

阿蘇火山における更新世末期, AT火山灰以降のテフラ層序

宮縁育夫*・星住英夫**・渡辺一徳***

(2003年7月2日受付, 2004年1月7日受理)

Late-Pleistocene Tephrostratigraphy of Aso Volcano,
Southwestern Japan, after Deposition of AT Ash

Yasuo MIYABUCHI*, Hideo HOSHIZUMI** and Kazunori WATANABE***

The stratigraphy and chronology of late-Pleistocene (after deposition of AT ash) tephra layers erupted from post-caldera central cones of Aso Volcano, SW Japan, are evaluated through study of the thick tephra sequence preserved mainly atop the pyroclastic-flow plateau east of the caldera. Twenty andesite to basaltic-andesite scoria-fall deposits (YmS20-YmS1 in ascending order) and two pumice-fall deposits (NbP2 and NbP1) were identified as marker beds for the interval ca. 29-13 ka (calibrated ^{14}C age). The tephra layers were produced mostly by scoria and ash eruptions of Nakadake, the only active post-caldera central cone, and their bulk volumes calculated from isopach maps range from 0.01 to 0.9 km³. The radiocarbon ages of buried soils just below individual tephra layers reveal that YmS20 to YmS15 were erupted at ca. 22-21 ka and YmS10 to YmS1 at ca. 18-16 ka. Total tephra volume during 29-13 ka is estimated at about 1.3 km³ (DRE). Production of tephra was mainly concentrated in two periods: 22-21 ka (0.8 km³) and 18-16 ka (0.5 km³).

Key words: Aso Volcano, post-caldera central cones, scoria-fall deposit, tephrostratigraphy, eruptive history

1. はじめに

阿蘇火山は、南北約 25 km, 東西約 18 km のカルデラを有する火山である。カルデラ内に存在する阿蘇中央火口丘群は、現在も活動中の中岳をはじめとする 17 座以上の火山の複合体である。この中央火口丘群は、約 9 万年前の Aso-4 火砕流噴出直後に活動を開始し (小野・渡辺, 1983), 溶岩流や火砕岩からなる山体を形成するとともに、膨大な量の降下テフラを周辺地域に堆積させた。

阿蘇中央火口丘群のテフラ層序については、これまで高田 (1989), 早川・井村 (1991), 山田・久保寺 (1996), 宮縁・渡辺 (1997), 馬場・他 (1999) などの研究があり、最近では宮縁・他 (2003) が鍵層となる降下軽石堆積物

とそれらにもとづく過去約 9 万年間の層序の概観を報告している。

中央火口丘群を形成したマグマの組成としては玄武岩～玄武岩質安山岩が最も卓越している (小野, 1989)。そのことを反映して、降下テフラの大部分は安山岩から玄武岩質の降下スコリア堆積物と降下火山灰である。一般にスコリア質の降下テフラは、降下軽石に比べて小規模で追跡しにくい堆積物であるだけでなく、岩相が酷似するために対比が困難なことが多い。しかしながら、阿蘇中央火口丘群の噴火史を解明するためには、鍵層となる降下軽石層よりもむしろ、降下テフラの大部分を占める降下スコリアおよび火山灰層の層序を確立する必要があると考える。

* 〒860-0862 熊本市黒髪 4-11-16
森林総合研究所九州支所
Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products
Research Institute, Kurokami 4-11-16, Kumamoto
860-0862, Japan.

** 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第 7
産業技術総合研究所地球科学情報研究部門
Institute of Geoscience, Geological Survey of Japan,
AIST, Tsukuba Central 7, Higashi 1-1-1, Tsukuba

305-8567, Japan.

*** 〒860-8555 熊本市黒髪 2-40-1
熊本大学教育学部
Faculty of Education, Kumamoto University, Kurokami
2-40-1, Kumamoto 860-8555, Japan.
Corresponding author: Yasuo Miyabuchi
e-mail: yasuo@affrc.go.jp

筆者らは、阿蘇カルデラ東方域を中心にテフラ層序に関する詳細な調査を実施してきた。その結果、鬼界アカホヤ火山灰(長友・庄子, 1977; 町田・新井, 1978, 1992; 略称 K-Ah)以降におけるテフラ層序の概要は明らかになった(宮縁・渡辺, 1997)が、それより古いテフラについては対比上多くの問題が残されていた。そこで本論では、層序の詳細が明らかとなった更新世末期、始良 Tn 火山灰(町田・新井, 1976, 1992; 略称 AT)以降のテフラについて報告し(Fig. 1), それらの層序にもとづく阿蘇火山の噴火史とテフラ噴出量の時間的変化について考察する。

2. テフラ層序の概要

詳細な調査を行ったのは、阿蘇中央火口丘群起源の降下テフラが厚く堆積するカルデラ東方域いちのみやまち なみのそん なかありまちの宮町・波野村・高森町付近にかけての地域である(Fig. 2)。Aso-4 火砕流以降のテフラの全層厚は、カルデラ縁で 100 m 程度に達している(渡辺・藤本, 1992)。調査地域における鍵テフラとしては、草千里ヶ浜軽石(渡辺・他, 1982; 略称 Kpfa), AT 火山灰, K-Ah 火山灰という 3 層のテフラが従来より知られていた(渡辺・高田, 1990)が、最近ではさらに多数の阿蘇火山起源の軽石層がテフラを対比する上での有用な手がかりとなることが報告されている(宮縁・他, 2003)。表層から深さ 5~10 m 付近までは、火山灰層が挟在するものの、全体的に黒色味の強い黒ボク土層となっており、その基底部の ^{14}C 年代は約 11,000 yrs BP と報告されている(山田・他, 1997)。本論では、その黒ボク土層基底部と約 25,000 yrs BP (^{14}C 年代; 池田・他, 1995)の AT 火山灰間に挟まるテフラの層序について述べる。その層序は褐色火山灰土層間に挟在する降下スコリアおよび火山灰層を中心としており、埋没土壌層を含んだそれらの全層厚は 5~10 m 程度である(Fig. 3)。

模式地点である波野村山崎やまさき(A9746 および A9903 地点)とその周辺域では、今回述べる層準に単斜輝石・斜方輝石、かんらん石等の苦鉄質鉱物を含む玄武岩質安山岩~安山岩質の降下スコリア堆積物が 20 層認められた(Figs. 4, 5)。スコリア層は砂質の火山灰層を伴うことがあり、上下を火山活動の休止期あるいは静穏期に形成された褐色火山灰土層で区切られる。本論でいう火山灰土層とは、テフラを主な母材とする土壌層で、一般に火山灰層よりも細粒で腐植質であり、風化火山灰層と考えられる無層理の堆積物を含んだものである。そうした土壌層を内部に挟まない限り、一連の噴火活動による堆積物と考え、20 層の降下スコリア堆積物を上位より山崎第 1~第 20 スコリア(略称 YmS1~YmS20)と命名した(Figs.

1, 4)。こうした一連の噴火堆積物と判断した堆積物においても、火山灰層を挟在したり、あるいは対比上有効な特徴的層相を示すことがあるため、細分してアルファベットを付けて呼ぶことにした(例えば、YmS20 を 3 つ

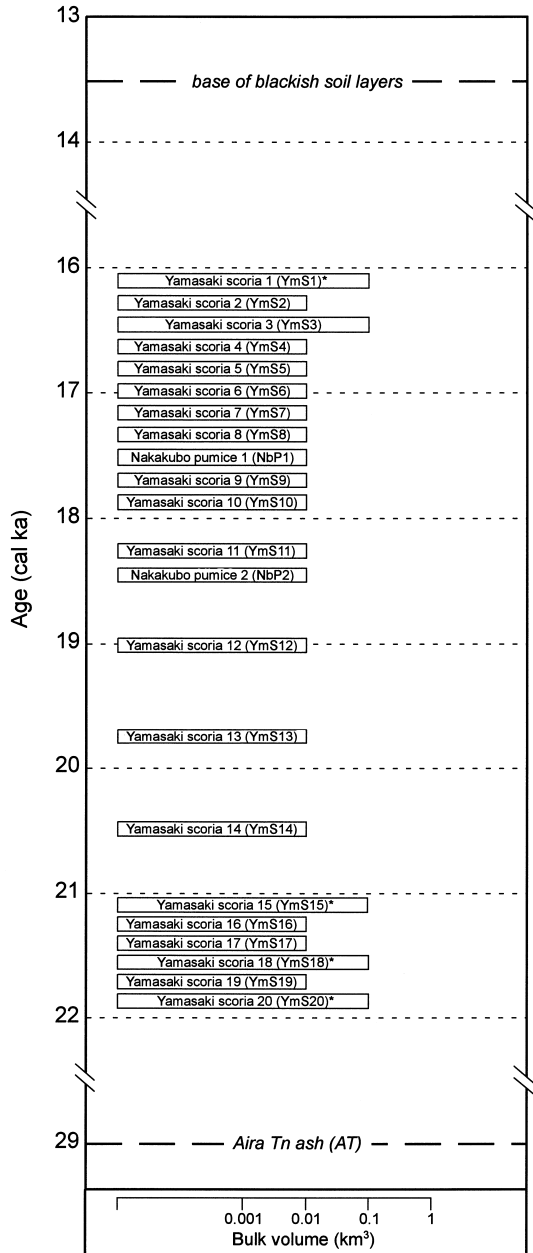


Fig. 1. Stratigraphy and bulk volumes of major tephra layers distributed around Aso caldera for the interval ca. 29-13 ka. *Scoria-fall deposits which accompany thick ash-fall deposits.

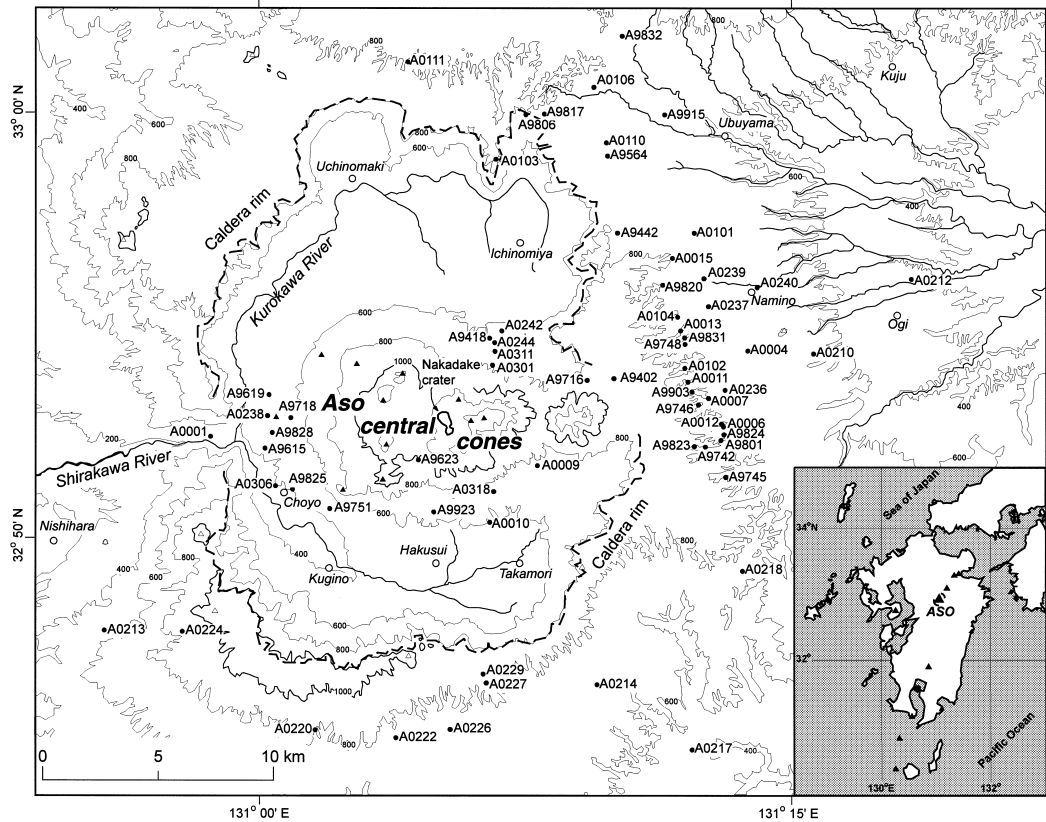


Fig. 2. Site-location map of measured stratigraphic sections in and around Aso caldera. Open and solid triangles show peaks of major Pre-Aso volcanoes and post-caldera central cones, respectively.

に区分した場合, 各サブユニットは下位より YmS20-a, -b, -c とする). ただし, ここで述べるユニットは, あくまでも複数の地点で対比可能な岩相上のユニットであり, 個々のフォールユニットを区分したのではない. そうして命名したスコリア層以外にも薄い火山灰層が褐色火山灰土層中に断片的に認められることがある. また, YmS8 と YmS9 との間には火山灰層中に軽石が挟在し, さらに YmS11 直下の土壌層にも軽石が散在することが認められ, それらは上位から中久保第 1 および第 2 軽石 (略称 NbP1 および NbP2) と命名されている (宮緑・他, 2003). 各スコリア層は岩相が酷似しているだけでなく, 色調も風化や酸化の程度によって地点間で異なることが多い. したがって, 本論ではテフラ対比における最も有効な手がかりとして, スコリア上下の火山灰層の有無やその層相, スコリア間の褐色土壌層中に挟在する火山灰層や軽石層との層序関係を用いた.

次章では, 主要なテフラの特徴や分布について述べる. 各テフラの見かけ体積は, 得られた等層厚線図 (Fig.

6) から Fierstein and Nathenson (1992) の方法を用いて計算した (Fig. 1). スコリア層に含まれる苦鉄質鉱物については, 薄片 (スコリア粒子をメノウ乳鉢で粗く粉碎, 水洗いして 2~3φ に篩い分けした後, エポキシ樹脂で封入して作成したプレパラート) を偏光顕微鏡下で観察し, おおよその量比を決定した (Table 1). なお, スコリア層が複数のユニットからなる場合には, 主要なユニットの斑晶組合せを観察した. また, 本論で記載する色調はマンセル方式の標準土色帖 (小山・竹原, 1967) によるものである.

3. 主要テフラの記載

3-1 山崎第 20 スコリア ~ 第 16 スコリア (YmS20-YmS16; 新称)

AT 火山灰の上位 1~2m 付近には, スコリア層を挟む厚い火山灰の累層が存在する. その累層は全層厚が 5m 以上に達することが多く, カルデラ東方域において特徴的なものとなっている (Fig. 5). 地点によって異なるが,

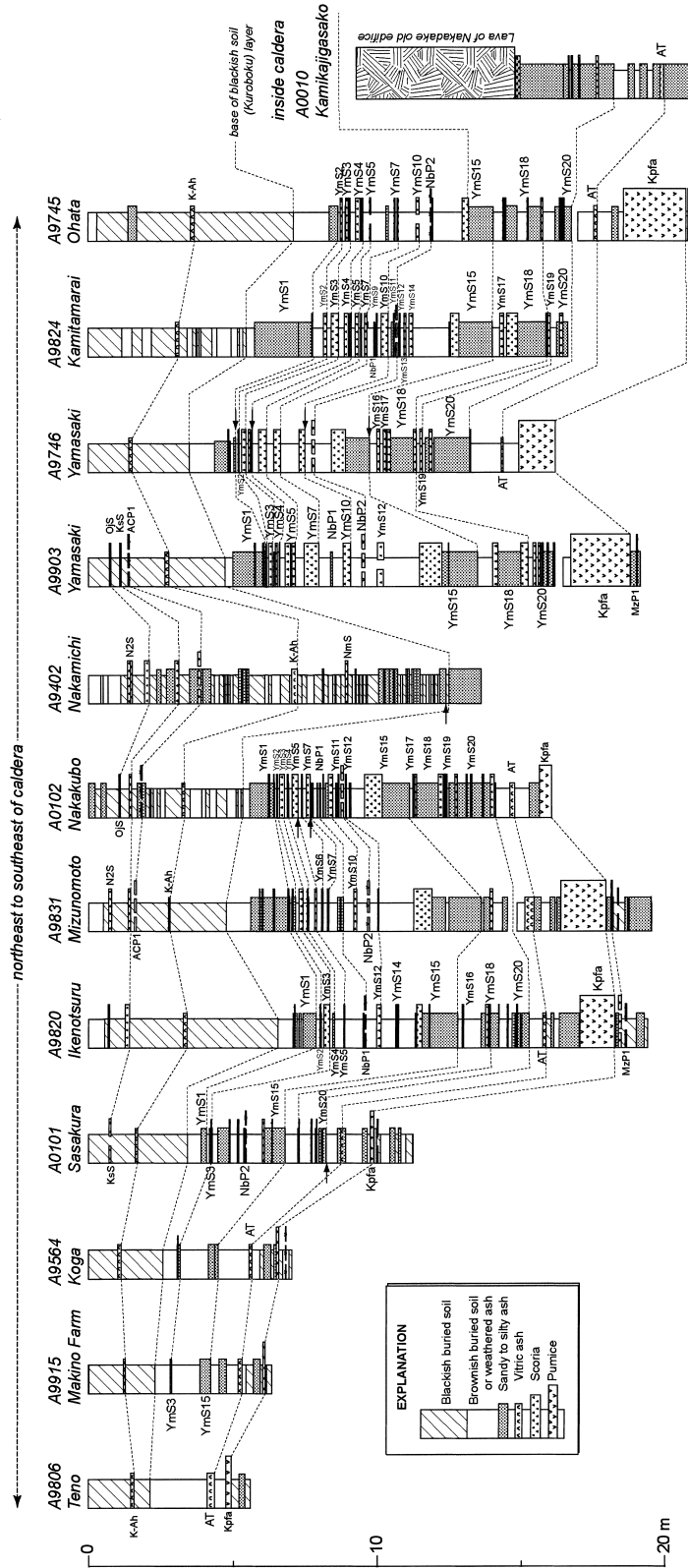


Fig. 3. Stratigraphic relations of tephra layers from post-caldera central cones in and around Aso caldera that lie above the Kusasenriyama pumice-fall deposit (Kpfa). See Fig. 2 for site locations. Arrows represent sample locations for ¹⁴C dating.

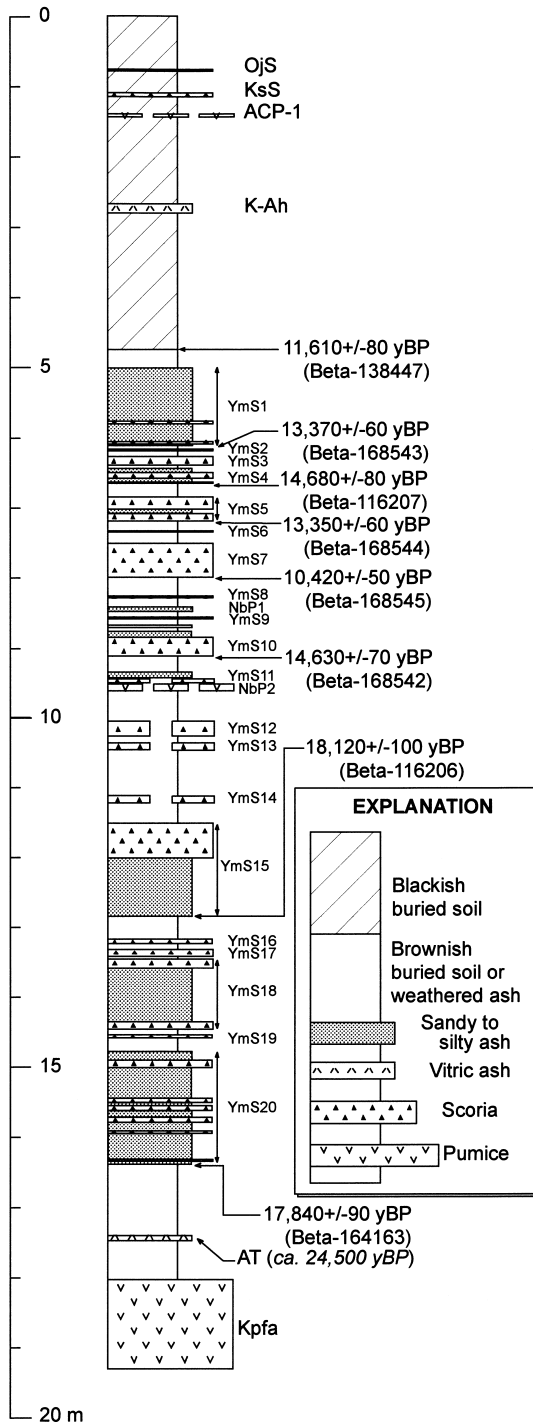


Fig. 4. Generalized composite stratigraphy of tephra layers east of Aso caldera that were erupted from post-caldera central cones since deposition of the Kusasenrigahama pumice-fall deposit (Kpfa). Names of individual tephra layers are shown on Fig. 1. The ^{14}C age of AT ash is from Ikeda *et al.* (1995).

火山灰累層中には、シルト～砂質の埋没土壌が5層程度認められることが多い。この土壌層はそれぞれ、噴火活動のわずかな休止期を示すと考えられ、火山灰累層を6つに区分し、下位より山崎第20～第15スコリア（略称 YmS20～YmS15）と命名した（Fig. 4）。YmS19, YmS17, YmS16 は層厚 10 cm 以下の黒褐色（10YR2/3）～暗褐色（7.5YR3/4）降下スコリア（最大粒径 2 cm 程度）からなる単層であるが、YmS20, YmS18 および YmS15 は厚い火山灰層を伴う規模の大きい（層厚数 10 cm～1 m 以上）降下テフラである。

最下位に存在する YmS20 は、全体的に発泡の良いスコリア層と火山灰層との互層からなる。最大層厚は 161 cm であり（A0102 地点）、挟在するシルト質火山灰によって大きく下部・中部・上部のユニット（YmS20-a～-c）と3つの部分に分けられる。最下位の YmS20-a は3層の黒褐色（10YR3/2）スコリア層と火山灰とが互層している。YmS20-b は最も厚く、成層した火山灰層中に少なくとも2層のスコリア層が挟在している。最上位の YmS20-c は成層した火山灰層と黒褐色（10YR2/3）スコリア層からなる。全体の分布主軸は東北東方向であり（Fig. 6A）、層厚分布から計算した YmS20 の見かけ体積は約 0.21 km³ である。

YmS18 も最大層厚が 161 cm（A9903 地点）に達する厚いテフラで、中央に成層した火山灰層があり、上下は降下スコリアからなる。スコリア間に挟まる火山灰層（YmS 18-b）はよく成層しており、イモゴライト（Yoshinaga and Aomine, 1962）と考えられる糸根状の物質を多量に含むことが特徴である。また上部のにぶい黄褐色（10YR4/3）を呈する降下スコリア（YmS18-c）は少なくとも4つのフォールユニットがあり、その中の下部2ユニットは発泡が非常に良く、岩片が少ないのに対し、最上部のユニットは発泡の悪いスコリア（最大径 2 cm 程度）が混在している。全体の分布主軸は東北東方向で（Fig. 6B）、見かけ体積は約 0.38 km³ である。

3-2 山崎第15スコリア（YmS15; 新称）

山崎第15スコリア（略称 YmS15）は、先述した AT 上位の火山灰・スコリア互層の最上位に存在するテフラで、本報で述べる層準の中で最も明瞭な鍵層である。下部の良く成層した火山灰層（YmS15-a）と、それを覆う上部の厚いスコリア（YmS15-b）からなることが特徴である（Fig. 4）。

YmS15-a の火山灰層は中央付近にスコリア層（層厚 2～4 cm）が挟在するが、全体的には細砂質の火山灰からなる。カルデラ縁付近（A9716 地点）での層厚は 130 cm を越えており、熊本・大分県境より東方の荻町新藤（A0212 地点）でも 43 cm の層厚を有している。分布主軸は

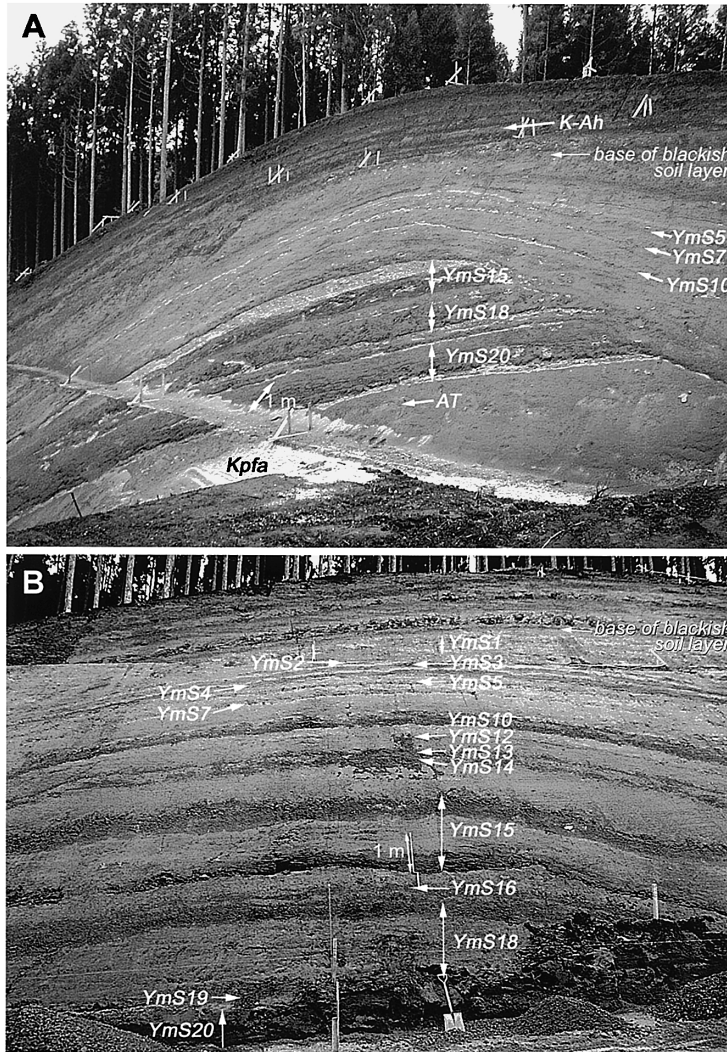


Fig. 5. Photographs of representative tephra sequences at sites A0102 (A) and site A9824 (B).

東北東方向で (Fig. 6C), 見かけ体積は約 0.68 km^3 である。このユニットの下部から中央部にかけてはイモゴライトが含まれる。また、本ユニットの上部 1/3 と下部 1/3 程度が盤状に固結していることがあり、とくに最下部は非常に硬い盤層 (農耕地土壌分類委員会, 1995, p. 37) となっていることが多い。カルデラ北東方においては AT の上位に 2 層の盤層が存在し、バンバンと命名されている (山田・久保寺, 1996; Kubotera and Yamada, 2000)。層序から判断して、YmS15-a 最下部の硬く固結した部分は盤層 (バンバン) の下位のものに対比されると考えられる。

YmS15-b は、黒褐色 (10YR2/3) ~ 黄褐色 (2.5Y5/6) を呈し、多くの地点で厚く明瞭な降下スコリア層であ

る。全体的に発泡の良いスコリアからなり、無層理であることが多いが、地点によっては少なくとも 4 つのフォールユニットが認められる。下部はやや細粒 (粗砂 ~ 0.3 cm 程度) で淘汰が良いのに対し、上部は粗粒 ($0.3 \sim 1 \text{ cm}$ 程度) でやや淘汰が悪い。YmS15-b の層厚はカルデラ縁付近 (A9716 地点) で 101 cm 、波野村山崎 (A9746, A9903, A0011 地点) で $50 \sim 78 \text{ cm}$ 、カルデラ縁から 10 km 以上東方の荻町新藤 (A0212 地点) においても 20 cm である。分布主軸は東北東方向であるが、YmS15-a に比べて細長い分布をしている (Fig. 6C)。層厚分布から求めた YmS15-b の見かけ体積は約 0.22 km^3 で、爆発的な噴火による産物と考えられる降下スコリア堆積物である。

Table 1. Mafic mineral assemblages of scoria-fall deposits (ca. 29–13 ka) determined from observation of 2–3- ϕ sieved fraction under a polarizing microscope.

Tephra	Unit	Mafic mineral assemblages*
Yamasaki scoria 1 (YmS1)	-	Cpx \geq Opx
Yamasaki scoria 2 (YmS2)	-	Cpx \geq Opx, (Ol)
Yamasaki scoria 3 (YmS3)	-	Cpx>Opx, (Ol)
Yamasaki scoria 4 (YmS4)	c	Cpx, Opx, (Ol)
---	a	Cpx, Opx
Yamasaki scoria 5 (YmS5)	c/e	Cpx \geq Opx, Ol
---	a	Cpx>Ol>>Opx
Yamasaki scoria 6 (YmS6)	-	Cpx>Ol>>Opx
Yamasaki scoria 7 (YmS7)	-	Opx>Cpx, Ol
Yamasaki scoria 8 (YmS8)**	-	Ol>Cpx
Yamasaki scoria 9 (YmS9)	-	Cpx>Ol>>Opx
Yamasaki scoria 10 (YmS10)	c	Cpx>Ol>>Opx
---	a	Cpx>Ol>>Opx
Yamasaki scoria 11 (YmS11)	-	Cpx>Ol>>Opx
Yamasaki scoria 12 (YmS12)	-	Cpx \geq Ol>>Opx
Yamasaki scoria 13 (YmS13)**	-	Ol>>Cpx
Yamasaki scoria 14 (YmS14)	-	no sample
Yamasaki scoria 15 (YmS15)	b	Cpx>Opx>Ol
Yamasaki scoria 16 (YmS16)	-	Cpx>Opx, Ol
Yamasaki scoria 17 (YmS17)	-	Cpx>Ol>Opx
Yamasaki scoria 18 (YmS18)	b	Cpx>Opx, Ol
---	a	Cpx>Ol>Opx
Yamasaki scoria 19 (YmS19)	-	Cpx>Opx>Ol
Yamasaki scoria 20 (YmS20)	c	Cpx>Ol \geq Opx
---	b	Cpx>Opx \geq Ol
---	a	Cpx>Opx>Ol

* Mafic minerals: Cpx: clinopyroxene; Ol: olivine; Opx: orthopyroxene; Trace minerals are shown in parenthesis.

** Scoria samples were remarkably altered.

YmS15-a と -b をあわせた見かけ体積は 0.9 km³ 程度となり, YmS15 は AT 火山灰以降, 最も規模の大きい噴火堆積物である。

3-3 中久保第 2 軽石 (NbP2)

YmS15 の上位は層厚 2 m 程度の褐色土壌層となっており, テフラの保存がよい地点 (A9824 など) ではおおよそ 4 つの層準に褐色 (10YR4/6) スコリア (いずれも層厚 3~7 cm, 最大粒径 1~2.5 cm 程度) が混在し (YmS14~YmS11), YmS11 直下付近に中久保第 2 軽石 (略称 NbP2; 宮縁・他, 2003) が認められる。この軽石は褐色土壌層に散在するだけで, 純層としてみられる地点はないが, 他のスコリア層を対比する際の有用な鍵層となっている。

3-4 山崎第 10 スコリア (YmS10; 新称)

山崎第 10 スコリア (略称 YmS10) は, 波野村山崎 (A9746, A9903 地点) で 20 cm 程度の層厚を有し, 鍵層となるテフラの一つで, 3 つのフォールユニットからなる。最下部のユニット (YmS10-a) は淘汰が悪い褐灰色 (10

YR5/1) スコリアからなり, 緻密なスコリアを多量に含んでいることが特徴で, それらの最大径は 10 cm を超えることがある。中央のユニット (YmS10-b) は砂質火山灰層が多量に混在する淘汰の悪いスコリア層である。最上部のユニット (YmS10-c) は比較的発泡の良い褐色 (10YR4/4) スコリアで構成される。なお, ごく限られた地点でのみ観察されるが, さらに上位には成層した薄い火山灰層 (YmS10-d) を伴うことがある。

各ユニット間での分布域の違いは明確ではなく, YmS10 の総層厚は東方向に主軸をもつ細長い分布をしており (Fig. 6D), その見かけ体積は 0.02 km³ 程度である。

3-5 中久保第 1 軽石 (NbP1)

山崎第 9 および第 8 スコリア (ともに層厚 3~5 cm, 最大径 1 cm 程度の黄褐色スコリア層) 間には, 直径数 mm の軽石が散在する灰黄色 (2.5Y6/2) 火山灰層があり, これは中久保第 1 軽石 (略称 NbP1) と命名されている (宮縁・他, 2003)。この軽石が散在する火山灰層は, 層厚 3~7 cm と薄いものであり, 南北方向に幅の狭い分布をしている (Fig. 6E)。しかしながら, このテフラは NbP2 同様に AT 火山灰以降の多数の降下スコリア堆積物を対比する際の有用な手がかりとなっている。

3-6 山崎第 7 スコリア (YmS7; 新称)

山崎第 7 スコリア (略称 YmS7) は, 黄褐色 (10YR5/6) を呈する発泡の良いスコリアである。多くの地点では明瞭なフォールユニットはみられないが, カルデラ東地域での主軸付近では 2~4 つのユニットが認められることがある。全体的に淘汰が悪い降下堆積物であり, 下部には緻密なスコリアが含まれ, 上部のスコリアは比較的発泡がよい。YmS7 は粒径 5 mm 程度の単斜輝石の大きな分離結晶を多量に含むことが特徴である。分布主軸は東北東方向であるが, その主軸にあたる波野村山崎 (A9746, A9903, A0011 地点) では 25~49 cm の層厚を有するが, そこから北方と南方へ行くと急激に薄くなり, 東方へ伸びる非常に細長い分布をしている (Fig. 6F)。層厚分布から求めた YmS7 の見かけ体積は約 0.02 km³ である。

なお, YmS7 の上位 5~10 cm 付近には明黄褐色 (10YR7/6) を呈する山崎第 6 スコリア (略称 YmS6; 層厚 5 cm 以下, 最大径 1.5 cm 程度, 直下位に薄い火山灰層を伴う) が存在する。

3-7 山崎第 5 スコリア (YmS5; 新称)

山崎第 5 スコリア (略称 YmS5) は, 波野村中久保 (A0102 地点) から高森町上玉来 (A9824 地点) にかけて明瞭な鍵層となっているテフラである。このテフラは 3 つの降下スコリア層とそれらに挟在する薄いシルト~砂質火山灰層からなる。最下部の灰黄褐色 (10YR4/2) スコ

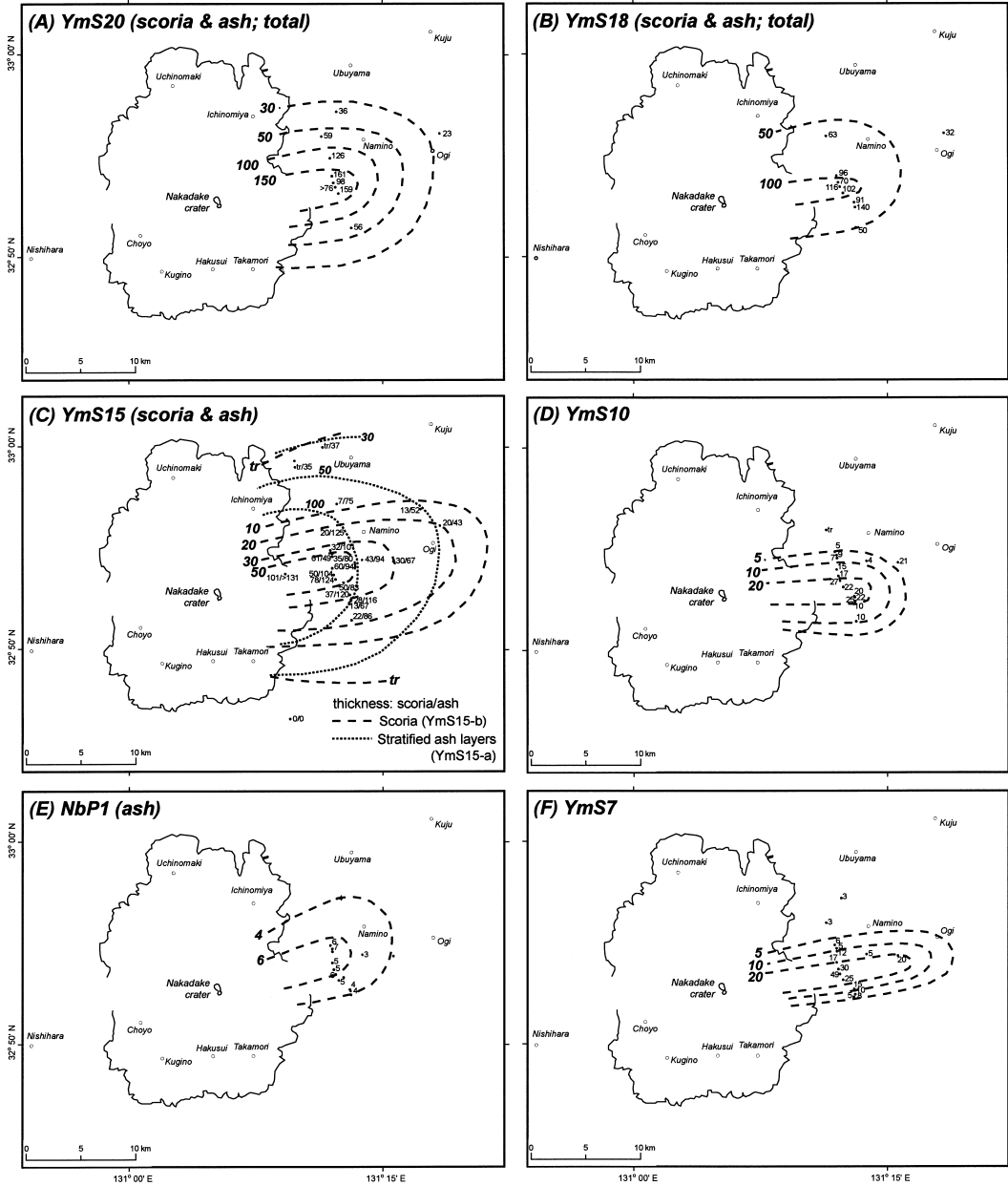


Fig. 6. Isopach maps for major tephra layers erupted during ca. 29-13 ka. Values in centimeters.

リア層 (YmS5-a) は淘汰が悪く、緻密なスコリアを多く含む。中部のスコリア層 (YmS5-c) も淘汰が悪く緻密なスコリアと発泡の良いスコリアの双方が認められる。最上部の暗灰黄色 (2.5Y4/2) スコリア層 (YmS5-e) は下位に比べて細粒で淘汰が良く、発泡の良いスコリアからなる。また、全体的に比較的大きな単斜輝石斑晶を含む玄武岩質安山岩の岩片 (最大径 6 cm 程度) が混在してい

る。さらに、最下部から中部にかけてのスコリア層 (YmS5-a~c) は単斜輝石の分離結晶を多く含み、とくに中部 (YmS5-c) には径 5 mm 程度に達する結晶も認められる。

このテフラの分布軸は東北東方向で、A0102 地点から A9824 地点にかけて層厚は大きい (13~42 cm) が、それより北方や南方へ行くと急激に薄くなる。YmS7 と同

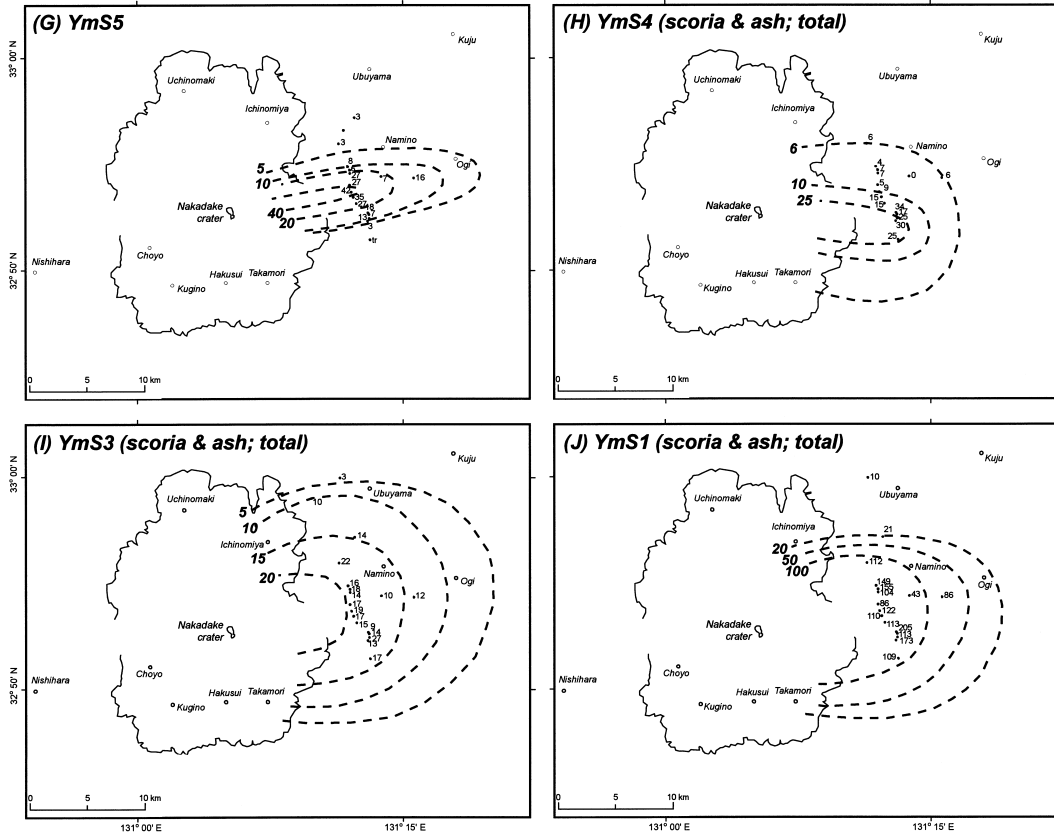


Fig. 6. continued.

様に分布は幅の狭い楕円形をしている (Fig. 6G). YmS5 の見かけ体積は 0.03 km^3 程度である.

3-8 山崎第4スコリア (YmS4; 新称)

山崎第4スコリア (略称 YmS4) は, 下位からスコリア層・火山灰層・スコリア層・火山灰層の4つのユニット (YmS4-a~d) からなる特徴的なテフラである.

YmS4-a は, 明褐色 (7.5YR5/6) のスコリア層で, 多斑晶 (斜長石と単斜輝石) のスコリアに富むとともに多量の変質岩片を含んでいる. とくに基底部には粘土化した変質岩片が集中している. 上位ほど淘汰の良い粗砂質のスコリアが多くなる. YmS4-b とした火山灰層は特徴的なにぶい黄色 (2.5Y6/4) を呈し, シルトから細砂質である. YmS4-a および YmS4-c のスコリア層が存在しない場合でも, このにぶい黄色火山灰層は認識することが可能である. YmS4-c は, 灰黄色 (2.5Y7/2)~褐色 (10YR 5/1) のスコリア層で, YmS4-a のスコリアに比べて厚く, 緻密なスコリア (最大径 1 cm) や岩片 (最大径 2.6 cm) がやや多く含まれる. 成層構造をしている場合もあるが, 全体的には逆級化構造をしている. 上部ほど発泡

が良く大径の灰黄色 (2.5Y7/2) スコリアが多くなる. さらに最上部の YmS4-d は, にぶい黄色 (2.5Y6/4) を呈するシルト~砂質の火山灰層である.

4つのユニットで分布軸が若干異なっており, YmS4-a が東南東, YmS4-b が東~東南東, YmS4-c が東方向, YmS4-d が東方向となっており, それらをあわせた全体の分布は東南東方向に軸をもっている (Fig. 6H). YmS4 全体の見かけ体積は約 0.03 km^3 と計算された.

また, YmS4 直下の埋没土壤層は褐色 (10YR4/4) を呈しており, 本テフラが不明瞭である地点においても層準を断定する上での良い手がかりとなっている.

3-9 山崎第3スコリア (YmS3; 新称)

山崎第3スコリア (略称 YmS3) は, カルデラ北東方から東南東方にかけての広い範囲で認められる指標テフラである. 本層は全体的に褐色 (10YR4/1) を呈し, 火山灰とスコリアの互層からなることが特徴であり, 少なくとも8つのフォールユニットが認められる.

最下位には変質岩片に富む火山灰層を伴っている. その火山灰層直上と最上部のユニットには大径で発泡の良

いスコリアが集中している。

全体的な分布軸は東北東から北東方向であり、ほぼスコリアだけの純層である YmS10, YmS7, YmS5 とは異なり、より円形に近い楕円状の分布をしている (Fig. 6I)。層厚分布から求めた YmS3 全体の見かけ体積は 0.1 km³ である。

YmS3 はカルデラ北東方の一の宮町古閑牧場 (A9564 地点) 付近では硬く固結した産状を示している。このことから、YmS3 は山田・久保寺 (1996) および Kubotera and Yamada (2000) が報告した盤層であるバンバンの上位のものに対比される可能性が高い。

YmS3 の上位 5~10 cm 付近には、明褐色 (7.5YR5/6) の山崎第 2 スコリア (略称 YmS2) が存在する。このスコリア層は層厚が 3 cm 程度と薄いが、粒径 3 cm に達する大きなスコリアが含まれることが特徴である。また、上位には火山灰層 (層厚 1~3 cm) を伴っている。

3-10 山崎第 1 スコリア (YmS1; 新称)

山崎第 1 スコリア (略称 YmS1) は、成層した厚い (最大層厚約 150 cm) 火山灰累層であり、少なくとも 5 つの薄い降下スコリア層が挟んでいる。

火山灰層は下部ほど良く成層しており、上部に行くほど無層理の堆積構造を示している。最下部付近には最も明瞭な褐色 (7.5YR4/6) スコリア層が認められる。火山灰層間には数枚のシルト層 (層厚 3 cm 以下) が存在し、それらはわずかな休止期を示すものと考えられる。

層準より分布の軸は若干異なるが、全体的には東北東から東方向を軸とした円形に近い分布をしている (Fig. 6J)。火山灰層を含めた YmS1 全体の見かけ体積は約 0.68 km³ である。

4. 降下テフラの噴出年代

主要なテフラの噴出年代を明らかにするために、テフラ直下の埋没土壌層を採取し、¹⁴C 年代測定を実施した

(Table 2)。黒ボク土層 (表層から 3~5 m 深まで) 基底部付近の試料は A9402 地点で、YmS1, YmS4, YmS10, YmS15 直下の土壌は A9746 地点にて、YmS5 と YmS7 については A0102 地点で、さらに YmS20 直下の土壌は A0101 地点で採取した (Fig. 3)。どの試料もテフラ直下の土壌層最上部 1~2 cm を採取したものである。分析はすべて米国 Beta Analytic 社に依頼した。土壌試料は炭酸塩を除去するために酸洗浄を行い、残存した全有機炭素を年代測定に使用している。年代測定は、A9402 地点で採取した試料のみ β 線計数法によって、それ以外の 7 点については加速器質量分析 (AMS) 法によって行った。¹⁴C 年代の算出には、Libby の半減期 5568 年を使用し、 $\delta^{13}\text{C}$ (¹³C/¹²C) による同位体分別効果の補正が行われている。また、暦年代較正には Beta Analytic 社製のプログラムを用いた。そのプログラムはデータセットとして INTCAL 98 (Stuiver *et al.*, 1998) を使用し、Talma and Vogel (1993) による数学的近似を行っている。さらに自然乾燥した土壌試料は粉碎した後、九州沖縄農業研究センター所有の全自動元素分析装置 (Elementar 社製 vario EL) を用いた乾式燃焼法で炭素・窒素含有量を定量した (Table 2)。

A9402 地点において得られた黒ボク土層 (火山灰層やスコリア層が多数挟在) 基底部の補正 ¹⁴C 年代は、11,610 ± 80 yrs BP (Beta-138447) となり、山田・他 (1997) が報告したカルデラ北東縁での黒ボク土基底部の ¹⁴C 年代 (約 11,000 yrs BP) と調和したものであった。今回得られた ¹⁴C 年代 (中央値) を暦年較正すると、約 13.5 ka となる。

つぎに、YmS1 から YmS10 までのテフラ直下の埋没土壌層の年代であるが、YmS7 直下を除いて、14,680 ± 80 yrs BP (Beta-116207) ~ 13,350 ± 60 yrs BP (Beta-168544) という範囲の補正 ¹⁴C 年代が得られた。YmS7 直下の土壌層の 10,420 ± 50 yrs BP (Beta-168545) という補正 ¹⁴C 年

Table 2. Results of AMS ¹⁴C age determinations for buried soils just below tephra layers around Aso caldera.

Sample	Sampling site	C (%)	N (%)	C/N	¹⁴ C age* (yrs BP)	$\delta^{13}\text{C}$ (¹³ C/ ¹² C ratio)	Conventional ¹⁴ C age** (yrs BP)	Lab code	Calibrated result*** (2 σ : 95% probability)
base of blackish soil layers [#]	A9402	2.07	0.12	16.92	11,470 ± 80	-16.0	11,610 ± 80	Beta- 138447	13,815-13,435 cal BP
soil below YmS1	A9746	0.18	0.04	4.93	13,350 ± 60	-23.5	13,370 ± 60	Beta- 168543	16,490-15,740 cal BP
soil below YmS4	A9746	0.50	0.08	6.27	14,640 ± 80	-22.8	14,680 ± 80	Beta- 116207	18,020-17,150 cal BP
soil below YmS5	A0102	0.31	0.04	7.35	13,310 ± 60	-22.3	13,350 ± 60	Beta- 168544	16,470-15,710 cal BP
soil below YmS7	A0102	0.11	0.02	5.57	10,370 ± 50	-22.2	10,420 ± 50	Beta- 168545	12,820-11,950 cal BP
soil below YmS10	A9746	0.17	0.03	6.35	14,570 ± 70	-21.6	14,630 ± 70	Beta- 168542	17,940-17,120 cal BP
soil below YmS15	A9746	0.25	0.02	11.62	18,070 ± 100	-22.1	18,120 ± 100	Beta- 116206	22,100-20,980 cal BP
soil below YmS20	A0101	0.63	0.08	8.34	17,800 ± 90	-22.5	17,840 ± 90	Beta- 164163	21,750-20,680 cal BP

* ¹⁴C dates were analyzed based on the Libby's ¹⁴C half life of 5,568 years

** Conventional ¹⁴C ages were calculated by $\delta^{13}\text{C}$ values.

***Using the program (Talma and Vogel, 1993) based on calibration data sets (Stuiver *et al.*, 1998).

[#] ¹⁴C date was measured by radiometric method.

代は、上位の黒ボク土層基底部の年代よりも若く、層序的に矛盾する結果となっている。これは、土壌試料の炭素含有量が低く (Table 2)、年代測定に十分な炭素量が得られなかったためか、あるいは土壌層生成後に地下水などの影響で汚染されるなどして、実際よりも若い年代になったためと考えられ、YmS7 直下の ^{14}C 年代は採用しないことにした。したがって、YmS1 から YmS10 の暦年較正年代は約 18~16ka となる。これら 10 枚のスコリア層とそれらに挟在する火山灰層や軽石層は、植生が生育して薄い土壌層が形成されるわずかな時間間隙を挟むが、最大 2000 年間程度の期間に噴出したものと推定される。

さらに、YmS15 直下の土壌層から 18,120 \pm 100 yrs BP (Beta-116206)、YmS20 直下の土壌層からは 17,840 \pm 90 yrs BP (Beta-164163) という補正 ^{14}C 年代が得られた。これらを暦年較正すると、1 σ の誤差範囲内で重なることから、YmS15 から YmS20 までの 5 つのテフラは 22~21 ka 頃に比較的短い時間間隔で噴出したと考えられる。このことは、テフラ間に挟在する土壌層がやや粗粒 (細砂~シルト質) であることや風化があまり進んでいないという産状とも調和している。

5. 阿蘇中央火口丘群山体との層序関係および降下テフラの噴出源

これまで黒ボク土層基底部と AT 火山灰間に挟まる阿蘇中央火口丘群起源の降下テフラの特徴とそれらの噴出年代について述べた。今回記載した降下テフラの大部分はカルデラ内で観察できないために、等層厚線や分布軸から噴出中心を求める方法は適用できない。本章では、これまでの報告をもとにして、中央火口丘群溶岩との層序関係を明らかにするとともに、テフラの噴出源について考察する。なお以下の議論では、とくに断らない限り、 ^{14}C 年代ではなく、暦年較正年代を用い、ka の単位で示す。

小野・渡辺 (1985) および渡辺 (2001) が示した現在地表面に見える中央火口丘群山体の形成順序によると、約 29 ka (奥野, 2002) の AT 火山灰から約 13.5 ka 間に噴出した岩体として可能性が高いのは、中岳古期山体の溶岩流および火砕岩 (複数のアグルーチネイト) である。

馬場 (1999) は、中岳南麓の地点 (本論の A0010 地点) において中岳古期山体の溶岩流と AT 火山灰との層序関係を確認し、小野・渡辺 (1985) や渡辺 (2001) が示した可能性を支持する結果を与えている。その地点では、中岳古期山体の溶岩は AT 火山灰の約 5 m 上位に存在すること、また AT 火山灰の約 2 m 上位から溶岩までは火山灰とスコリアの互層となっていることが観察できる。こ

うした事実から、中岳は AT 火山灰降下堆積以降 (おそらく数千年後) に活動を開始して、多量の溶岩を流出したとされている (馬場, 1999)。

A0010 地点における AT 火山灰上位のテフラ層序は、カルデラ東方域でのテフラ層序と調和しており、溶岩まで連続している火山灰累層 (スコリアが挟在) の基底部は YmS20 の基底部に対比できる (Fig. 3)。このことは、今回得られた ^{14}C 年代や AT 火山灰の年代からみても矛盾はない。また、A0010 地点では AT 火山灰と中岳古期山体の溶岩との間に、カルデラ周辺域での鍵層である YmS15-b とした降下スコリア層が認められないことから、中岳古期山体の溶岩は YmS20 から YmS15 間のどこかの層準に挟まる可能性が高い。したがって、中岳は約 22~21 ka に活動を開始し、同時期に溶岩を流出したと考えられる。

中岳の東側に位置する高岳 (標高 1,592 m) は、山頂付近から南東方向を中心に溶岩 (高岳溶岩) を流下させている (小野・渡辺, 1985) が、その溶岩は中岳古期山体の溶岩よりも古い可能性が高いことが判明している (馬場, 1999)。その後、高岳では火口を形成してテフラを噴出するなどの活動は発生していない。

以上のことから、本論で述べるテフラの中で、多くの降下スコリア堆積物については、岩質 (両輝石・かんらん石斑晶を含む玄武岩質安山岩~安山岩) が類似することや時期的な問題からも、中岳古期山体における噴火堆積物である可能性が高い。ただ、NbP1 と NbP2 といった降下軽石も含めて、全てのテフラの噴出源が中岳であるのかどうかについては今後検討すべき問題である。

6. テフラ層序からみた阿蘇火山における更新世末期, AT 火山灰以降 (29~13 ka) の噴火活動史

これまで約 29~13 ka におけるテフラ層序と主要テフラの特徴や年代、さらにそれらの給源について述べた。本章では、テフラ層序にもとづく AT 火山灰以降、約 13 ka までにおける阿蘇火山、とくにテフラの給源と考えられる中岳を中心とした噴火活動史について議論する。

約 29 ka の AT 火山灰降下堆積以降の 7,000 年間程度、阿蘇火山では小規模な火山灰を噴出する噴火はあるものの、活動が比較的静穏な時期に入り、カルデラ周辺域ではやや腐植に富む土壌層が形成されていた (宮緑・高田, 2002)。

そして、22~21 ka 頃に中岳が活動を開始した。その初期の活動は非常に激しいものであり (見かけ体積 0.2~0.9 km³)、わずかな時間間隙は存在するが、比較的短時間に大量の火山灰とスコリアを噴出し、カルデラとその周辺地域にそれらの厚い互層 (山崎第 20~第 15 スコリア

ア)を堆積させた。また、この時期には南側および北側斜面上に溶岩(古期山体の溶岩)を流下させている。さらに、この時期のクライマックスには、厚い降下スコリア(山崎第15スコリアのユニットb;見かけ体積約0.2 km³)を堆積させる爆発的な噴火が発生している。

その後、約21~18 kaはカルデラ周辺域に明瞭なスコリア層として保存される規模の噴火活動は少なく、山崎第14~第11スコリアや中久保第2軽石などのテフラの噴出が認められるが、それらの見かけ体積は0.01~0.06 km³程度である。

つぎに、18~16 ka頃にかけては見かけ体積0.02~0.09 km³のスコリアを放出する噴火が間欠的に発生して、カルデラ東方域に9層の降下テフラ(山崎第10~第2スコリア)などを堆積させている。これらのスコリア層は上下や中央に火山灰層を伴うことが多く、この時期の噴火においてもスコリアだけでなく、火山灰の放出も起きている。さらに同時期の最後には、最大層厚が150 cmに達する厚い成層火山灰層とそれらに挟在する数枚の薄いスコリア層からなる山崎第1スコリア(YmS1)が堆積している。YmS1をもたらず噴火は長期間にわたって火山灰を放出しながら継続し、徐々に終焉したものと考えられる。

YmS1の上位にはにぶい黄色(2.5Y6/4)を呈する明瞭なシルト~砂質層がある。この堆積物は明瞭な成層構造はみられず、風化が進んでいる。炭素含有量は約0.8%で¹⁴C年代測定を行った下位の土壌層よりも高い値であった(Table 2)。しかし、明るい色調を呈することや多量の鉱物片(斜長石など)を含むことから、この堆積物は、数千年間にわたる(約16~13.5 ka)穏やかな噴火(灰噴火など)による火山灰が累積し、それらが風化して形成されたものであると推定される。

約13.5 ka以降、阿蘇中央火口丘群の活動はそれまでと比較して、かなり静穏となり、カルデラおよびその周辺域では腐植に富む土壌層(薄い火山灰層が挟在)が断続的に形成されており、その土壌層は植生の影響も伴って厚い黒ボク土層となっている。

7. 22~16 kaにおけるテフラ噴出量の時間的変化

つぎに、阿蘇火山においてAT火山灰以降の主要な活動時期にあたる約22~16 kaのテフラ噴出量の時間的変化について考察する。各テフラの層厚分布(Fig. 6)から計算された見かけ体積を溶岩換算量(DRE; 2.5 g/cm³)に変換して積算し、テフラ噴出量階段図を作成した(Fig. 7)。なお、テフラの密度は阿蘇中岳の降下火山灰で得られた値1.2 g/cm³(渡辺, 1991)を採用している。

阿蘇火山においてカルデラ周辺域で認定された約22~

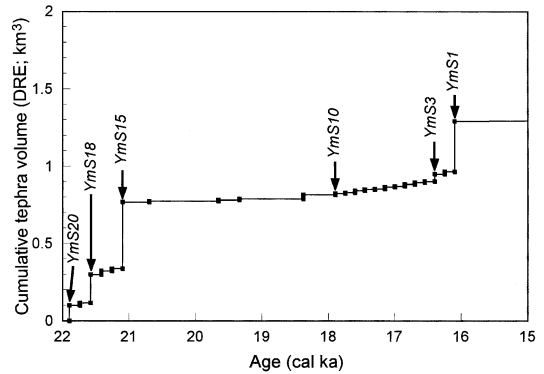


Fig. 7. Cumulative erupted volume versus time (ca. 22-15 ka) for tephra layers distributed around Aso caldera.

16 kaの降下テフラ噴出量の合計は約1.3 km³であり、平均噴出率は0.2 km³/ky程度となっている。これは、最近9万年間におけるテフラの平均噴出率0.2 km³/kyとほぼ同じ値である。宮縁・他(2003)は同時期のテフラ噴出総量を約2.5 km³(DRE換算)としているが、この値はテフラ間に挟在する土壌層も含めて概算した結果である。これに比べ、今回得られた値(1.3 km³)は明らかな噴火堆積物である各テフラの見かけ体積だけをDRE換算して積算したものである。その差である1.2 km³の大部分はカルデラ周辺域における土壌層などの体積に相当すると思われる。阿蘇火山周辺域では、火山灰土層もカルデラ中心に向かって厚くなることが報告されており、このことは火山灰土層の主な母材が長期間にわたって継続する灰噴火による産物であるためと考えられている(小野・他, 1995)。しかしながら、今回の調査で土壌層としたものが給源付近で噴火堆積物に対比できるのかどうか、現時点で明らかではない。そこで、本論ではカルデラ周辺域で認識されたテフラ(総量1.3 km³)に限定して噴出物の時間的変化について議論する。なお、テフラ間に挟在する埋没土壌層の詳細については、今後検討する予定である。

テフラ噴出量の時間的変化についてみると、中岳が活動を開始した時期にあたる22~21 kaに約0.8 km³という大量のテフラ(火山灰とスコリア)を放出している。とくにそのクライマックスであるYmS15の噴出量はその半分以上を占めている。21~18 kaには間欠的に0.001~0.01 km³オーダーのスコリア噴出があるものの、累積量の増加はわずかなもので、階段図はほとんど横這い状態である。その後、18~16 kaにはYmS10からYmS1というスコリアと火山灰の放出が高い頻度で発生し、小刻みに累積噴出量は増加し、この時期に合計約0.5 km³のテ

フラを噴出している。

以上のことから, 更新世末期の AT 火山灰以降における多量のテフラ噴出は, 22~21 ka と 18~16 ka という 2 つの時期に集中して発生していることがわかった。また, 前者には中岳古期山体から溶岩が流出していることが明らかとなった。小野・渡辺 (1985) から求めた中岳古期山体の溶岩の分布面積は, 約 11.6 km² である。平均的な厚さを 5 m と仮定すると, 溶岩流の体積は 0.06 km³ 程度と概算できる。中央火口丘群山体の密度は約 2.2 g/cm³ と推定されている (小野・他, 1993) ので, 中岳古期山体の溶岩の体積は DRE 換算で約 0.05 km³ となる。これは同時期の降下テフラ噴出量より 1 オーダー低い値である。

また, 本論で述べたテフラ層序の大部分は降下スコリア堆積物からなっているが, YmS15-b を除くと, 単なるスコリアだけの放出では, その噴出量は 0.01 km³ オーダー (DRE) であり, 累積噴出量の増加に大きく寄与しない。一方, 火山灰放出を伴うテフラの噴出量は 0.1 km³ オーダーと 1 オーダー大きいことがわかった (Fig. 1)。ただ, 厚い火山灰累層を伴うテフラの場合には, 降下スコリアをもたらず爆発的な噴火よりも長い期間にわたって噴火活動が続いたと考えられ, 噴出量はそれらの活動期間を合計したものである。火山灰を主体として多量のマグマが放出されるということは, 現在も灰噴火 (小野・他, 1995; Ono *et al.*, 1995) を主な活動スタイルとしている阿蘇火山, とくに中岳の大きな特徴といえる。

8. 阿蘇中央火口丘群全体の活動史の中での 22~16 ka の活動の位置づけ

更新世末期, AT 火山灰以降の主要な活動時期である約 22~16 ka におけるテフラの層序は, 降下スコリアをもたらず爆発的な噴火や阿蘇火山で特徴的な灰噴火 (小野・他, 1995; Ono *et al.*, 1995) を主体とした堆積物からなっている。このように間欠的なスコリア噴火や灰噴火が発生するという 22~16 ka の活動は, 中央火口丘群の過去約 9 万年間の平均的な活動様式 (宮縁・他, 2003) に近いものであり, さらに古い時代の噴火史を考える上でも模式的なものとして位置づけられる。

阿蘇中央火口丘群では, 初期 (約 90 ka) から 13 ka に至るまで, 降下スコリアや軽石を噴出する爆発的な噴火, さらに長期間にわたって継続する灰噴火が, 長い時間間隙なく発生し, 周辺地域に膨大な量の降下テフラが堆積した。しかしながら, 約 16~13 ka を境に活動が変化していることが今回調査したテフラ層序から明らかとなった。13 ka 以降においても灰噴火は断続的に起こっているものの, 爆発的なスコリア噴火の頻度が急に低く

なっている。また, 灰噴火も小規模化しており, 火山灰層間には腐植に富む厚い土壌層が発達している。宮縁・他 (2003) による火山灰土壌層を含んだ噴出物量の概算では約 13 ka 以降の噴出率は約 0.1 km³/ky (DRE) と, それ以前の時期の半分程度まで減少している。

本論でテフラ噴出量などを詳細に述べた約 22~16 ka の時期はそれ以降, 現在に至る時期に比べて, 噴火活動がかなり活発であることがわかった。さらに, この時期は活動様式や噴出物量の点でも, 過去約 9 万年間の平均的な活動に近いといえる。

9. ま と め

阿蘇カルデラ形成後に活動を開始した阿蘇中央火口丘群は, 膨大な量の降下テフラを噴出し, カルデラ東方域では厚さが 100 m 程度に達するテフラ累層が存在している。その累層は降下スコリアと火山灰を主体としており, 層序は複雑なものであるが, 層序の詳細が明らかとなった更新世末期, AT 火山灰以降のテフラ層序を報告し, それをもとにして, 噴火史と噴出量の時間的変化について考察した。

AT 火山灰 (約 29 ka) と黒ボク土層基底部 (約 13.5 ka) との間には, 20 層の降下スコリア (下位から山崎第 20~第 1 スコリア; 略称 YmS20-YmS1) と 2 層の降下軽石 (下位から中久保第 2 および第 1 軽石; NbP2, NbP1) が認められた。これらのテフラの大部分は, 中岳とその周辺域から噴出したものと考えられる。

テフラ直下の埋没土壌層の ¹⁴C 年代を暦年校正した結果から, YmS20 から YmS15 は 22~21 ka 頃に, YmS10 から YmS1 は 18~16 ka に噴出し, YmS14~11 を放出した 21~18 ka の時期に比べると, 爆発的な噴火活動が活発であったと判断される。

阿蘇火山においてカルデラ周辺域で確認できる更新世末期の降下テフラ総噴出量は約 1.3 km³ (DRE) であり, その噴出は 22~21 ka (0.8 km³) と 18~16 ka (0.5 km³) という 2 つの時期に集中している。また前者の時期には, 中岳古期山体の溶岩 (0.05 km³) の噴出があったことが明らかとなった。

さらに, 今回述べた活動の中心時期にあたる 22~16 ka という時期は, 13 ka 以降に比べて, かなり活動が活発であり, 噴火様式や噴出物量の点でも過去約 9 万年間の平均的なものに近い。

謝 辞

本研究を進めるにあたり, 熊本県阿蘇地域振興局林務課には工事情報の提供を受けるとともに, 現地調査の許可をいただいた。林道工事担当者には調査の便宜をは

かっていただいた。熊本県文化課の馬場正弘氏には日頃から阿蘇火山の地質について議論していただくとともに、重要な露頭をご教示いただいた。炭素・窒素含有量の測定では九州沖縄農業研究センターの荒川祐介氏にお世話になった。Smithsonian Institution の James F. Luhr 氏には英文の不備を指摘していただいた。また、査読者である及川輝樹氏と井村隆介氏、編集担当の伊藤順一氏の意見によって、本論の内容は大きく改善された。以上の方々には心から感謝いたします。

引用文献

- 馬場正弘 (1999) 阿蘇南郷谷に伏在する溶岩流。熊本地学会誌, **120**, 2-8.
- 馬場正弘・渡辺一徳・宮縁育夫 (1999) 阿蘇中央火口丘南部における中岳の噴出物の層序。熊本大学教育学部紀要 (自然科学), **48**, 133-146.
- Fierstein, J. and Nathenson, M. (1992) Another look at the calculation of fallout tephra volumes. *Bull. Volcanol.*, **54**, 156-167.
- 早川由紀夫・井村隆介 (1991) 阿蘇火山の過去 8 万年間の噴火史と 1989 年噴火。火山, **36**, 25-35.
- 池田晃子・奥野 充・中村俊夫・筒井正明・小林哲夫 (1995) 南九州, 始良カルデラ起源の大隅降下軽石と入戸火砕流中の炭化樹木の加速器質量分析法による ^{14}C 年代。第四紀研究, **34**, 377-379.
- Kubotera, H. and Yamada, I. (2000) Characteristics of the induration of tephra-derived soils in Kyushu, Japan. (3) Properties and typology of five indurated soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, **46**, 365-379.
- 町田 洋・新井房夫 (1976) 広域に分布する火山灰一始良 Tn 火山灰の発見とその意義。科学, **46**, 339-347.
- 町田 洋・新井房夫 (1978) 南九州鬼界カルデラから噴出した広域テフラ一アカホヤ火山灰。第四紀研究, **17**, 143-163.
- 町田 洋・新井房夫 (1992) 火山灰アトラスー日本列島とその周辺。東京大学出版会, 276p.
- 宮縁育夫・渡辺一徳 (1997) 埋没黒ボク土層の ^{14}C 年代からみた完新世阿蘇火山テフラの噴出年代。火山, **42**, 403-408.
- 宮縁育夫・高田英樹 (2002) 波野村笹倉永遺跡のテフラ層序。熊本地学会誌, **129**, 2-12.
- 宮縁育夫・星住英夫・高田英樹・渡辺一徳・徐 勝 (2003) 阿蘇火山における過去約 9 万年間の降下軽石堆積物。火山, **48**, 195-214.
- 長友由隆・庄子貞雄 (1977) アカホヤ, イモゴ, オンジの対比ならびに噴出源について一アカホヤの土壤肥料学的研究 (第 2 報)。日本土壤肥料学雑誌, **48**, 1-7.
- 農耕地土壌分類委員会 (1995) 農耕地土壌分類第 3 次改訂版。農業環境技術研究所資料, **17**, 79p.

- 奥野 充 (2002) 南九州に分布する最近約 3 万年間のテフラの年代学的研究。第四紀研究, **41**, 225-236.
- 小野晃司 (1989) 阿蘇火山の岩石。日本火山学会 1989 年度秋季大会火山学セミナー「阿蘇火山」, 8-14.
- 小野晃司・渡辺一徳 (1983) 阿蘇カルデラ。月刊地球, **5**, 73-82.
- 小野晃司・渡辺一徳 (1985) 阿蘇火山地質図 (5 万分の 1)。火山地質図 **4**, 地質調査所.
- 小野晃司・渡辺一徳・駒澤正夫 (1993) 重力データからみた阿蘇カルデラの構造。月刊地球, **15**, 686-690.
- 小野晃司・渡辺一徳・星住英夫・高田英樹・池辺伸一郎 (1995) 阿蘇火山中岳の灰噴火とその噴出物。火山, **40**, 133-151.
- Ono, K., Watanabe, K., Hoshizumi, H. and Ikebe, S. (1995) Ash eruption of the Naka-dake crater, Aso volcano, southwestern Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **66**, 137-148.
- 小山正忠・竹原秀雄 (1967) 新版標準土色帖。農林水産省農林水産技術会議事務局・財団法人日本色彩研究所.
- Stuiver, M., Reimer, P. J., Bard, E., Beck, J. W., Burr, G. S., Hughen, K. A., Kromer, B., McCormac, G., van der Plicht, J. and Spurk, M. (1998) INTCAL 98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon*, **40**, 1041-1083.
- 高田英樹 (1989) 阿蘇中央火口丘群のテフラ概報。熊本地学会誌, **90**, 8-11.
- Talma, A. S. and Vogel, J. C. (1993) A simplified approach to calibration ^{14}C dates. *Radiocarbon*, **35**, 317-322.
- 渡辺一徳 (1991) 阿蘇火山中岳の火山活動。熊本地学会誌, **98**, 2-13.
- 渡辺一徳 (2001) 阿蘇火山の生い立ち一地質が語る大地の鼓動一。一の宮町史 自然と文化阿蘇選書 7, 一の宮町, 241p.
- 渡辺一徳・高田英樹 (1990) 阿蘇カルデラ周辺域における火山灰層と黒ボク土の斜交。熊本大学教育学部紀要 (自然科学), **39**, 21-27.
- 渡辺一徳・藤本雅太郎 (1992) 表層地質図「阿蘇山・竹田」および説明書, 土地分類基本調査 (5 万分の 1), 熊本県, 15-28.
- 渡辺一徳・小野晃司・平塚勝一 (1982) 草千里ヶ浜火山の軽石噴火について。火山, **27**, 337-338.
- 山田一郎・久保寺秀夫 (1996) 阿蘇外輪山およびその周辺地域における阿蘇 4 以降のテフラ層序と土壌層序。九州農業試験場研究資料, **83**, 1-35.
- 山田一郎・佐瀬 隆・久保寺秀夫 (1997) 阿蘇外輪山及びその周辺の黒ボク土の生成年代と古植生。日本第四紀学会講演要旨集, **27**, 154-155.
- Yoshinaga, N. and Aomine, S. (1962) Imogolite in some Ando soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, **8**, 114-121.

(編集担当 伊藤順一)