阿蘇カルデラ北部，阿蘇谷千町無田ボーリングコアの 植物珪酸体および微粒炭分析

宮 縁 育 夫** 杉 山 真 二** 佐々木 尚 子***

Phytolith and Macroscopic Charcoal Analyses of the Senchomuta Drilling Core in Asodani Valley, Northern Part of Aso Caldera, Japan

Yasuo MIYABUCHI^{*,†}, Shinji SUGIYAMA^{**,†} and Naoko SASAKI^{***}

Abstract

Holocene environmental changes and vegetation history are constructed using phytolith and macroscopic-charcoal analyses of a 23-m-deep drilling core obtained at the Senchomuta marsh in Asodani Valley, northern part of Aso caldera, SW Japan. An intra-caldera lake existed in the Asodani Valley prior to approximately 9 cal ka (calibrated ¹⁴C age). Multiple large flood events occurred during the period 8.9–8.1 cal ka and emplaced thick sandy deposits in the valley basin. Thereafter, the center of the Asodani Valley (northern part of caldera floor) changed to swampy and fluvial environments. *Sasa* (cool-temperature dwarf bamboo) grasslands and/or forests with understory *Sasa* covered slopes of the Asodani Valley basin between 11 and 9 cal ka. *Sasa* phytoliths significantly increased at ca. 7.3–6.5 cal ka, but thereafter decreased. *Miscanthus* (Japanese pampas grass) grasslands existed continuously on the slopes. Macroscopic-charcoal particles were abundant during the last 6000 years, and the peak (6.1 cal ka) amount of charcoal particles is consistent with that of *Miscanthus* phytoliths. This indicates that the existence of *Miscanthus* grassland might be related to fire events. Inside the Asodani Valley, *Phragmites* (reed) became established continuously along the shore of the intra-caldera lake (prior to ca. 9 cal ka) and in subsequent marshes. Gramineae phytoliths were detected predominately through all horizons of the drilling core, whereas a small amount of arboreal phytolith was observed at most horizons. We, therefore, believe that forests existed on steep slopes such as the caldera wall where human impacts were small, although *Sasa* and *Miscanthus* grasslands were maintained by human activity outside Aso caldera.

Key words : Aso caldera, phytolith, vegetation history, macroscopic charcoal, environmental change

キーワード : 阿蘇カルデラ, 植物珪酸体, 植生変遷, 微粒炭, 環境変遷

* 森林総合研究所九州支所

** 古環境研究所

*** 総合地球環境学研究所

+ 現所属 : 熊本大学教育学部

* Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute

** Paleoenvironment Research Co., Ltd.

*** Research Institute for Humanity and Nature

+ Present address: Faculty of Education, Kumamoto University

I. はじめに

九州中央部に位置する阿蘇カルデラ周辺域には約 220 km² に及ぶわが国最大級の草原が広がっており、その大部分はススキ草原、ネザサ草原、シバ草原といった半自然草地（野草地）である。こうした雄大な草原の景観は、西暦 720 年に成立した『日本書紀』にも記載されていることから、阿蘇の草原は“千年の草原”といわれてきたが、最近その草原の歴史を科学的に解明するため、乾燥した台地上の環境での植生推定に有効な植物珪酸体（プラント・オパール）分析（杉山、2000 など）による研究が行われている。宮縁・杉山（2006）は阿蘇カルデラ東方域のテフラ断面で植物珪酸体分析を実施して、過去約 3 万年間にわたってイネ科草本を主体とする植生が継続していたことを明らかにするとともに、最近 13,500 年間は一貫してススキ属草原が優占する草原植生が続いていたという結果を得ている。また、宮縁・杉山（2008）は阿蘇火山南西麓においてもササ属などイネ科草本が優占する植生が最近約 3 万年間続いており、完新世にはササ属-メダケ属草原が存在したことを報告している。

一方、阿蘇カルデラ内においてはボーリングコアの花粉分析が行われている（岩内・長谷、1992）。その分析からは、コア全体を通してイネ科草本とともに樹木起源の花粉が多量に検出され、晩氷期から後氷期にかけて、針葉樹・落葉広葉樹混交林、針葉樹林、落葉広葉樹林、常緑広葉樹林へと森林植生が変化したことが明らかになっている。彼らが示した結果は、植物珪酸体分析から推定されるカルデラ周辺の植生変遷とは大きく異なっている。こうした結果の違いは、植物珪酸体と花粉という分析手法の違いに起因するものかもしれないが、カルデラ内とカルデラ周辺の阿蘇火砕流台地上とでは植生が異なっていた可能性もある。実際に植物珪酸体分析は花粉分析のような広域の植生推定が難しいという問題点があり、阿蘇カルデラ周辺域という広い面積の植生変遷を明らかにするためには、阿蘇カルデラ内を含めた多数の地点で植物珪酸体分析を行う必要がある。

筆者らは 2008 年 2 月に阿蘇カルデラ北部の阿蘇谷においてボーリングを実施し、そのコアの層序記載や ¹⁴C 年代測定、植物珪酸体および微粒炭分析を行った。本論では、これらの分析結果を報告するとともに、阿蘇谷における完新世の環境および植生変遷について議論する。

II. 調査地域の概要

阿蘇カルデラ（南北 25 km, 東西 18 km）は約 27 ～ 9 万年前（松本ほか、1991）にかけて起こった 4 回の巨大火砕流噴火によって形成されたと考えられている（小野ほか、1977; 小野・渡辺、1985）。カルデラ内には約 9 万年前の Aso-4 噴火直後に活動を開始した 17 座以上の火山の複合体である中央火口丘群が存在している（小野ほか、1993; 宮縁ほか、2003）。この中央火口丘群によって阿蘇カルデラは南北に分けられ、北半分は阿蘇谷、南半分は南郷谷と呼ばれている（図 1）。

カルデラ西端の立野火口瀬での溶岩流の堰き止め（宮縁ほか、2004）によって阿蘇谷、南郷谷ともに複数回湖沼化したことが明らかになっている（渡辺、2001）。とくに、阿蘇谷では 8,200 年前頃（¹⁴C 年代）まで湖が存在し、その後も沼や湿地などの環境が続いたことが珪藻分析によってわかっている（長谷ほか、2003）。厚い湖成堆積物によって阿蘇谷は標高 500 m 前後のほぼ平坦な地形となっており、谷の中央部から北部を黒川がほぼ西流している。

ボーリング試料の採取を行った地点（32°57'50.0"N, 131°01'46.2"E, 標高約 476 m）は、阿蘇谷北西部に位置する阿蘇市三久保千町無田である（図 1）。千町無田は黒川とカルデラ壁に挟まれた東西 1.4 km, 南北 1 km 程度の平坦地であり（図 2）、かつては茅場と呼ばれた沼地で牛の草刈り場、カヤ切り場としてしか利用できない荒れ地であった。1892（明治 25）年 10 月に開発事業が起工され、5 年かけて水田化された（岡村、2004）。

ボーリング地点から最も近い（南南東 2.8 km）気象観測点である阿蘇乙姫（標高 497 m）での 1979 ～ 2000 年の気象観測データ（平年値）に

図 1 阿蘇市三久保千町無田ボーリング地点の位置。

国土地理院発行 1:25,000 地形図「坊中」の一部を使用。経緯度は WGS84 による。内牧温泉付近の三角印は岩内・長谷 (1992) の花粉分析地点。

Fig. 1 Location of Senchomuta drilling site in Asodani Valley, northern part of Aso caldera. Part of “Bochu” 1:25000 topographic map published by the Geographical Survey Institute was used. Longitude and latitude are shown as WGS84. Solid triangle indicates location of pollen analysis by Iwauchi and Hase (1992).

よれば、年平均気温は 12.7℃、最寒月（1 月）と最暖月（8 月）の平均気温はそれぞれ 1.8℃と 23.7℃、また年降水量は 2,861 mm と多雨であり、梅雨期の 6 月と 7 月にはそれぞれ 600 mm 程度の降雨がある。

III. ボーリングコアの層序と年代

前述した調査地点において 2008 年 2 月に機械ボーリングを実施し、深度 23 m、径 86 mm のコアを採取した。このコアの堆積物層序の概要を以下に述べる。

表層から 8.04 m 深までは、全体的にヨシなどの植物遺体を含む黒色（10YR1.7/1 ~ 2/1; マンセル方式の標準土色帖による色調）のシルト質堆

積物となっている（図 3）。2.06 ~ 2.26 m 深には黒色（10YR2/1）～黒褐色（10YR2/3）の火山灰層、5.09 ~ 5.61 m 深にはオリーブ黒色（5Y3/2）～灰オリーブ色（5Y4/2）火山灰層が含まれる。また、6.54 ~ 6.67 m 深には 7.3 cal ka (^{14}C 年代の較正結果; 奥野, 2002) に降下した広域テフラである鬼界アカホヤ火山灰（長友・庄子, 1977; 町田・新井, 1978, 2003; 略称 K-Ah）が挟在している。8.04 ~ 10.16 m 深は黒色（2.5Y2/1）～黒褐色（2.5Y3/1）を呈する砂層（厚さ 1 ~ 3 cm のシルト層が 4 層挟在）で、10.16 ~ 12.08 m は黒色（2.5Y2/1）砂層と黒褐色（2.5Y3/1）シルト層の互層となっている。その下位の 12.08 ~ 23.0 m 深は黒色（2.5Y2/1）～オリーブ黒色（5Y2/2）

図 2 ボーリング地点の状況（阿蘇市三久保千町無田）。
カルデラ壁斜面から南側を向いて撮影。

Fig. 2 Southern view of Senchomuta marsh in the northern part of Aso caldera, showing the drilling site.

を呈する，全体的に締まったシルト～粘土層であった。

今回のボーリングコアで年代がわかる層準としては K-Ah しか確認できなかったため，4.69 ～ 4.71 m 深に含まれる微粒炭，12.25 ～ 12.26 m 深および 22.97 ～ 22.98 m 深の有機質堆積物を採取して加速器質量分析（AMS）法による ^{14}C 年代測定を実施した（表 1）。分析はすべて米国 Beta Analytic 社に依頼し，微粒炭試料は酸-アルカリ-酸洗浄，有機質堆積物については酸洗浄を行って炭酸塩を除去し，残存した全有機炭素を年代測定に使用した。 ^{14}C 年代の算出には，Libby の半減期 5,568 年を使用し， $\delta^{13}\text{C}$ ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) 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 IntCal04 (Reimer *et al.*, 2004) を使用し，Talma and Vogel (1993) による数学的近似を行っている。

4.69 m 深から採取された微粒炭試料の補正 ^{14}C 年代は $5,290 \pm 50$ yrs BP (Beta-248317) であった。また，12.25 m 深および 22.97 m 深の有機質堆積物からは，それぞれ $7,970 \pm 60$ yrs BP (Beta-246468) と $10,010 \pm 40$ yrs BP (Beta-

247887) という補正 ^{14}C 年代が得られた。これらの年代値を暦年代較正すると約 6.1 cal ka, 8.9 cal ka, 11.4 cal ka となり，K-Ah との層序関係とも矛盾しない（図 4）。

本研究では，今回年代が明らかになった 4.69 m 深 (6.1 cal ka)，6.54 ～ 6.67 m 深 (7.3 cal ka; K-Ah)，12.25 m 深 (8.9 cal ka)，22.97 m 深 (11.4 cal ka) を基準として，砂層や火山灰層のようにごく短時間に堆積したと考えられる層の堆積時間を 0 年（図 4 で鉛直線の部分）とし，シルト～粘土層の堆積時間を各層位（0 ～ 4.69 m 深，4.69 ～ 6.54 m 深，6.67 ～ 12.25 m 深，12.25 ～ 22.97 m 深）ごとにそれぞれ一定と仮定してボーリングコア全体の年代を推定した。この方法によると，シルト～粘土層の堆積速度は 12.25 ～ 22.97 m 深で 4.24 m/ky と著しく速く，0 ～ 4.69 m 深で 0.73 m/ky と遅くなっている。

このボーリングコアから基本的に 0.5 m 間隔で分析試料を採取したが，層相が異なる場合にはさらに細かくサンプリングした。採取した全試料数は 54 点である。

IV. 分析方法

前述のボーリングコアから採取した 54 点の試

図 3 阿蘇谷千町無田ボーリングコアの堆積物層序と粒度組成，炭素含有量，植物珪酸体総数，微粒炭量の鉛直方向の変化。粒度組成は Malvern 社 Mastersizer S を用いた湿式分散法による分析値である。年代は ^{14}C 年代の暦年較正結果である。鬼界アカホヤ火山灰の年代は奥野 (2002) による。

Fig. 3 Stratigraphy of the drilling core and vertical variations in grain size, carbon content, phytolith concentration and amount of macroscopic charcoal particles. Grain-size compositions were determined by laser light scattering under wet dispersion conditions, using Malvern Instruments Mastersizer S. The age (calibrated ^{14}C dates) of Kikai Akahoya tephra (K-Ah) is from Okuno (2002).

表 1 阿蘇谷千町無田ボーリングコア中の微粒炭および堆積物の加速器 ^{14}C 年代測定結果。

Table 1 Results of AMS ^{14}C age determinations for charcoal and organic sediments included in the Senchomuta drilling core, Asodani Valley.

Sampling depth	Sample	^{14}C age* (yrs BP)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Conventional ^{14}C age** (yrs BP)	Lab code	Calibrated result*** (2 σ : 95% probability)
4.69 m	charcoal	5,390 $\pm$ 50	-31.3	5,290 $\pm$ 50	Beta-248317	6,200-5,930 cal BP
12.25 m	organic sediment	7,930 $\pm$ 60	-22.3	7,970 $\pm$ 60	Beta-246468	9,010-8,610 cal BP
22.97 m	organic sediment	10,000 $\pm$ 40	-24.5	10,010 $\pm$ 40	Beta-247887	11,710-11,300 cal BP

* ^{14}C ages were analyzed based on the Libby's ^{14}C half life of 5,568 years.

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

*** Using the program (Talma and Vogel, 1993) based on the IntCal04 calibration database (Reimer *et al.*, 2004).

図 4 ボーリングコアの深度と年代の関係。各年代は較正暦年代で、0～4.69 m 深、4.69～6.54 m 深、6.67～12.25 m 深、12.25～22.97 m 深ごとにシルト～粘土層の堆積速度をそれぞれ一定と仮定してコア全体の年代を推定した。破線は過去 11,000 年間の平均堆積速度を示す。

Fig. 4. The relationship between age and depth of Senchomuta drilling core from Asodani Valley. All ages in the figure are calibrated ^{14}C ages. Ages were assumed from average accumulation rates of silty to clayey layers at 0-4.69 m, 4.69-6.54 m, 6.67-12.25 m and 12.25-22.97 m depth. Dashed line denotes average accumulation rate of lake and fluvial sediments in the last 11 cal ka.

料について、粒度組成、炭素含有量を測定するとともに、37 試料の植物珪酸体分析と 32 試料の微粒炭分析を行った。

1) 粒度分析

試料 0.5～1.0 g 程度をビーカーにとり、少量の水を加えた後、過酸化水素水 (30%) を加えて攪拌した。そして、ほとんど反応がみられなくなるまで過酸化水素水の添加を繰り返した (約 1 週間)。こうして有機物の分解を行った試料を、レーザー回折式粒度分布測定装置 (Malvern 社製 Mastersizer S) を用いた超音波照射下での湿式分散法 (分散剤未使用) で粒度分析を行った。なお、分析結果は碎屑性堆積物の粒度階区分 (Wentworth, 1922) を使用して粘土 (< 1/256 mm)、シルト (1/256～1/16 mm)、砂 (1/16～2 mm) 画分の割合を算出した。

2) 炭素含有量測定

風乾した試料をメノウ乳鉢で粉碎した後、20～90 mg 程度スズ箔に封入し、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、全炭素含有量 (%) を定量した。さらに、その分析値を 105℃ で絶乾して求めた乾物率で補正を行った。

3) 植物珪酸体分析

植物珪酸体の抽出と定量は、プラント・オパール定量分析法 (藤原, 1976) に従って、つぎの手順で行った。(1) 試料を 105℃ で 24 時間乾燥 (絶乾)、(2) 試料約 1 g に対し直径約 40 μm の

ガラスビーズを約 0.02 g 添加（電子分析天秤により 0.1 mg の精度で秤量，約 30 万個），（3）電気炉灰化法（550℃で 6 時間）による脱有機物処理，（4）超音波水中照射（300 W，42 KHz，10 分間）による分散，（5）沈底法による 20 μ m 未満の微粒子除去，（6）乾燥，（7）封入剤（オイキット）中に分散してプレパラート作成，（8）検鏡・計数。

同定と定量は，400 倍の偏光顕微鏡下で，おもにイネ科植物の機動細胞に由来する植物珪酸体を対象とし，計数はガラスビーズ個数が 400 以上になるまで行った。これは，ほぼプレパラート 1 枚分の精査に相当する。試料 1 g あたりのガラスビーズ個数に，計数された植物珪酸体とガラスビーズ個数の比率をかけて，試料 1 g 中の植物珪酸体個数を求めた。なお，本研究における植物珪酸体の主な分類基準等については，藤原（1976），藤原・佐々木（1978），近藤・佐瀬（1986），杉山・藤原（1986），杉山ほか（1988），杉山（1999），を参照されたい。また，タケ亜科植物の分類に関しては，鈴木（1996）にしたがった。

4) 微粒炭分析

微粒炭量の測定には「篩い分け法」を用い，井上（2007）を参考に合計 32 試料について以下の手順で 125 μ m 以上の微粒炭を計数した。湿潤試料 0.40 ～ 1.49 g を秤量し，10%水酸化カリウム水溶液に浸して 24 時間放置（常温）した後，目開き 125 μ m の金属製篩で水洗篩別した。篩の上の残渣を回収して 5%ヘキサメタリン酸水溶液に常温で 24 時間浸して分散させ，目開き 125 μ m の金属製篩で水洗篩別した。篩の上の残渣を 1%過酸化水素水に常温で 24 時間浸して植物遺体などを分解・漂白・分散させた後，目開き 125 μ m の金属製篩で水洗篩別した。得られた 125 μ m 以上の残渣物をシャーレに広げ，20 倍の実体顕微鏡下で観察しながら，処理した試料の全量について微粒炭（macroscopic charcoal）を計数した。微粒炭の同定基準は井上ほか（2005）に従って，黒色で植物組織と光反射が認められるものとした。なお，紛らわしいものはピンセットで軽く触れて壊れ方や断面などを観察して同定した。

V. 結 果

千町無田ボーリングコアから採取した試料の各種分析結果を図 3 に示す。

1) 粒度組成

表層から 8 m 深（約 8 cal ka）までの堆積物の粒度組成は，シルト画分を主体として構成されており，その割合は K-Ah を除くと，61 ～ 81%程度であった，粘土画分の割合は 9 ～ 31%で 3 m 深（約 3.8 cal ka）付近までは減少し，それ以深では増加する傾向にあった。また，砂画分も 1 ～ 15%程度含まれていた。

一方，8 ～ 12 m 深（8.9 ～ 8.1 cal ka）の粒度組成は砂画分が主体となり（割合 60 ～ 95%），全体的に粗粒な堆積物であった。10.16 ～ 12.08 m 深（8.9 ～ 8.2 cal ka）では，この砂質堆積物とシルト質堆積物（シルト画分 69 ～ 80%）が互層していた。この層準の粘土画分は大部分が 1 ～ 8%程度と低い割合であった。

さらに下位の 12 ～ 23 m 深（11.4 ～ 8.9 cal ka）のシルト画分の割合は 71 ～ 86%と高く，粘土画分も 8 ～ 27%含まれていた。砂画分は 12 ～ 13 m 深（9 cal ka 頃）にわずかに含まれるだけで，それより深い層準では大部分が 0%であり，全体的にシルト画分を主体とする堆積物であった。

以上をまとめると，千町無田ボーリングコアは 0 ～ 8 m 深（8.1 cal ka 以降）が砂画分をわずかに含むシルト～粘土質堆積物，8 ～ 12 m 深（8.9 ～ 8.1 cal ka）が砂質の堆積物，12 ～ 23 m 深（11.4 ～ 8.9 cal ka）が砂画分をほとんど含まないシルト～粘土質の堆積物で構成されることがわかった。

2) 炭素含有量

0 ～ 8 m 深（8.1 cal ka 以降）における炭素含有量は変化が激しいものの，値が高く下位ほど漸減する傾向にあった。とくに 5.5 m（6.4 cal ka）以浅のほとんどの層準では 10%以上の高い炭素含有量となっており，1.2 m 深（1.6 cal ka）と 4.2 m 深（5.3 cal ka）では 33 ～ 34%というピークを示していた。

8～12 m 深 (8.9～8.1 cal ka) では炭素含有量が 0.4% 以下と低く、砂層間に挟在するシルト～粘土質堆積物にもほとんど炭素が含まれていなかった。12 m 以深 (8.9 cal ka 以前) ではわずかに炭素含有量が増加し、14.2 m 以深 (9.3 cal ka) では 1～4% 程度の炭素含有量を有していた。

3) 植物珪酸体総数と組成

植物珪酸体総数は、上述した炭素含有量と調和した変化傾向が認められた (図 3)。約 6.5 m 深の K-Ah より上位の層準では、一部の層準を除いておおむね 35,000 個/g 以上の植物珪酸体が含まれていた。1.2 m 深 (1.6 cal ka) では本ボーリングコアにおける珪酸体総数の最大値 (約 158,400 個/g) が認められた。一方、6.5～12 m 深 (8.9～7.3 cal ka) では 4,500～35,000 個/g 程度と植物珪酸体総数が低く、9～10 m 深 (8.2 cal ka) ではまったく植物珪酸体が発見できなかった。12 m 以深 (8.9 cal ka 以前) では下位ほど植物珪酸体総数が増加する傾向にあり、5,000～60,000 個/g 程度の値となっていた。

鏡下での観察によって検出されたのは、ほぼすべての層準を通じてイネ科 Gramineae 起源の機動細胞珪酸体、表皮毛起源、棒状珪酸体、その他未分類のもののほか、樹木起源の植物珪酸体であり、その代表的なものを図 5 に示す。0～1 m 深 (1.3 cal ka 以降) においては、ヨシ属 *Phragmites*、ススキ属 *Miscanthus* 型、ウシクサ族 *Andropogoneae* A 型のほか、イネ *Oryza sativa* などの植物珪酸体が発見された (図 6)。2 m 以浅 (2.6 cal ka 以降) ではネザサ節 *Pleioblastus* sect. *Nezasa* 型が表層に向かって漸増する傾向にあった。1～5.5 m 深 (6.4～1.3 cal ka) では多量のヨシ属珪酸体のほか、ススキ属型やジューダマ属 *Coix* 型の珪酸体も検出された。5.7～6.2 m 深 (7～6.5 cal ka) の試料にはミヤコザサ節 *Sasa* sect. *Crassinodi* 型の珪酸体が多く含まれていた。6.4～8 m 深 (8.1～7.3 cal ka) ではススキ属型やヨシ属、ウシクサ族 A 型などが確認された。

8～14 m 深 (9.2～8.1 cal ka) はススキ属型

などの珪酸体が含まれているが、全体的に検出される植物珪酸体の量が少ない。14～23 m 深 (11.4～9.2 cal ka) では植物珪酸体量がやや増加し、ミヤコザサ節型やチマキザサ節 *Sasa* sect. *Sasa* etc. 型などササ属を主体とするタケ亜科 *Bambusoideae* の植物珪酸体が顕著に認められた。その他、ススキ属型やヨシ属、ウシクサ族 A 型の珪酸体も連続して存在していた。また、15 m 以深 (9.5 cal ka 以前) では多量の海綿骨針 *Sponge spicules* が含まれていた。

このように、千町無田ボーリングコアで検出された植物珪酸体の大部分はイネ科起源のものであったが、8～14 m 深 (9.2～8.1 cal ka) を除くと樹木起源の植物珪酸体も少量ながら、ほぼ連続して検出されたことが大きな特徴である。

4) 微粒炭量

微粒炭量は 5 m 深 (6.4 cal ka) より上位の層準で多く、とくに 4～5 m 深 (6.4～5 cal ka) には 6,000 個/g 以上の微粒炭が含まれていた。一方、5 m 深より下位の層準では微粒炭量は急減し、おおむね 300 個/g 以下の少ない量で推移した (図 3)。ボーリングコア基底付近の 21～22 m 深 (11 cal ka 前後) ではわずかに増加し 470～490 個/g 程度の微粒炭が認められた。

最近約 11,000 年間の微粒炭量の変化は、炭素含有量の変化とおおむね調和していて、5 m 以深つまり 6.1 cal ka より若い層準でいずれの量も多くなっており (図 3)、両者の間には密接な関係があると考えられる。炭化物は無機化に対して強い抵抗性をもつとされること (進藤, 2003) から、今回のボーリングコア中の堆積物では多量の微粒炭により高い炭素含有量が保持されている可能性がある。

VI. 考 察

1) 堆積物の層相・堆積環境と水成堆積物を対象とした植物珪酸体分析の解釈

阿蘇谷北西部で採取された千町無田ボーリングコア堆積物の層相から阿蘇谷における最近約 11,000 年間の堆積環境を推定する。

約 11.4～8.9 cal ka の時期の層準 (12.08～

図 5 検出された植物珪酸体の顕微鏡写真。

Fig. 5 Micro-photographs of the phytolith morphotypes distinguished in this study.

23 m 深) は、シルト～粘土質の細粒な堆積物からなっている。砂画分はほとんど含まれないことから、この時期の堆積物はある程度水深のある環

境で形成された湖成堆積物と考えられる。阿蘇谷は過去に複数回湖沼化したことが知られており(渡辺, 2001), 今回のボーリングコア層相と年代

図 6 阿蘇谷千町無田ボーリングコアの植物珪酸体ダイアグラム.

Fig. 6 Phytolith diagram of Senchomuta drilling core in the Asodani Valley.

測定結果から、8.9 cal ka 頃まで千町無田周辺にはカルデラ湖 (intra-caldera lake) が存在したことがわかった。このことは、長谷ほか (2003) が珪藻分析により報告した年代 (約 8,200 yrs BP; ^{14}C 年代) ともおおむね一致している。しかし、このカルデラ湖の形成開始時期については現在のところ不明である。

約 8.9 ~ 8.2 cal ka の時期の堆積物 (10.16 ~ 12.08 m 深) は黒色砂層と黒褐色シルト層との互層で構成されている。そのわずかに下位の 12 ~ 13 m 深で堆積物中の砂画分の割合が増加しはじめることから、9 ~ 8.2 cal ka 頃の時期には先述したカルデラ湖は徐々に浅くなり、洪水に伴う砂層が繰り返し堆積したと推定される。それに続く約 8.2 ~ 8.1 cal ka の時期 (8.04 ~ 10.16 m 深) には黒色砂層がほぼ連続して堆積している。このような砂質堆積物は阿蘇谷で掘削された他のボーリングコアでも認められることから、この時期に阿蘇谷の流域全体で洪水などに伴う大規模な土砂移動が発生したものと考えられる。こうした土砂移動現象が阿蘇火山の噴火活動と関連するものであるかどうかについてはよくわかっていない。

約 8.1 cal ka 以降の堆積物 (0 ~ 8.04 m 深) は砂画分を 10 ~ 25% 程度含むが、シルト~粘土質を主体とする細粒な堆積物からなる。大部分の層準 (とくに 7.3 cal ka 以降) にはヨシなどの植物遺体が含まれていることから、ボーリング地点周辺域は水深の浅い湿地や沼などの環境にあったと推測される。

以上をまとめると、阿蘇谷では最近約 11,000 年間にわたって湖や湿地の環境にあった。今回採取されたボーリングコアの大部分は湖沼堆積物などの水成堆積物で構成されている。一般的に植物珪酸体分析は、テフラ断面などを対象にして乾燥した環境での植生を直接的に推定するために行われてきた。わが国では泥炭層コアの分析例はある (Kawano *et al.*, 2007) が、水成堆積物からなるボーリングコアの植物珪酸体分析についてはほとんど報告がない。一方、海外ではアフリカ中西部 (Alexandre *et al.*, 1997) やタイ北東部 (Kealhofer and Penny, 1998) などの湖で採取されたボーリ

ングコアの植物珪酸体分析が実施されている。Piperno (2001) は植物珪酸体分析の湖成堆積物への適用についてはさまざまな検討が必要であることを指摘し、湖成堆積物に含まれる植物珪酸体の起源と運搬様式を次のように考えている。植物珪酸体の供給は流入河川のある堆積盆の場合には河川からの流入 (流域内の土壌や堆積物の流れ込みを含む) の影響が大きく、流入河川のない堆積盆の場合には現地性 (湿地性) の植物に由来するとされている。また、大きな火災の際などには大気中から植物珪酸体を含んだ植物組織が供給されることも考慮する必要がある。とくに堆積盆の周辺が開けた植生である場合には、閉鎖した森林に囲まれた堆積盆に比べて、大気中から供給される珪酸体量が多くなる可能性が指摘されている。

したがって、今回の阿蘇谷ボーリングコアの植物珪酸体分析結果はつぎのように解釈できると考える。約 11.4 ~ 8.9 cal ka の湖成堆積物と 8.9 ~ 8.1 cal ka の砂層 (一部シルト層) に含まれる植物珪酸体は阿蘇谷の流域全体から流れ込んだものが主体であり、植物珪酸体分析が示す植生は流域全体の植生を反映しているであろう。また、8.1 cal ka 以降の湿地性堆積物中の珪酸体は現地性の植物に由来するもののほか、湿地や沼の周辺域から流れ込んだものも含まれると考えられる。さらに、すべての層準を通じて、Piperno (2001) が指摘する植物珪酸体を含んだ植物組織の飛来物が少量混入することも否定できない。

なお、今回のボーリングコアでは時期によって堆積速度が大きく異なっている。ごく短時間に堆積した砂層では植物珪酸体量は見かけ上少なくなり、逆に長い時間をかけて堆積したシルト層では含まれる植物珪酸体量が多くなる可能性がある。したがって、植物珪酸体総量は直接、植物体量や植被密度を意味するものではないと考えられる。

2) 植物珪酸体分析からみた阿蘇谷における完新世の植生変遷

阿蘇谷北西部の千町無田ボーリングコアからは多量のイネ科起源珪酸体のほか、少量ながら樹木起源の珪酸体も連続的に検出された。一方、阿蘇谷北部の内牧 (今回のボーリング地点の東北東約

1.7 km; 図1の▲印)では、湖成堆積物を主体とする内牧層(長谷・岩内, 1992)のボーリングコア(深さ85.3 m)を対象に花粉分析が行われている(岩内・長谷, 1992)。このボーリングコアについては年代測定が実施されていないが、熊本平野などの花粉分析結果と対比して年代が推定されている。彼らの分析からは全体を通してイネ科草本とともに樹木起源の花粉が多量に検出され、晩水期から後水期にかけて、針葉樹・落葉広葉樹混交林、針葉樹林、落葉広葉樹林、常緑広葉樹林へと森林植生が変化したことが報告されている。本研究で得られた植物珪酸体分析結果だけでなく、岩内・長谷(1992)による花粉分析結果も参考にして、阿蘇カルデラ北半分の阿蘇谷における最近約11,000年間の環境および植生の変遷を考察すると、以下ようになる。

11.4 ~ 8.9 cal ka 頃、阿蘇谷にはカルデラ湖が存在し、流域の斜面の広い範囲(カルデラ床以外の部分)にはミヤコザサ節やチマキザサ節などササ属が優占する植生が存在したものと推定される。ササ属は草原の優占種である一方で、林床植生の主要構成要素でもあることから、この時期の植生としては、ササ属草原あるいは林床にササ属を伴う森林が想定される。樹木由来の珪酸体も少量ながら連続して検出されることもカルデラ壁などの急斜面における森林の存在を支持している。斜面の一部ではススキ属を主体とする草原も存在していたと考えられる。岩内・長谷(1992)の分析結果では、ヨモギ属 *Artemisia* の花粉が多量に検出されており、ヨモギ属は乾燥した明るい環境に生育することから、ススキ属草原のような開けた植生環境が阿蘇谷流域のある程度の範囲に広がっていたものと推察される。さらに、カルデラ床の湖周辺部ではヨシ属も生育していたと考えられる。

約8.9 ~ 8.1 cal ka の時期の阿蘇谷では大規模な土砂移動現象が複数回発生し、8.1 cal ka 以降は水深の浅い沼地や湿地の環境にあったと推定される。8.1 cal ka 以降の層準でも連続的にススキ属型の植物珪酸体が顕著に検出され、8.9 cal ka 以前と同様に阿蘇谷流域の一部の斜面ではススキ

属が優占する草原が広がっていたと考えられる。とくに、ススキ属型の珪酸体が最も多く含まれる4.7 m 深の試料(約6.1 cal ka)は微粒炭量の最大値を示しており、それより上位の層準でも多量の微粒炭が認められることから、阿蘇谷流域でのススキ属草原の存在は火災の発生と密接な関係があることがうかがえる。一方、カルデラ床内の湿地や沼地ではヨシ属が多量に生育していた。7.3 ~ 6.5 cal ka 頃にはミヤコザサ節型の珪酸体が急増しており、斜面ではササ属を主体とする植生(ササ属草原あるいは林床にササ属を伴う森林)が拡大したと考えられるが、この理由についてはよくわからない。一方で、3.2 cal ka 以降はササ属の珪酸体がほとんど検出されない。こうしたササ属珪酸体の減少は、約6 cal ka 以降の微粒炭量の増加と対応することから、多発した火災の影響を受けてササ属を主体とする植生は衰退した可能性がある。その後、2.8 cal ka 頃からササ属と入れ替わるようにネザサ節型の植物珪酸体が増加するという変化もみられる。また、約6 ~ 1.3 cal ka にはジュズダマ属型の珪酸体もほぼ連続して認められていることから、千町無田の周辺域は1.3 cal ka 頃まで湿地的な環境にあったと推察される。さらに、8.1 cal ka 以降の堆積物中には樹木由来の珪酸体も少量ながら連続して検出されることから、カルデラ壁などの急斜面には森林が存在した可能性がある。

ヨシ属とジュズダマ属はともに湿地や水辺に生育する植物であるが、今回のボーリングコアでは、ヨシ属の植物珪酸体は約8 ~ 12 m 深の砂層を除くほぼすべての層準で確認されたのに対し、ジュズダマ属型の珪酸体は1 ~ 5 m 深の層準でしか検出されなかった。ジュズダマ属植物は、インドなど熱帯アジア原産で食用作物として渡来した帰化植物であり、わが国には栽培種のハトムギと野生種のジュズダマがおもに分布している。ハトムギは江戸時代の享保年間(1716 ~ 1736年)に中国より伝来したとされているが、ジュズダマについては少なくとも約1,000年前にはわが国に存在したことがわかっているだけで具体的な伝来時期・方法は不明である(村上, 1966)。考古学

的研究からは、熊本市の石の本遺跡で出土した天城式土器（縄文時代後期末）のハトムギ圧痕が報告されている（山崎, 2007）。また、鹿児島県霧島市上野原遺跡では桜島 13 テフラ（約 1.06 cal ka; 奥野, 2002）の直下層からジュズダマ属型の植物珪酸体が検出され（杉山, 1999）、鹿児島大学構内遺跡でも縄文時代中期の泥炭層からイネとともにジュズダマ属型の珪酸体が発見されている（杉山, 2000）。これらの事実から、ジュズダマ属植物は縄文時代にはすでにわが国に伝来していたものと考えられる。今回分析した阿蘇谷ボーリングコアで 6.1 ka より上位の層準にジュズダマ属型の植物珪酸体が検出されること（図 6）は、縄文時代前期にはすでにジュズダマ属植物が阿蘇地域へ持ち込まれていた可能性を示すのかもしれない。なお、ジュズダマ属型珪酸体が出現する層準付近から上位でヨシ属珪酸体が増加するのは、千町無田が湿地になってヨシ属が繁茂し、現地性の植物珪酸体の供給量が増えたためと推察される。

0 ~ 1 m 深の試料からはイネの植物珪酸体が明瞭に確認されており、このことは千町無田で明治時代以降に行われた水田耕作を反映しているものと考えられる。

3) 阿蘇カルデラ内外における植生環境の違い

これまで阿蘇カルデラ周辺域における植生変遷については、カルデラ東西のテフラ断面を対象にした植物珪酸体分析による研究が行われてきた。宮縁・杉山（2006）はカルデラ東方域で過去約 3 万年間にわたってイネ科草本を主体とする植生が継続していたことを明らかにするとともに、最近 13,500 年間は一貫してススキ属草原が優占する草原植生が続いていたという結果を得ている。また、宮縁・杉山（2008）は阿蘇火山南西麓においてもササ属などイネ科草本が優占する植生が最近約 3 万年間続いており、完新世ではササ属-メダケ属草原が存在したことを報告している。さらに、山田ほか（1997）も阿蘇火山西麓で過去 3 万年間にわたる草原植生の継続を明らかにしている。本研究から推察される阿蘇谷流域での完新世の植生環境は、カルデラ東方域と西方域での分析結果を合わせたような結果となっている。つま

り、ミヤコザサ節やチマキザサ節などのササ属を主体とする草原あるいはササ属を林床に伴う森林が広がっていた一方で、ススキ属が優占する草原も存在したことがわかった。

草原の主要構成種であるタケ亜科の消長については、約 3 cal ka 以降にネザサ節などのメダケ属が増加するという変化が認められた。このようなササ属からメダケ属への植生遷移は、わが国の他の地点での植物珪酸体分析によっても確認されており、気候の温暖化に伴う変化と考えられている（杉山, 2001 など）。ただ、阿蘇谷においてはメダケ属が増加する時期は、急激な気候の温暖化が生じたとされる完新世初頭ではなく、7.3 cal ka 以降である。このように、メダケ属珪酸体の増加時期が完新世の開始と一致しない現象は、九州南部の上野原遺跡（杉山, 1999）や都城盆地（井上ほか, 2000）、東海地方東部の愛鷹山麓（佐瀬ほか, 2006）、関東地方南部の相模野台地（佐瀬ほか, 2008）のほか、阿蘇火山南西麓（宮縁・杉山, 2008）においても確認されている。その理由として、佐瀬ほか（2008）は種子繁殖ではなく、栄養体繁殖で分布を拡大するタケ亜科植物が気候変動に速やかに反応できなかったためではないかと考えている。今回のボーリングコアではネザサ節型の珪酸体は完新世前期にもわずかに出現するが、最近約 3,000 年間に急増している。ネザサは採草や放牧等による被圧に強いとされていること（伊藤, 1966; 沼田, 1966）から、完新世後期にみられるネザサ節の増加は人間活動の影響を示しているのかもしれない。

ススキ属草原については、宮縁・杉山（2006）は阿蘇カルデラ東方域での 13,500 年間にわたるススキ属草原継続の理由を人による野焼き（火入れ）の影響と考えている。実際に阿蘇地域の草原は、長年にわたる採草・放牧・火入れにより発達・維持されてきており（宮脇, 1981, p.238-239）、とくに野焼きは少なくとも 15 世紀中頃 ~ 16 世紀末頃の^{しものかり}下野狩（阿蘇社の宗教行事の一つとして阿蘇カルデラ北西部で実施された狩猟）時に行われていたことがわかっている（阿蘇品, 1999, p.183-189）。阿蘇地域における具体的な野

焼き開始時期は明らかではないが、阿蘇谷流域の尾根部にあたる北側カルデラ壁の大観峰^{だいかんぼう}付近では9.7～9.5 cal ka 頃より上位の土層中に草本植物起源と考えられる微粒炭が多量に存在するという報告（小椋ほか, 2002）もあり、阿蘇谷周辺の斜面やカルデラ東方域などでは1万年前頃より野焼きが行われてススキ属草原が維持されていた可能性が考えられる。本研究では微粒炭分析も実施したが、微粒炭量のピークとススキ属型珪酸体が最も多く含まれる層準（4.7 m 深; 約 6.1 cal ka）が一致することもススキ属草原の存在と野焼きには密接な関係があることを支持している。しかしながら、小椋ほか（2002）や本研究で認められた微粒炭が野焼きに起因するものかどうかは今後十分に検討しなければならない。

一方、今回の阿蘇谷ボーリングコアで確認された植物珪酸体の大部分はイネ科起源のものであったが、一部の層準を除くと樹木起源の植物珪酸体も少量ながら、ほぼ連続して検出された。このことはカルデラ外での植物珪酸体分析では明瞭に見出されていなかった知見であり、岩内・長谷（1992）による内牧層の花粉分析結果とも調和している。本研究の植物珪酸体分析結果では樹種構成を明らかにできなかったが、岩内・長谷（1992）の分析ではコナラ亜属 *Quercus* subgen. *Lepidobalanus* やクマシデ属 *Carpinus*、ニレ属 *Ulmus* またはケヤキ属 *Zelkova*、エノキ属 *Celtis* などの花粉が顕著に認められることから、これらの樹種を主体とした森林が阿蘇谷流域の一部で完新世の時期に連続して存在したと推定される。

これまでの珪藻分析結果（長谷ほか, 2003）や本研究によって、阿蘇谷内では8.9 cal ka 頃まで湖が存在し、その後も沼や湿地などの環境が続いたことが判明した。そのことを反映して、阿蘇火山周辺の旧石器遺跡の大部分はカルデラ外に存在している（木崎, 1985; 阿蘇の狩人の会, 1998; 小畑ほか, 2001）。縄文時代になってもカルデラ壁の斜面などに遺跡が存在する程度で、阿蘇谷の中央部に遺跡が出現するのは弥生時代になってからである（隈, 1999, p.88 など）。カルデラ周辺域は古い時代から人間活動が認められるのに対し、

カルデラ内への人々の進出は縄文時代晩期以降に限られるようである。人間活動の影響を強く受けたカルデラ周辺には、ササ属やススキ属からなる草原が広がり、人為が及びにくいカルデラ壁などの急斜面には林床にササ属を伴う森林が存在した可能性は高い。

VII. おわりに

本論では阿蘇カルデラ北半分の阿蘇谷で採取されたボーリングコアの植物珪酸体および微粒炭分析結果をもとに、阿蘇谷流域における最近約11,000年間の環境・植生変遷を考察した。阿蘇谷には約9 cal ka まで湖が存在したが、8.9～8.1 cal ka 頃の時期に流域全体で洪水などに伴う大規模な土砂移動が発生して多量の砂層が堆積した。その後の阿蘇谷は湿地や沼などの環境にあったと推定された。11～9 cal ka 頃までの時期はミヤコザサ節やチマキザサ節などのササ属を主体とする草原あるいはそれらを林床に伴う森林などの植生が流域の斜面に広がり、ススキ属を主体とする草原も11 cal ka 以降、ほぼ連続的に存在した。微粒炭量は約6 cal ka 以降の層準で増加し、そのピークとススキ属型珪酸体が最も多く含まれる層準が一致することからススキ属草原の存在と火災の発生には密接な関係があることが示唆された。また、阿蘇谷のカルデラ床に存在した湖の辺縁部や沼・湿地ではヨシ属が連続して存在したことが判明した。

今回の阿蘇谷ボーリングコアでは一部の層準を除くと、樹木起源の植物珪酸体も少量ながら、ほぼ連続して検出された。このことは岩内・長谷（1992）による花粉分析結果とも調和しており、カルデラ壁などの急斜面では森林が存在したことを示すものと考えられる。ただ、今回の植物珪酸体分析では樹種構成やその変遷を明らかにすることができなかったため、今後は千町無田ボーリングコアの花粉分析も実施して検討する必要がある。さらに、筆者らは現在、阿蘇谷内の複数の地点で植物珪酸体などの分析を進めており、地点別あるいは流域全体での環境・植生変遷を議論する予定である。

謝 辞

御所浦白亜紀資料館の長谷義隆館長にはボーリング地点の選定とコア採取に尽力していただくとともに、阿蘇カルデラにおける環境変遷について活発に議論していただいた。ボーリング作業実施にあたっては、株式会社アバンスの工藤 伸氏、野崎ボーリングの野崎洋一氏と谷川智洋氏に多大なご尽力をいただいた。ボーリング地点の土地所有者である阿蘇市三久保の岩下西雄氏には作業の実施を快諾していただいた。別府大学文学部の飯沼賢司教授と熊本大学教育学部の春田直紀准教授には、さまざまなご配慮をいただいた。炭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。分析試料の調製では熊本大学大学院社会文化科学研究科の神川めぐみ氏にご協力いただいた。また、佐瀬 隆氏と匿名査読者には本論を改稿する上で貴重なご意見をいただいた。以上の方々に厚く御礼申し上げます。なお、本研究は総合地球環境学研究所プロジェクト「日本列島における人間-自然相互関係の歴史的・文化的検討」(リーダー湯本貴和)の経費を使用して行ったものである。

文 献

- Alexandre, A., Meunier, J.-D., Lezine, A.-M., Vincens, A. and Schwartz, D. (1997): Phytolith: Indicators of grassland dynamics during the late Holocene in intertropical Africa. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **136**, 213-229.
- 阿蘇の狩人の会 (1998): 阿蘇周辺地域における旧石器文化新資料の紹介—その1—。肥後考古, **11**, 117-134.
- 阿蘇品保夫 (1999): 阿蘇社と大宮司—中世の阿蘇—。一の宮町史編纂委員会編: 一の宮町史自然と文化阿蘇選書2。熊本県一の宮町。
- 藤原宏志 (1976): プラント・オパール分析法の基礎的研究 (1) —数種イネ科栽培植物の珪酸体標本と定量分析法—。考古学と自然科学, **9**, 15-29.
- 藤原宏志・佐々木 章 (1978): プラント・オパール分析法の基礎的研究 (2) —イネ (*Oryza*) 属植物における機動細胞珪酸体の形状—。考古学と自然科学, **11**, 9-20.
- 長谷義隆・岩内明子 (1992): 中部九州の湖成層を含む上部新生界の対比—熊本・大分地域—。熊本大学教養部紀要 (自然科学編), **27**, 69-95.
- 長谷義隆・打越山詩子・岩内明子・宮崎敬士 (2003): 熊本県阿蘇カルデラ阿蘇谷の最終氷期後期以降の水環境変遷。熊本大学理学部紀要 (地球科学), **17** (2), 15-26.
- 井上 淳 (2007): 火災史を考える上での macro-charcoal 研究の重要性和分析方法—日本の火災史研究におけるその役割—。植生史研究, **15**, 77-84.
- 井上 淳・高原 光・千々和一豊・吉川周作 (2005): 滋賀県曾根沼堆積物の微粒炭分析による約 17,000 年前以降の火事の歴史。植生史研究, **13**, 47-54.
- 井上 弦・杉山真二・長友由隆 (2000): 都城盆地の累積性黒ボク土における有機炭素含量と植物珪酸体。ペドロジスト, **44**, 109-123.
- 伊藤秀三 (1966): わが国の山地草原におけるササおよびネザサの生態について。草地生態, **7**, 34-41.
- 岩内明子・長谷義隆 (1992): 熊本平野および阿蘇カルデラ地域における最終氷期以降の植生変遷。日本花粉学会会誌, **38**, 116-133.
- Kawano, T., Takahara, H., Nomura, T., Shibata, H., Uemura, S., Sasaki, N. and Yoshioka, T. (2007): Holocene phytolith record at *Picea glehnii* stands on the Dorokawa Mire in northern Hokkaido, Japan. *The Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyu)*, **46**, 413-426.
- Kealhofer, L. and Penny, D. (1998): A combined pollen and phytolith record for fourteen thousand years of vegetation change in northeastern Thailand. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **103**, 83-93.
- 木崎康弘 (1985): 遺跡の概観。肥後考古, **5**, 21-34.
- 近藤錬三・佐瀬 隆 (1986): 植物珪酸体, その特性と応用。第四紀研究, **25**, 31-63.
- 隈 昭志 (1999): 長目塚と阿蘇国造—原始・古代の阿蘇—。一の宮町史編纂委員会編: 一の宮町史自然と文化阿蘇選書1。熊本県一の宮町。
- 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—アカホヤ火山灰。第四紀研究, **17**, 143-163.
- 町田 洋・新井房夫 (2003): 新編 火山灰アトラス—日本列島とその周辺。東京大学出版会。
- 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—。日本火山学会 1991 年度秋季大会講演予稿集, 73.
- 宮縁育夫・杉山真二 (2006): 阿蘇カルデラ東方域のテフラ累層における最近約 3 万年間の植物珪酸体分析。第四紀研究, **45**, 15-28.
- 宮縁育夫・杉山真二 (2008): 阿蘇火山南西麓のテフラ累層における最近約 3 万年間の植物珪酸体分析。地学雑誌, **117**, 704-717.
- 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.
- 宮縁育夫・増田直朗・渡辺一徳 (2004): 溶岩流とテフラとの層序関係からみた阿蘇火山中央火口丘群西部地域の発達史。火山, **49**, 267-282.
- 宮脇 昭編 (1981): 日本植生誌 九州。至文堂。
- 村上道夫 (1966): *Coix* 属の改良に関する育種学的研究 XII—ハトムギおよびジュズダマの諸形質の地理的変異—。京都府立大学学術報告 (農学), **18**, 1-7.
- 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—アカホヤの土壌肥科学的研究 (第2報)。日本土壌肥科学雑誌, **48**, 1-7.
- 沼田 真 (1966): アズマネザサ型の草地。富士竹類植

- 物園報告, **11**, 59-64.
- 小畑弘己・岡本真也・古森政次・渡辺一徳・田口清行 (2001): いわゆる「阿蘇産黒曜石」の産地発見とその意義—阿蘇象ヶ鼻産ガラス質溶結凝灰岩露頭の発見—. 旧石器考古学, **62**, 63-76.
- 小椋純一・山本進一・池田晃子 (2002): 微粒炭分析から見た阿蘇外輪山の草原の起源. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, **13**, 236-240.
- 岡村良昭 (2004): 阿蘇町の農業. 阿蘇町町史編纂委員会編: 阿蘇町史, 第1巻通史編, 793-862.
- 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・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・松本惺夫・宮久三千年・寺岡晃司・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.
- Piperno, D.R. (2001): Phytoliths. in *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators* edited by Smol, J.P., Birks, H.J.B. and Last, W.M., Kluwer Academic Publishers, 235-251.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Buck, C.E., Burr, G.S., Cutler, K.B., Damon, P.E., Edwards, R.L., Fairbanks, R.G., Friedrich, M., Guilderson, T.P., Herring, C., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, F.G., Manning, S.W., Ramsey, C.B., Reimer, R.W., Remmele, S., Southon, J.R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F.W., van der Plicht, J. and Weyhenmeyer, C.E. (2004): IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP. *Radiocarbon*, **46**, 1029-1058.
- 佐瀬 隆・加藤芳朗・細野 衛・青木久美子・渡邊眞紀子 (2006): 愛鷹山南麓域における黒ボク土生成史—最終氷期以降における黒ボク土生成開始時期の解説—. 地球科学, **60**, 147-163.
- 佐瀬 隆・町田 洋・細野 衛 (2008): 相模野台地, 大磯丘陵, 富士山東麓の立川-武蔵野ロー層に記録された植物珪酸体群集変動—酸素同位体ステージ5.1以降の植生・気候・土壌史の解説—. 第四紀研究, **47**, 1-14.
- 進藤晴夫 (2003): 土壌中における植物炭化物の分布と重要性. 日本土壤肥科学会講演要旨集, **49**, 218.
- 杉山真二 (1999): 植物珪酸体分析からみた最終氷期以降の九州南部における照葉樹林発達史. 第四紀研究, **38**, 109-123.
- 杉山真二 (2000): 植物珪酸体 (プラント・オパール). 辻誠一郎編: 考古学と植物学. 同成社, 189-213.
- 杉山真二 (2001): テフラと植物珪酸体分析. 月刊地球, **23**, 645-650.
- 杉山真二・藤原宏志 (1986): 機動細胞珪酸体の形態によるタケ亜科植物の同定—古環境推定の基礎資料として—. 考古学と自然科学, **19**, 69-84.
- 杉山真二・松田隆二・藤原宏志 (1988): 機動細胞珪酸体の形態によるキビ族植物の同定とその応用—古代農耕追究のための基礎資料として—. 考古学と自然科学, **20**, 81-92.
- 鈴木貞雄 (1996): タケ科植物の概説. 鈴木貞雄編: 日本タケ科植物図鑑. 聚海書林, 8-27.
- Talma, A.S. and Vogel, J.C. (1993): A simplified approach to calibration ^{14}C dates. *Radiocarbon*, **35**, 317-322.
- 渡辺一徳 (2001): 阿蘇火山の生い立ち—地質が語る大地の鼓動—. 一の宮町史編纂委員会編: 一の宮町史 自然と文化阿蘇選書7, 熊本県一の宮町.
- Wentworth, C.K. (1922): A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, **30**, 377-392.
- 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.
- 山崎純男 (2007): 土器圧痕からみた食と生業. 大手前大学史学研究所編: 考古学リーダー9 土器研究の新視点—縄文から弥生時代を中心とした土器生産・焼成と食・調理—. 六一書房, 134-162.

(2009年2月9日受付, 2009年10月19日受理)