隙率が大きい物質が高い透水性をもつという大まかな関係は認められるものの、その相関は弱い。

## 2) 岩石物性と地形との関係

著者の一人山口(2000)は、上記のようにして得られた物性結果を用いて、主に非熔結部のAso-4Apの分布するカルデラ北部と、主に熔結凝灰岩のAso-4Bから成る東部の地形について、岩石物性との関係を以下のようにまとめた。

- (1)熔結凝灰岩からなる東部(波野・萩台地)は、平坦な火砕流台地が残存し、それを開析する谷は幅の狭い峡谷状となっている。開析谷の谷長は、北部と比較して長く、流域の谷密度は高い。
- (2)これに対し、非熔結物質からなる北部(カルデラ壁から南小国町にかけての地域)は、波状の丘陵状地形となっている。開析谷の谷長は短く、谷密度が低く、開析谷壁が緩傾斜な幅広い谷となる。

これらの地形的特徴の形成には、それぞれの地域を構成する物質の強度と透水性が深く関与しているであろう。このことは阿蘇カルデラの東部と南部の地形を比較した尹(1999)によってすでに指摘されており、丘陵の削剥に関して一般的には Suzuki et al. (1985)により詳細に議論されている。しかし、これらは物性と地形との対応関係を指摘してはいるものの、その間を繋ぐ地形変化プロセスに関する議論に乏しい。

そのことと関連して言えば、波野・萩台地の北東縁を竹田市に向かって東流する玉来川は丘陵状地形をなす熔結凝灰岩のAso-3を開析しているが、この地域には崩壊地形が散見された。崩壊地の斜面勾配は40度ほどであり、この地域の地形変化の主要プロセスと考えられる。また、玉来川の最上流部付近の

谷はAso-4Bの下層のAso-4Ap, Aso-4Awまで比高100 mほどの深い開析谷となっている。その谷壁は上部のAso-4B(厚さ30 m)が垂直な壁なのに対し、Aso-4Ap(厚さ30 m)の部分は勾配30度ほどの緩斜面をなし、この層準で、崩壊跡地が幾つか観察された。その中の一つの崩壊跡地の斜面勾配を計測したところ約28度であった。最下部のAso-4Aw(厚さは約20 m)は平均勾配70度ほどの凸型斜面になしている。このような開析谷の谷壁斜面の勾配は、基本的には岩石強度の大きい物質が急勾配となり、強度が小さいほど緩勾配になる、という関係が認められるが、この問題も、物性と地形とを繋ぐ地形形成プロセスとの関連で詳しく議論されなければならないであろう。いずれにしてもこれらの議論はデータ数が少なく仮説の域を出ない。今後、より詳細な調査が必要であろう。

## 謝辞

間隙径分布の計測は、地質調査所の所有のCARLOELBA社製 Porosimeter 2000によるものである。快く使用を認めていただいた同所の高橋 学主任研究官、ならびに測定にご協力いただいたダイヤコンサルタント(株)の林 為人氏(研究員)に記して感謝申し上げます。

## 文献

- 小野晃司(1965):阿蘇カルデラ東部の地質。地質学雑誌, 71, 541-553.
- 小野晃司・松本 夫・宮久三千年・寺岡易司・神戸信和(1977):「竹田地域の地質」, 地域地質研究報告(5万分の1図幅)。地質調査所, 145p.
- 小野晃司・渡辺一徳(1985):阿蘇火山地質図。地質調査所。
- 鎌田浩毅(1977):「宮原地域の地質」, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)。地質調査所, 127p.
- 林 為人・高橋 学・西田 薫・張 銘(1999):透水挙動に関する等価管路モデルおよび堆積岩への適用例。応用地質, 39, 553-559.

- 松本哲一・宇都浩三・小野晃司・渡辺一徳(1991)阿蘇火山岩類のK-Ar年代測定:火山層序との整合性と火砕流試料への適応, 火山学会予稿集, 73p.
- 山口宏子(2000):阿蘇カルデラ外斜面の台地の開析過程. 筑波大学第一学群自然科学類卒業論文, 88p.
- 尹 泰恩(1999):阿蘇カルデラ外輪斜面における侵食谷の形状特性に関する研究:Aso-4火砕流堆積物の溶結有無による谷地形を中心として. 熊本大学大学院文学研究科地域学専攻修士論文, 62p.
- 横山勝三(1985):大規模火砕流堆積物の地形. 地形, 6, 131-153.
- 横山勝三(1987):九州における大規模火砕流の噴火とその堆積物. 地形, 8, 249-267.
- 渡辺一徳(1986)阿蘇カルデラ起源, 鳥栖オレンジ軽石流の流動・堆積機構, 文部省科学研究費自然災害特別研究, 計画研究「火山噴火に伴う乾燥粉流体(火砕流等)の特質と災害」(代表者 荒巻重夫)報告書, 115-128.
- Suzuki, T., Tokunaga, E., Noda, H. and Arakawa, H. (1985) : Effect of rock strength and permeability on hill morphology. *Trans. Japan. Geomorph. Union*, 6, 101-130.
- Yokoyama, S. (1999) : Rapid formation of river terraces in non-welded ignimbrite along the Hishida River, Kyushu, Japan. *Geomorphology*, 30, 291-304.