

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

宮 縁 育 夫*^{1,a}・杉 山 真 二*²



阿蘇カルデラ東方域に位置するテフラ断面において、土壌層の各種分析と植物珪酸体分析を行い、最近約3万年間の植生変遷について検討した。土壌層の産状、植物珪酸体総数・組成の変化から、調査断面は下位より Zone 3 (32~30 cal ka), Zone 2 (30~13.5 cal ka), Zone 1 (13.5 cal ka 以降) の3帯に区分された。Zone 3 の時期には、ササ属(おもにミヤコザサ節)を主体とする草原が発達していたが、最終氷期最寒冷期にあたる Zone 2 の時期には、火山活動の活発化もあり、草原植生は衰退傾向にあった。また、完新世の Zone 1 の時期は一貫してススキ属が優占する草原が継続しており、これには人為による火入れが関与していた可能性が示唆された。さらに阿蘇火山周辺域では、母材供給速度が大きいときには褐色土層が、小さいときには黒ボク土層が形成されており、その境界となるテフラ噴出率は0.1~0.2 km³/ky の間にあると推定された。

キーワード：阿蘇カルデラ、植物珪酸体、植生変遷、イネ科草本、ススキ草原

I. はじめに

九州中央部に位置する阿蘇火山とその周辺域には、わが国屈指の面積を誇る草原が広がっている。その広大な草原景観は、この地域の重要な観光資源として活用されてきたが、1960年代頃から畜産業の低迷や農業従事者の減少などによって草原の面積は減少を続けている。近年、環境省・熊本県・各種団体による草原維持のためのさまざまな事業が行われているが、今後の植生管理計画を策定するためには、この地域における過去の植生とその変遷を理解することが必要である。

阿蘇火山周辺域においては、カルデラ内湖沼堆積物の花粉分析により、最終氷期以降の植生変遷に関する研究が行われてきた(長谷・岩内, 1992; 岩内・長谷, 1992)。しかし、花粉分析による研究は、花粉の保存性の問題から湖沼や低湿地、山間の高層湿原などに限定されるため、現在草原が存在する台地上の乾燥した環境での植生を直接的に推定することは難しい。

植物珪酸体(プラント・オパール)は、植物細胞内に

珪酸(SiO₂)が蓄積したものであり、植物が枯れて分解した後もガラス質の微化石となって長期間土壌中に残留している。このため、植物珪酸体分析は低湿地だけでなく、台地や山地などの古植生・古環境の推定に応用されている(杉山, 2000)。こうした観点から、山田ほか(1997)は阿蘇火山西麓の土壌断面において植物珪酸体分析を行い、過去約3万年間にわたってササやススキなどが優占した草原植生が続いていたことを推定している。

火山周辺域の植生は、気候や生物作用(人間活動を含む)以外に、火山活動の影響を強く受けて成立している。その影響は、テフラを母材に植物が関与して生成する土壌にも及んでいる。火山活動が土壌生成に与える影響については、阿蘇火山(渡辺・高田, 1990)、桜島火山(井村, 1995)、都城盆地(井上, 2002)などでの調査事例があるが、定量的な解析を含めて検討すべき問題が残されている。

阿蘇火山は日本で最も活発な火山の一つであり、なかでも膨大な量の降下テフラが堆積する阿蘇カルデラ東方域では、植生量やその構成種とそれらの変遷、土壌生成

2005年6月16日受付。2005年11月12日受理。

*1 森林総合研究所九州支所 〒860-0862 熊本市黒髪4-11-16。

*2 古環境研究所 〒880-0912 宮崎市赤江1417。

*a Corresponding author: yasuo@affrc.go.jp

に及ぼす火山活動の影響がとくに大きいと考えられる。近年、阿蘇カルデラ周辺域ではテフラ層序に関する研究が進展し、鍵層とその年代によって層序の詳細が明らかになっており(宮縁ほか, 2003, 2004), 以上のような問題を解明するための好条件がそろったフィールドとなっている。

そこで、本研究では火山活動の影響が大きい阿蘇カルデラ東方域の代表的なテフラ累層を対象に、土壤層の各種分析と植物珪酸体分析を行った。それらの結果から、同地域の最近約3万年間の植生変遷とその原因、さらに火山活動が土壤生成に及ぼす影響について考察する。

II. 試料採取地点のテフラ層序

調査および試料採取を行った地点(32°54′01.5″N, 131°12′01.1″E, 標高約800m)は、阿蘇カルデラ東方域

の阿蘇火砕流台地上に位置する熊本県阿蘇郡波野村(現阿蘇市波野)大字波野のテフラ断面である(図1)。その断面は、広域基幹林道阿蘇東部線の工事によって生じた高さ約20m(調査時点)の切土のり面である。

この地域の阿蘇火砕流台地(小野ほか, 1977)上には、カルデラ形成直後から活動を継続している阿蘇火山中央火口丘群(小野・渡辺, 1983)起源の降下テフラが厚く堆積しており、Aso-4(約89ka, K-Ar年代: 松本ほか, 1991)以降の全層厚は60m以上に達している。近年、この膨大なテフラの累層について、降下軽石層を主体とした過去約9万年間全体の基本層序が確立された(宮縁ほか, 2003)だけでなく、最近約3万年間に関して、岩相が酷似するスコリア層を含めた詳細な層序が明らかになっている(宮縁・渡辺, 1997; 宮縁ほか, 2004)。

波野村付近においては、約1万年前より古いテフラの

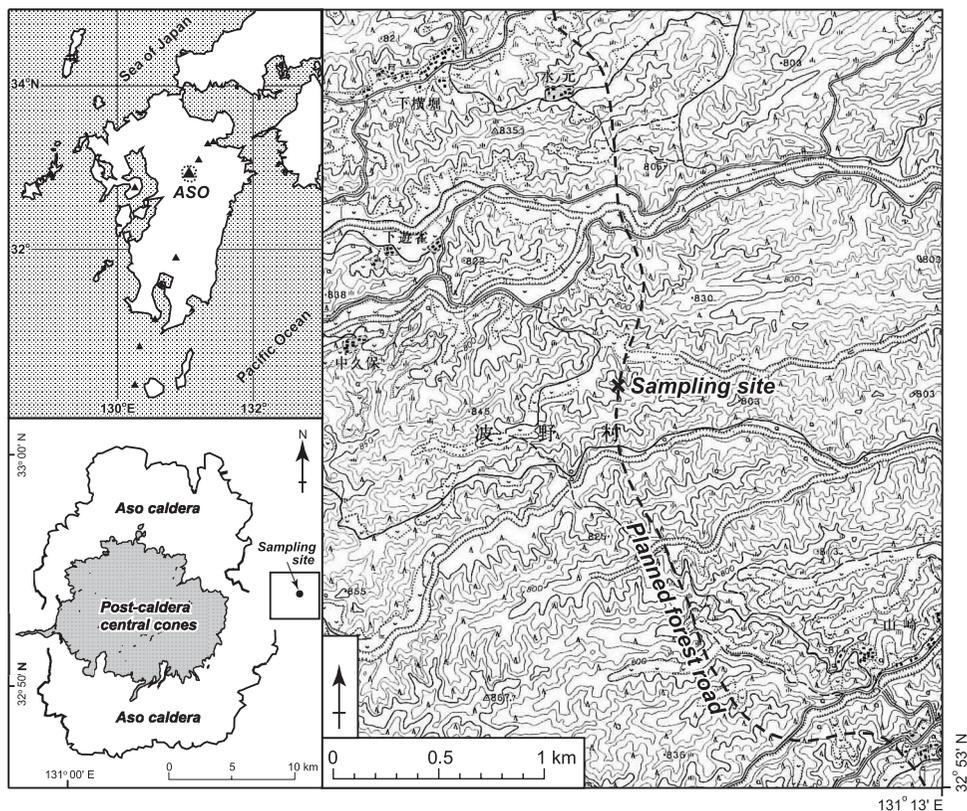


図1 試料採取地点
国土地理院発行1:25,000地形図「根子岳」の一部を使用。経緯度は日本測地系による。

Fig. 1 Location of the sampling site

A part of 1:25,000 topographic map of the Nekodake district published by the Geographical Survey Institute was used. Longitude and latitude are shown as Tokyo Datum.

露出はほとんどみられないが、1995年から開始された広域基幹林道の工事により、いくつかの長大な切土のり面が出現した。本調査地点(宮縁ほか, 2004, A0102地点)も、その切土のり面の一つである。

調査断面の層序の概要(図2, 図3)は次のとおりである。地表から深さ約5.5mまでは、火山灰層が挟在するものの、全体として黒色味が強く腐植に富む黒ボク土層となっており、その基底部の年代は約13.5 cal ka (^{14}C の較正暦年代)である(宮縁ほか, 2004)。この黒ボク土層中には、約1.5m深に3.7 cal kaの杵島岳スコリア(略称 KsS: 中村・渡辺, 1995; 宮縁・渡辺, 1997)、約3.3m深には7.3 cal ka (奥野, 2002)の鬼界アカホヤ火山灰(略称 K-Ah: 長友・庄子, 1977; 町田・新井, 1978, 1992)などの鍵テフラが挟在している。

深さ5.5~15.4m付近までは、厚い火山灰層やスコリ

ア層が多数存在しており、全体的に褐色を呈するテフラの累層となっている。明瞭なテフラとしては、約18~16 cal ka (5.7~8.6 m 深)の山崎第1~第10スコリア(略称 YmS1-YmS10: 上位~下位の順: 宮縁ほか, 2004)、22~21 cal ka (9.7~14.3 m 深)の山崎第15~第20スコリア(略称 YmS15-YmS20: 宮縁ほか, 2004)、さらに約14.8 m 深には29 cal ka (奥野, 2002)の始良 Tn 火山灰(略称 AT: 町田・新井, 1976, 1992)が認められる(宮縁ほか, 2004)。そして、これらのテフラ間には褐色を呈する薄い土壌層(層厚3~15 cm)が挟在している。

AT火山灰の約0.9m下位には、Aso-4以降最大級の火砕噴火の産物である約31 cal kaの草千里ヶ浜軽石(略称 Kpfa: 渡辺ほか, 1982, 層厚138 cm)が存在している(宮縁ほか, 2003)。阿蘇カルデラ周辺域において、Kpfa直下には埋没黒ボク土層が存在することが知られ

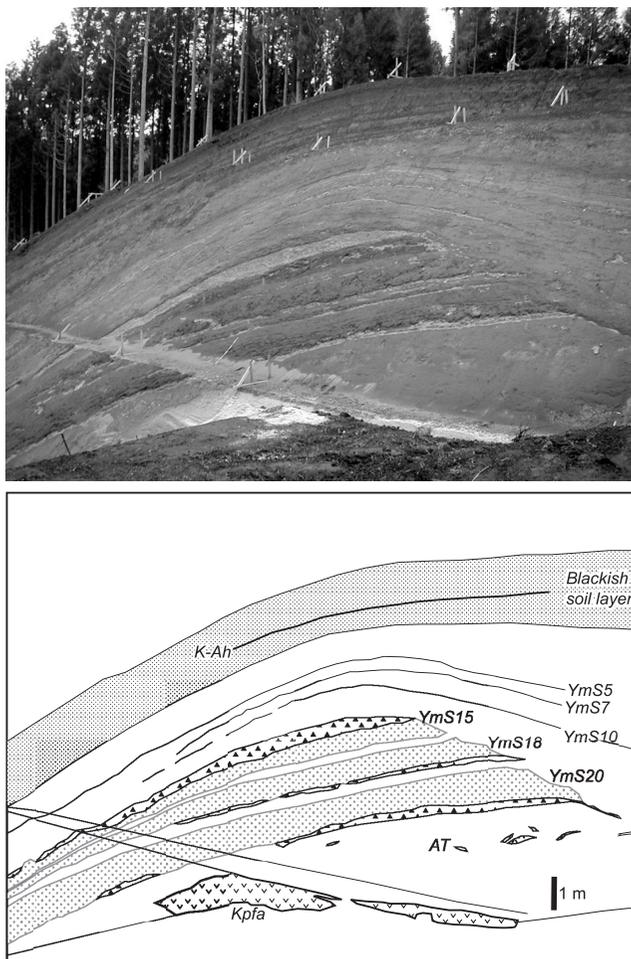


図2 調査断面の状況

Fig. 2 Photograph of the investigated tephra sequence

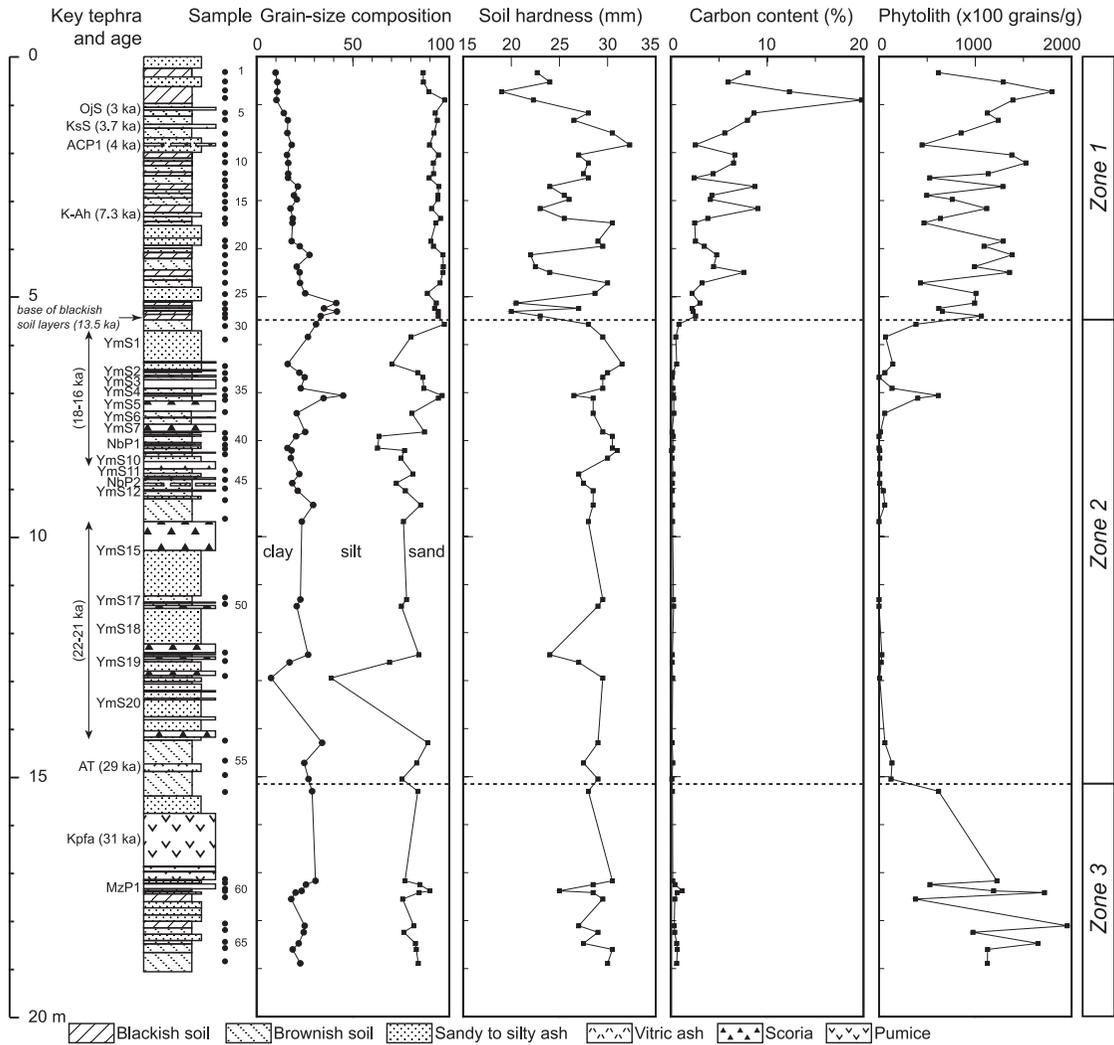


図3 調査断面におけるテフラ層序と粒度組成、硬度、炭素含有量、植物珪酸体総数の鉛直方向の変化
テフラの年代値は ^{14}C の較正暦年代である。

Fig. 3 Tephra stratigraphy of the section and vertical variations in grain size, soil hardness, carbon content and phytolith concentration of sampled soil layers

Grain size compositions were determined by laser light scattering under wet dispersion conditions, using Malvern Instruments Mastersizer S. Soil hardness was measured by the Yamanaka cone penetrometer (Yamanaka and Matsuo, 1962). Ages of key tephra layers are calibrated ^{14}C dates.

ている(渡辺・高田, 1990; 山田・久保寺, 1996). 調査地点においても、深さ17.4~18.2m付近は軽石・火山灰層が挟在する黒褐色を呈する土壤層となっており、その基底部の年代は約32 cal kaと報告されている(宮縁ほか, 2003). さらに下位の18.2~19.1m深は、褐色を呈する土壤層である。

以上のような調査断面において、テフラ(火山灰・スコリア・軽石)間に挟在する土壤層から、67点の試料を採取した。各土壤層中において、色調や産状が変化する場合に細区分し、それぞれから試料を採取するとともに、細区分しない場合でも土壤層の層厚が20cmを超えるときには5~10cm間隔でサンプリングを行った。

今回の調査地がある熊本県波野村は、標高700~800 mに位置することから、西南日本にありながら東北地方南部の低標高地並みの涼やかな気候となっている。熊本地方気象台が波野村役場で1967~1977年に観測した結果の11年平均値によれば、年平均気温は11.8°C、最寒月(1月)と最暖月(8月)の平均気温はそれぞれ1.2°Cと22.8°C、また年降水量は2,321 mmと多雨であり、梅雨期(6~7月)には400 mm/月前後の降雨がある。冬季には、平均11日程度の降雪に見舞われる(波野村史編集委員会, 1998)。なお、調査地点付近における現在の植生はスギ人工林となっている。

III. 分析方法

前述の断面から採取した67点の試料について、粒度組成、炭素含有量を測定するとともに、植物珪酸体分析を行った。また、現地においては、試料を採取した層準の土壌硬度を測定した。

1. 粒度組成

採取した土壌試料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)を用いた湿式分散法で粒度分析を行った。

2. 土壌硬度

土壌硬度は、堆積物の粒度組成、孔隙量、乾燥密度、有機物や結合物質、水分状態などを複合的に反映するとされている(土壌環境分析法編集委員会, 1997, p. 33)。その測定は、山中式土壌硬度計(山中・松尾, 1962)を各土壌層断面に対して垂直に押し込み、指標硬度といわれる貫入量(mm)を読みとった。各層準において得られた5回程度の測定値を平均して、その土壌層の硬度とした。

3. 炭素含有量

風乾した試料をメノウ乳鉢で粉碎した後、50~70 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、その分析値は、オープンで絶乾して求めた乾物率で補正を行った。

4. 植物珪酸体

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)を用いて、次の手順で行った。(1)試料を105°Cで24時間乾燥(絶乾)、(2)試料約1 gに対

し、直径約40 μ m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°C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。

同定と計数は、400倍の偏光顕微鏡下で、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枚分の走査に相当する。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おもな分類基準などについては、藤原(1976)、藤原・佐々木(1978)、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)に従った。

IV. 結果

採取した土壌層の各種分析結果を図3に示す。土壌層の産状、植物珪酸体総数・組成の変化から、調査断面を下位からZone 3(試料57~67)、Zone 2(試料30~56)、Zone 1(試料1~29)の3つの植物珪酸体帯に区分した。Zone 3は黒褐色土壌層と褐色土壌層、Zone 2は褐色土壌層が発達している。またZone 1は全体として黒ボク土層(火山灰層が挟在)からなっている。Zone 2/3間およびZone 1/2間境界の年代は、それぞれ30 cal ka(AT/Kpfa間)と約13.5 cal ka(黒ボク土層基底部で得られた¹⁴C年代の暦年較正結果)である(宮縁ほか, 2003, 2004)。以下、各種分析結果について述べる。

1. 粒度組成と土壌硬度

調査断面における土壌層の粒度組成は、シルト画分を主体として構成されているが、各画分の割合についてはZoneによって差が認められた(図3)。Zone 3においては、層準間の粒度組成の変動が大きい。砂画分の割合はおおむね15~40%であった。また、粘土画分は20%前後を推移していた。Zone 2での粒度組成はZone 3とほぼ同じ傾向となっていた。一方、Zone 1では、砂画分の割合が15%以下と、ほかのZoneに比べて少ないことが特徴である。また、粘土画分は3 cal kaより若い層準で10%程度であったが、下位になるほど漸増して試料26~29では30~40%に達していた。

土壌硬度の変化も粒度組成と同様であり、Zone 1と下位のZoneとの間で差異がみられた。Zone 2以深での

土壌硬度は25~30 mm 程度の高い値を示していたが、上位の Zone 1 では、指標硬度が19~32 mm 間で大きくばらついた。一般的に、硬度が20~25 mm を超える土壌では、植物根の伸長阻害や透水性不良が起りやすいといわれている(土壌環境分析法編集委員会, 1997, p. 35)。13.5 cal ka を境に、古い層準には非常に堅く締まった土壌層が連続して存在するのに対し、新しい層準では硬さの変化に富む土壌層が認められる。

以上の分析・測定結果から、Zone 2, 3 と上位の Zone 1 間では土壌層の性質に顕著な差が認められた。Zone 2~3 では砂画分の割合が大きく(15~40%)、全体的に堅く締まった土壌層となっている。それに対して、Zone 1 の土壌層は砂画分が15% 以下と比較的細粒であり、土壌硬度の変動が大きいくことが特徴である。

2. 炭素含有量

調査断面における炭素含有量の鉛直方向の変化を図3 に示した。Zone 2~3 での炭素含有量はごく一部の層準を除いて、1% 以下の低い値で推移していたが、上位の Zone 1 では2% 以上の値であった。このように、炭素含有量も黒ボク土層の基底にあたる13.5 cal ka の層準を境に、大きな差が認められた。

Zone 3 においては、水ノ元第1軽石(MzP1)直下の試料60~61(黒褐色土壌層)で0.7~1.2%、最下部の試料65~67で0.6~0.7% といった炭素含有量のやや高い部分が存在していた。全体的に褐色を示す Zone 2 では、最上位の試料29~30(炭素含量0.5~0.8%)を除いて、0.1~0.3% と炭素含有量がかなり低かった。一方、Zone 1 における炭素含有量は、下位の Zone に比べて有意に高く、試料4(約1.5 cal ka の中岳N2スコリアが散在する層準)で最大(19.8%)となっており、下位に向かっていくつかのピーク(10% 以下)を示しながら漸減する。

3. 植物珪酸体総数と組成

植物珪酸体総数は、各 Zone で顕著な差が認められた(図3)。最下位の Zone 3 では変動がみられるが、植物珪酸体総数がおおむね50,000 個/g 以上の値を示した。なお、草千里ヶ浜軽石(Kpfa)直下の黒褐色土壌層基底の試料63では、本断面における珪酸体総数のピーク(約200,000 個/g)が認められた。Zone 2 においては、ごく一部の層準で数万個/g の値を示したが、おおむね1,000 個/g 以下と著しく低い値で推移し、植物珪酸体がまったく検出されない層準も多数存在した。Zone 1 では、植物珪酸体総数が再び増加し、大きな変動があるもののおおむね50,000 個/g 以上という高い値となっていた。

鏡下での観察によって検出されたのは、イネ科 Gra-

mineae 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ほか、樹木起源の植物珪酸体である(図4)。分析結果のダイアグラムには、樹木起源およびイネ科の主要な分類群を表示しており、出現がわずかな分類群や未分類、その他は省略した(図5)。

最下位の Zone 3 では、ミヤコザサ節 *Sasa* sect. *Cras-sinodi* 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 の植物珪酸体が多量に認められた。そのほか、ウシクサ族 Andropogoneae A 型の珪酸体も検出されたが、樹木起源はまったく検出されなかった。

Zone 2 において検出される植物珪酸体の量は少なく、一部の試料でウシクサ族 A 型やミヤコザサ節型などのイネ科起源の珪酸体が認められる程度であった。

最上位の Zone 1 では、スキ属 *Miscanthus* 型の珪酸体がすべての試料で多量に検出され、キビ族 Paniceae 型やウシクサ族 A 型の植物珪酸体も連続して認められることが大きな特徴である。また、Zone 1 下部の試料19~29(約13.5~8 cal ka の層準)では、ミヤコザサ節型の珪酸体も出現しているが、上位に向かって減少している。さらに一部の試料では、コナラ属 *Quercus* など由来する樹木起源の珪酸体が認められた。

このように、調査断面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り、樹木起源のものはわずかであった。各 Zone における植物珪酸体総数と炭素含有量との関係は、図6 に示したとおりである。Zone 2 および Zone 3 では明瞭ではないが、Zone 1 においては植物珪酸体総数と炭素含有量の間におおむね正の相関があることがわかる。したがって、少なくとも Zone 1 での土壌中有機物の起源の大部分はイネ科草本であると推定できる。

V. 考 察

1. 植物珪酸体分析からみた阿蘇カルデラ東方域の植生変遷

調査断面での植物珪酸体分析から、阿蘇カルデラ東方域における最近約3万年間の植生および環境の変遷を考察すると、以下ようになる。

約32 cal ka から AT 火山灰降下直前の30 cal ka 頃までの間、この地域ではミヤコザサ節などササ属が優占する草原が存在したと考えられる。樹木由来の植物珪酸体がまったく検出されないことから、この時期に森林はほとんど存在しなかったようである。また、ミヤコザサ節が卓越していることから、当時は寒冷で、降水量の比較

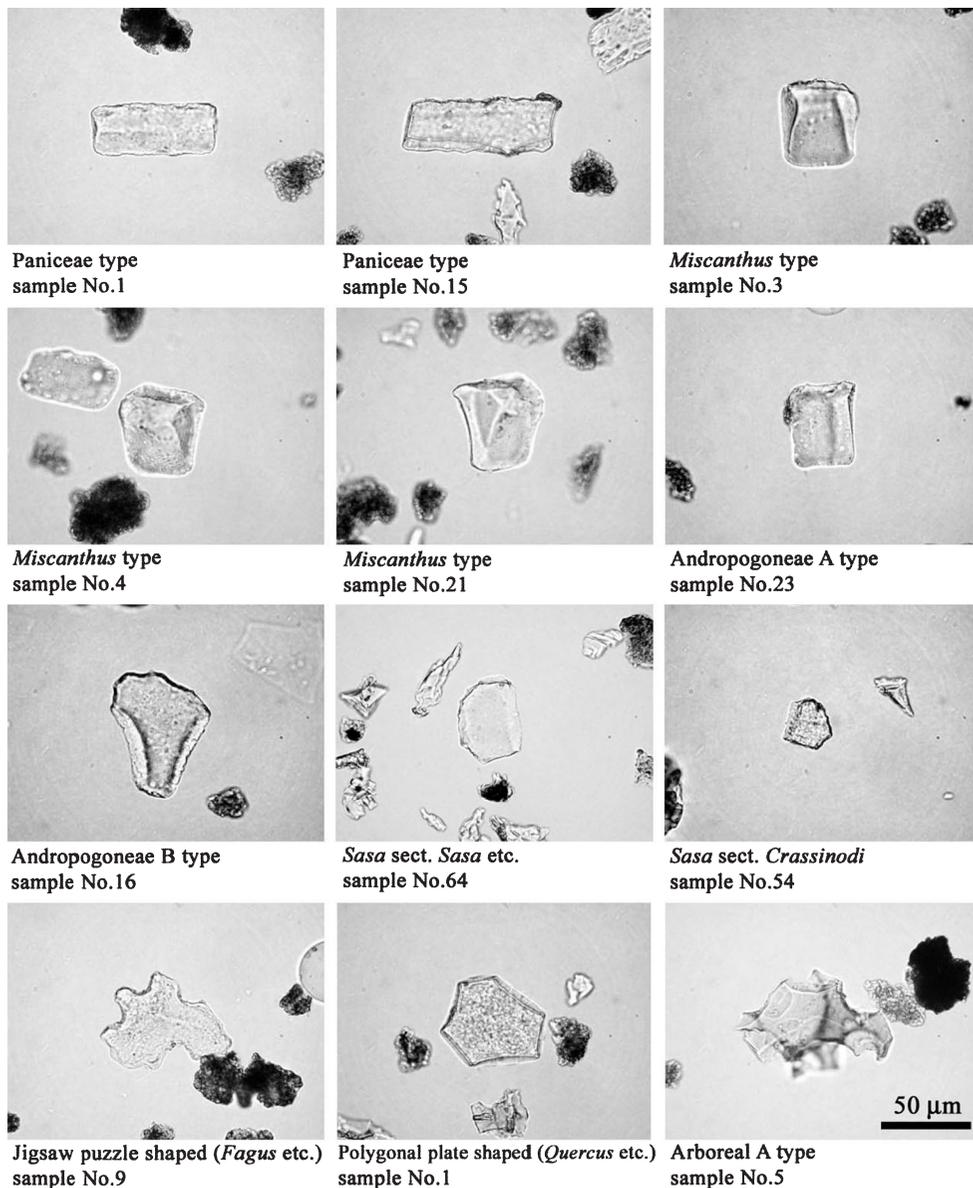


図4 検出された植物珪酸体の顕微鏡写真

Fig. 4 Micro-photographs of the phytolith morphotypes distinguished in this study

的少ない乾燥した環境下にあったのであろう。

約30~13.5 cal kaの土壌層中に含まれる植物珪酸体総数は著しく少ないことから、前述したササ属が優占する草原植生は約30 cal ka以降、急激に衰退し、13.5 cal ka頃まで本地域は植生量が少ない環境下にあったと推察される。日本列島では、酸素同位体変動や地形面の編

年から、AT火山灰堆積直後から15,000年前頃の時期に最も海面が低下したとされている(町田・新井, 1992)。この年代は、九州南部における植物珪酸体分析で得られた最寒冷期の時期とおおむね一致していること(杉山, 2004)から、九州中部でもほぼ同時期に最寒冷化した可能性が高い。したがって、約30~13.5 cal kaにおける植

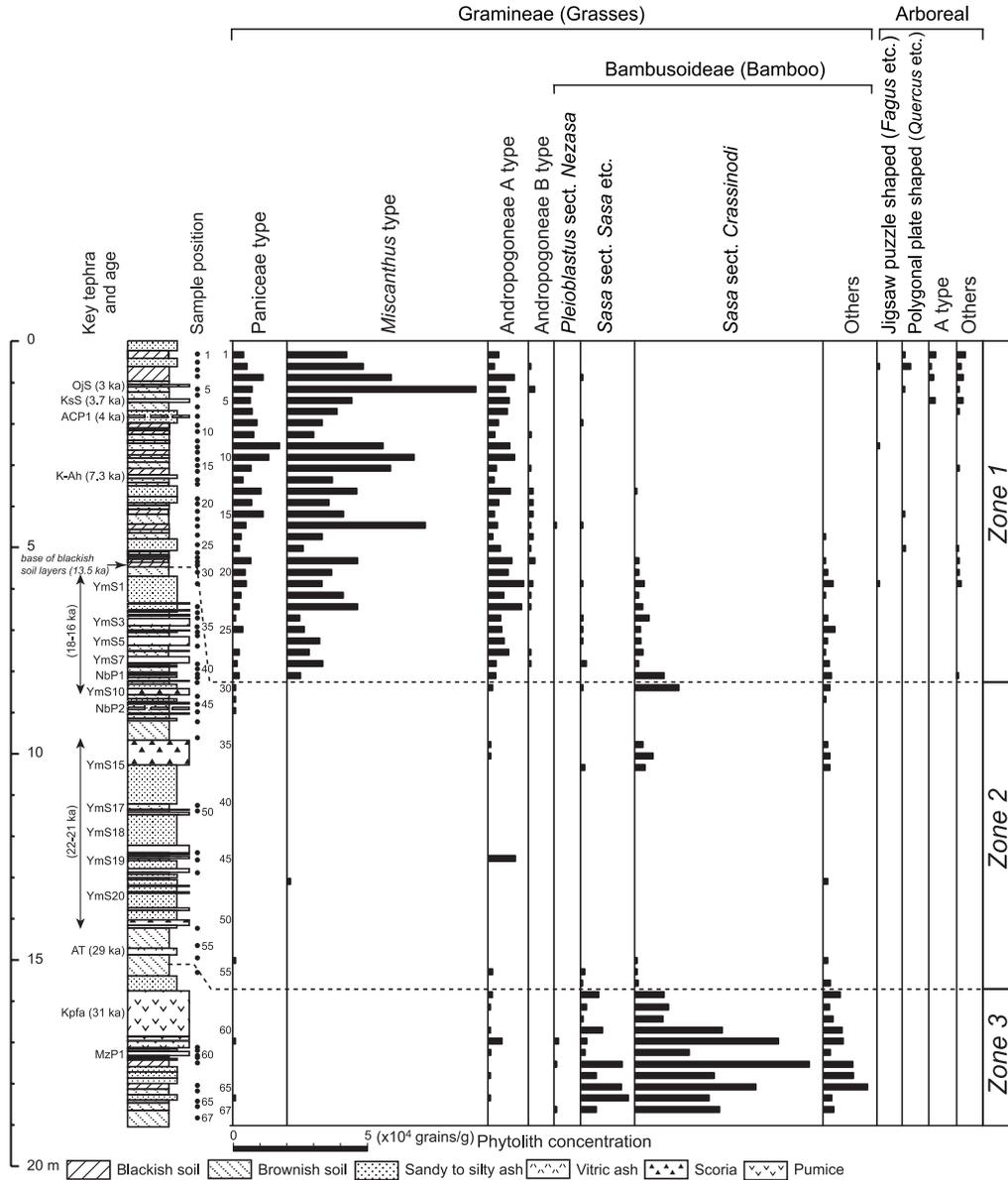


図 5 調査断面における土壌層の植物珪酸体ダイアグラム

Fig. 5 Phytolith diagram of soil layers in the studied section

生の衰退は、最終氷期末期の寒冷化によるものかもしれない。また、阿蘇火山では約 22~16 cal ka の時期に、中岳とその周辺域で爆発的な噴火が間欠的に発生し、カルデラ東方域を中心に多量のテフラ（スコリアと火山灰）が堆積している（宮縁ほか、2004）。気候の寒冷化とともに、急速なテフラの堆積によって、地表では植生が十分

に繁茂できなかった可能性が考えられる。

そうした植生量の少ない環境は約 16,000 年間続いたが、約 13.5 cal ka を境にして、急速に植生量の多い環境へと変化した。初期にミヤコササ節などササ属の侵入が認められるが、約 8 cal ka 以降はほとんどみられなくなる。完新世にあたるこの時期において、調査地付近では

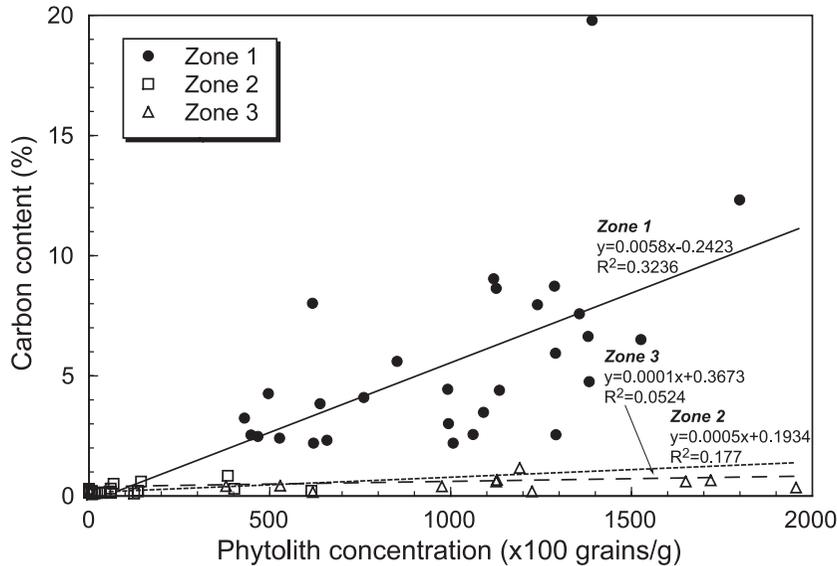


図 6 炭素含有量と植物珪酸体総数との関係

Fig. 6 Relation between carbon content and phytolith concentration

ススキ属を主体としてキビ族やウシクサ族もみられる草原植生が継続して存在したことが明らかとなった。こうした植生量の増加は、完新世の温暖化とともに、阿蘇火山における 13.5 cal ka 以降の火山活動の静穏化(宮緑ほか, 2003, 2004)によって、植生が十分に繁茂できる環境下となったことが原因であろう。

このように、調査地点が最近約 3 万年間にわたって草原植生下にあったという考察は、阿蘇火山西麓で行われた植物珪酸体分析の結果(山田ほか, 1997)とも調和している。しかし、その分析では、最終氷期最寒冷期における植生量の減少や完新世のススキ属の優占という現象は確認されていない。その差異は、両地点間の標高差やそれに伴う植生構成種の違い、さらに彼らの調査地点が火山活動の影響が相対的に小さいカルデラ西方域にあることに起因するものと考えられる。

また、阿蘇カルデラ内に位置する内牧(調査地点の西北西約 16 km)では、ボーリングコア(深さ 85.3 m)の花粉分析が行われている(長谷・岩内, 1992; 岩内・長谷, 1992)。そのボーリングコアでは、全体を通してイネ科草本とともに樹木起源の花粉也多量に検出されている。コア基底付近の年代は 18,000 yrs BP (^{14}C 年代)頃と考えられているので、最終氷期末期から現在までの植生変遷が議論されていることになる。彼らの分析では、下位より針葉樹・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することが示されており、その変化は最終氷期から後氷期への温暖化とも調和している。

しかし、本研究によるカルデラ東方域の植物珪酸体分析では、全体を通して樹木起源の珪酸体がほとんど検出されず、長谷・岩内(1992)や岩内・長谷(1992)が報告した森林植生の変化を見出すことはできなかった。このことは、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。しかし、カルデラ西方域での植物珪酸体分析結果(山田ほか, 1997)も本研究とおおむね一致していることから、長谷・岩内(1992)、岩内・長谷(1992)の花粉分析結果がカルデラ内の植生を反映していると解釈すれば、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大きく異なっていた可能性がある。阿蘇火山周辺で発見された旧石器遺跡の大部分がカルデラ外に存在すること(木崎, 1985; 阿蘇の狩人の会, 1998; 小畑ほか, 2001)からも、カルデラ周辺域は古い時代から人為などの影響を受けて、カルデラ内とは植生が異なっていたことは十分に考えられる。

2. 完新世におけるススキ草原継続の原因

調査地の植生変遷について、注目すべき点はススキ属が優占する草原植生が、ごく最近までの約 13,500 年間にわたって継続して存在したことである。このような長期間、ススキ草原が続いたという事例は、他の地域を含

めて、これまで報告されていない。

最近の植物珪酸体による研究では、寒冷から温暖な気候へと変化すると、タケ亜科の中でササ属からメダケ属(ネザサ節など)を主とする植生へ遷移することが知られている(杉山, 2001 など)。しかし、調査地における植物珪酸体分析では、最終氷期にササ属が存在することは認められたが、後氷期の温暖化に伴って出現する可能性があるメダケ属の増加を見出すことができず、完新世の時期には一貫してススキ草原が続いていたことが明らかとなった。ススキの種子は風で飛散するため、裸地が形成された場合などには容易に侵入することが可能である。しかし、一旦は定着したとしても、ススキ草原が自然状態で長期間継続することは難しいといわれている(山根, 1973)。阿蘇地域の採草地では、野焼きの影響が弱まりはじめると、ススキは次第に分蘖せず茎数が粗になり、野焼き中止6年後には既存のヤマハギなどの灌木が巨大化し、ススキが衰退してノリウツギが急速に成長するという調査結果がある(大滝, 1997, p. 29~31)。こうしたことから、ススキ草原が1万年以上も長い間継続したことに、何らかの理由を考えなくてはならない。

その理由として、火山ガスの影響でススキ以外の植生が繁茂できなかったことや、雷・乾燥などにより山火事が繰り返し発生したことがあげられる。しかし、前者については、調査地は中岳火口(最近約1万年間の主要活動地域)から10km程度離れており、ガスの影響を長期間強く受けたとは考えにくい。また、後者に関しても何度も繰り返し、自然状態で火事が起こる可能性は低いであろう。

さらに理由としてあげられることは、人為による影響である。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・維持されてきたとされている(宮脇, 1981, p. 238~239)。なかでも野焼き(火入れ)は最も効率的に草原植生を維持できる方法であり、現在でも毎年春季に行われている。この野焼きが過去においても繰り返し実施されていたならば、ススキ草原が長期にわたって継続する可能性は十分に考えられる。阿蘇における野焼きがいつ開始されたかは明らかではないが、15世紀中頃~16世紀末頃の^{しもののかみ}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)時には火入れが行われていたことがわかっている(阿蘇品, 1999, p. 183~189)。西暦720年に成立した『日本書紀』には、景行天皇(在位西暦71~130年)が阿蘇を訪れ、人家がみえないほど遠くまで野原が広がっている様子が記述されている。『日本書紀』はいわゆる天皇神話とされている

こと(神野志, 1999, p. 56)から、その記述の信憑性については検討する必要があるが、少なくとも『日本書紀』が編纂された8世紀頃には、阿蘇地域に広大な草原が存在し、そうした景観を記述したのかもしれない。このようなことを考慮すると、1,000年以上前にはすでに草原が広がっていて、人為によって維持されていた可能性がある。それ以前の時代については古文書記録が残されておらず、また阿蘇火山周辺域では火入れが行われたことを示す旧石器・縄文・弥生遺跡も発見されていないため、人為による草原維持が具体的にいつ頃から始まったのか、断定することはできない。調査断面においても火入れの証拠は明らかではないが、北側カルデラ壁の大観峰^{たいかんぼう}付近(調査地から北西約16km)では9.7~9.5 cal ka頃より上位の土壌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ことが報告されている(小椋ほか, 2002)。こうした事実は、1万年以上にわたるススキ草原の継続に火入れが関与した可能性を支持するものである。

ススキ草原が継続したZone 1とササ草原が優占したZone 3からは、おおむね50,000個/g以上という多量の植物珪酸体が検出され、ともに密度の高い草原の環境下にあったことが推察された。しかし、Zone 3における炭素含有量はZone 1に比べて著しく低く、植物珪酸体総数と炭素含有量との間には明瞭な正の相関があるとはいえない(図6)。このことは、Zone 3が32~30 cal kaという古い層準にあるため、微生物によって有機物の分解が進むなど、炭素量が減少したことが原因であると考えられる。さらに、Zone 1において火入れが繰り返し行われて、ススキ草原が継続したという仮説が正しいとすると、Zone 1の土壌層中には多量の微粒炭が含まれていることになる。本研究では微粒炭の認定や分析を行っていないが、炭化物は無機化に対して強い抵抗性をもつとされる(進藤, 2003)ので、Zone 1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のかもしれない。

火入れなどの人為によってススキ草原が継続したかどうかについては、考古史料の解読や調査断面において土壌中の微粒炭の有無を確認することなど、今後さらに検討しなければならぬが、Zone 1とZone 3における現在の炭素含有量の違いも、Zone 1における火入れの可能性を示唆している。

3. 火山活動の強弱が土壌生成に及ぼす影響—黒ボク土層と褐色土層の成因—

調査断面においては、約13.5 cal kaの層準を境にして、上位(Zone 1)には腐植に富む黒色土層(いわゆる黒

ボク土層)が、下位(Zone 2)には褐色土層が発達している。このことは、阿蘇カルデラ周辺の高標高域で普遍的に認められる現象である(渡辺・高田, 1990; 山田・久保寺, 1996; 宮縁ほか, 2003)。これまでわが国では、これらの土壌の成因について、花粉や植物珪酸体分析による多くの研究が行われてきた。そうした研究の中で、黒ボク土層は草原植生下で、褐色土層は森林植生下で生成されたとする考え(河室・鳥居, 1986; 佐瀬, 1989など)が、現在では主流を占めているようである。しかし、今回の分析では、樹木起源の植物珪酸体は黒ボク土層のごく一部の層準でわずかに認められたが、褐色土層からはまったく検出されなかった。このことは、阿蘇火山西麓で行われた植物珪酸体分析の結果(山田ほか, 1997)とも調和している。したがって、阿蘇カルデラ周辺域における土壌層の色調の差異を、草原・森林という植生の違いに由来するという考えで説明することは困難である。

一方、テフラの堆積速度と土壌生成との関係を議論した研究が、阿蘇や桜島火山などで行われている。阿蘇カルデラ周辺域において、火山灰の供給が少ない地域では厚い黒ボク土が形成されるのに対し、火山灰供給が多い地域では挟在する火山灰層によって黒ボク土が多層準に分かれることが明らかにされている(渡辺・高田, 1990)。また、桜島火山周辺では活動が活発なときには青灰色火山砂層が、静穏期や休止期には褐色ローム層(本論でいう褐色土層)が形成されることが報告されている(井村, 1995)。さらに最近、同じ植生下にあっても母材物質(テフラや風成塵)の堆積速度と腐植集積のバランスによって、色調の異なる土壌が生成するという考えが九州南部の都城盆地での調査事例から提示されている(井上, 2002)。

今回の植物珪酸体分析の結果から、13.5 cal ka より上位(Zone 1)の黒ボク土層、下位(Zone 2)の褐色土層が生成された植生環境の主要構成種は、どちらもイネ科草本であることが明らかとなった。しかし、両者の間には炭素含有量と植物珪酸体総数に著しい差が認められた(図3)。阿蘇火山では、22~13.5 cal ka と13.5 cal ka 以降の時期とでは、火山活動の様式や規模に違いがあることがわかっている(宮縁ほか, 2003, 2004)。前者ではスコリアや火山灰を放出する爆発的な噴火が間欠的に発生したが、後者では灰噴火(小野ほか, 1995; Ono *et al.*, 1995)を主体とする比較的穏やかな活動へと推移した。こうした活動の変化により、前者の時期におけるテフラ噴出率は $0.2 \text{ km}^3/\text{ky}$ (溶岩換算量; DRE)であったが、後者ではその半分の $0.1 \text{ km}^3/\text{ky}$ にまで減少している

(宮縁ほか, 2003)。また、有機物を除去した試料(土壌母材の主要部分と考える)の粒度組成をみると、後者の時期には砂画分の割合が減少しており(図3)、このことも火山活動の静穏化を表していると考えられる。つまり、下位の褐色土層は、活発な火山活動により母材となるテフラの堆積量が大きい時期に、また上位の黒ボク土層は火山活動の静穏化によって母材供給量が減少した時期に、生成されたことになる。こうした火山活動の強弱による母材堆積速度の差に、寒冷~温暖化という気候条件の変化が加わって、植生量に影響を与え、腐植集積の程度に違いが出た結果、色調の異なる土壌が生成されたと推察される。こうしたことは、基本的に井上(2002)などの考えを支持するものである。

また、調査地を含む阿蘇カルデラ周辺域においては、前述した褐色土層と黒ボク土層の境界は非常にシャープであることが特徴である。最終氷期から後氷期への温暖化は短時間に急激に起こったわけではないので、気候の変化だけでは両土層間のシャープな境界の理由を説明することはできない。むしろ、火山活動の急激な変化が植生量(腐植集積量)の違い、さらに生成される土壌の性質の違いを与えた影響の方が大きいと考える。阿蘇火山の場合、生成される土壌の色調を決定する境界となる母材供給速度(テフラ噴出率)は、 $0.1\sim 0.2 \text{ km}^3/\text{ky}$ の間にあると推定される。もちろん、土壌の母材には大陸起源の風成塵も含まれ、その量は最終氷期と後氷期では変化したとみられる。しかし、阿蘇火山周辺域における風成塵の飛来量は、テフラの堆積量に比べると、無視できるほど小さいとされている(宮縁ほか, 2003)。

VI. おわりに

阿蘇カルデラ東方域に位置するテフラ断面において、土壌試料の植物珪酸体分析を行い、最近約3万年間の植生変遷などについて考察した。しかし、本研究は1地点での分析結果を提示しただけであり、阿蘇火山全域の植生遷移を議論するためには、今後も多くの地点において調査を実施し、分析データを集積する必要がある。

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現地調査の許可をいただき、林道工事担当者には調査の便宜をはかっていただいた。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牧 蓉子氏のご協力を得た。熊本大学教育学部の渡辺一徳教授には、日頃より阿蘇火山の地質についてご教示いただいている。ま

た、匿名査読者と編集担当委員の清永丈太氏の意見は本論を改稿する上で有益であった。以上の方々に深く感謝いたします。

引 用 文 献

- 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」: 250p, 熊本県一の宮町。
- 土壤環境分析法編集委員会編 (1997) 土壤環境分析法。427 p, 博友社。
- 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.
- 井村隆介 (1995) 小噴火の累積でつくられた堆積物。火山, 40, 119-132.
- 井上 弦 (2002) 埋没土壌の生成機構—都城盆地の事例—。月刊地球, 24, 798-802.
- 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。日本花粉学会誌, 38, 116-133.
- 河室公康・鳥居厚志 (1986) 長野県黒姫山に分布する火山灰由来の黒色土と褐色森林土の成因的特徴—とくに過去の植被の違いについて—。第四紀研究, 23, 81-98.
- 木崎康弘 (1985) 遺跡の概観。肥後考古, 5, 21-34.
- 神野志隆光 (1999) 古事記と日本書紀—「天皇神話」の歴史—。212 p, 講談社。
- 町田 洋・新井房夫 (1976) 広域に分布する火山灰—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—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 [日本列島とその周辺]。276 p, 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・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・星住英夫・渡辺一徳 (2004) 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。火山, 49, 51-64.
- 宮縁育夫・渡辺一徳 (1997) 埋没黒ボク土層の ¹⁴C 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.
- 宮脇 昭編 (1981) 日本植生誌 九州。484 p, 至文堂。
- 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—アカホヤの土壌肥料学的研究 (第 2 報)。日本土壌肥料学雑誌, 48, 1-7.
- 中村 武・渡辺一徳 (1995) 阿蘇火山杵島岳・往生岳の噴出物と黒ボク土に関する知見について。熊本地学会誌, 110, 2-5.
- 波野村史編纂委員会 (1998) 波野村史。1693 p, 波野村。
- 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.
- 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・松本徹夫・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 地質図幅), 145 p, 地質調査所。
- 小野晃司・渡辺一徳 (1983) 阿蘇カルデラ。月刊地球, 5, 73-82.
- Ono, K., Watanabe, K., Hoshizumi, H. and Ikebe, S. (1995) Ash eruption of the Naka-dake crater, Aso volcano, southwestern Japan. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 66, 137-148.
- 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.
- 大滝典雄 (1997) 草原と人々の営み—自然とのバランスを求めて—。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10」: 249 p, 熊本県一の宮町。
- 佐瀬 隆 (1989) 黒色腐植層 (黒土層) の生成に関する覚書。岩手県文化振興事業団埋蔵文化財センター紀

- 要, 9, 49-66.
- 進藤晴夫 (2003) 土壤中における植物炭化物の分布と重要性. 日本土壤肥料学会講演要旨集, 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」: 189-213, 同成社.
- 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 (2004) 西ガガラ遺跡における植物珪酸体分析. 広島大学東広島キャンパス埋蔵文化財発掘調査報告書 II, 472-487.
- 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」: 8-27, 聚海書林.
- 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.
- 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.
- 山田一郎・久保寺秀夫 (1996) 阿蘇外輪山およびその周辺域における阿蘇4以降のテフラ層序と土壤層序. 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.
- 山中金次郎・松尾憲一 (1962) 土壤硬度に関する研究 (第1報) 土壤硬度と含水量との関係. 日本土壤肥料学雑誌, 33, 343-347.
- 山根一郎 (1973) 黒ボク土の生成におけるススキの意義. ペドロジスト, 17, 84-94.

A 30,000-year Phytolith Record of a Tephra Sequence, East of Aso Caldera, Southwestern Japan

Yasuo Miyabuchi*^{1,a} and Shinji Sugiyama*²

A 30,000-year record of vegetation change has been constructed using phytolith analysis from a tephra sequence located at the east of Aso caldera, central Kyushu, southwestern Japan. The sequence was divided into three zones: Zone 3 (ca. 32–30 cal ka), Zone 2 (30–13.5 cal ka), and Zone 1 (13.5–0 cal ka), in ascending order. Gramineae phytoliths were predominantly detected from most horizons, whereas a small amount of arboreal phytolith was observed at a few Holocene horizons. Zone 3 was dominated by a *Sasa* grassland (mainly *Sasa* sect. *Crassinodi*), suggesting a cool and dry climate. However, the *Sasa* grassland declined due to violent volcanic activity of Aso

Volcano in Zone 2, which corresponds to the Last Glacial Maximum. During Holocene time (Zone 1) a *Miscanthus* grassland continued consistently for more than 10,000 years. The long continuation of the *Miscanthus* grassland might be related to artificial burning. In and around Aso Volcano, brownish soil layers were formed when the accumulation rate of soil parent materials (tephra) was high, whereas blackish humic soil layers were formed when the rate was low. The tephra discharge rate boundary between the formation of brownish and blackish soil layers is estimated at 0.1–0.2 km³/ky.

Keywords : Aso caldera, phytolith, vegetation history, Gramineae, *Miscanthus* grassland

*1 Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute. 4-11-16 Kurokami, Kumamoto, 860-0862, Japan.

*2 Paleoenvironment Research Co., Ltd. 1417 Akae, Miyazaki, 880-0912, Japan.

*a Corresponding author : yasuo@affrc.go.jp