

遺跡調査における植物珪酸体（プラント・オパール）分析の活用と課題 — 農耕史・植生史・気候環境史の解明に向けて —

講師 株式会社古環境研究センター
代表取締役 杉山真二

1. はじめに

遺跡の土壌中には、植物珪酸体（プラント・オパール）をはじめ、花粉・孢子、種実、木材、珪藻、寄生虫卵などの多種多様な自然遺物が含まれている。これらの自然遺物は、土壌が形成された当時の植生や環境、生業などについて多くの重要な情報を保持しているが、地下に眠るこれらの情報は、自然科学分析によってデータ化して公開されなければ誰にも知られることなく永遠に消失してしまう。これは、遺物や遺構を確認せずに遺跡を破壊することと同様のことではないだろうか。

筆者が専門とする植物珪酸体分析は、考古学をはじめ、農学、土壌学、植物学、地質学など多くの分野で広く応用されている。考古学分野では、これまでおもに稲作などの農耕史の解明を中心として研究が進められてきたが、最近では遺跡周辺の草原植生や森林植生（照葉樹林）、気候環境（気温・積雪量）の変遷を具体的にとらえるなど、古環境を解明する分野で多くの成果が得られている（近藤, 1995, 2010, 杉山, 2000 など）。ここでは、これまでの研究例や応用例を紹介し、その有効性や今後の課題について考察したい。

2. 植物珪酸体（プラント・オパール）について

植物珪酸体（Phytolith, ファイトリス）は、植物の細胞組織に珪酸（ SiO_2 ）が蓄積したもので、植物が枯れたあともガラス質の微化石となって土壌中などに半永久的に残存している。この植物起源の微化石はプラント・オパール（Plant opal）ともよばれ、考古学分野ではこの名称が使われることが多い。

植物珪酸体は、イネ科植物（イネ、ヨシ、ススキ、竹笹類など）をはじめ、カヤツリグサ科、シダ類、トクサ類などの草本類、およびブナ科（シイ属、カシ類など）、クスノキ科、モクレン科、マンサク科（イスノキ属）、クワ科、マツ科などの木本類でも形成される（写真1）。植物の種類によって植物珪酸体の形や大きさ、密度が異なることから、土壌中から取り出して調べることで、当時そこに生育していた植物の種類や量が分かる。

花粉分析や大型植物遺体分析（種実など）は、遺体の保存性の関係から対象がおもに泥炭層などの水成堆積物に限られるが、植物珪酸体分析はローム層や黒ボク土などの風成堆積物も対象となり、焼土や灰化物、土器（胎土）でも分析が可能である。また、植物珪酸体は花粉（風媒花）と比較して現地性が高いことから、調査地付近の比較的限られた範囲の植生を詳細に把握するのに適している。

イネ科植物（タケ亜科を含む）は、花粉では細分が難

しいが、植物珪酸体では属あるいは節レベルで同定が可能である。なお、タケ亜科（竹笹類）は開花周期が数十年に一度であり、比較的乾燥したところに分布することから、花粉分析や大型植物遺体分析では把握されにくい。

植物体内に含まれる植物珪酸体の密度は分類群によって大きく異なっており、土壌から検出された植物珪酸体の密度は実際の植生被覆度とは必ずしも一致しない。そこで、植物珪酸体密度に各植物の換算係数（植物珪酸体1個あたりの植物体乾重）をかけて生産量（ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ ）を推定することで、各植物の繁茂状況や植物間の占有割合などを具体的にとらえることができる。

3. 研究・応用例

これまでに行われた植物珪酸体（プラント・オパール）分析の研究・応用例を以下に列記し、おもな事例について具体的な内容を紹介する。

<農耕史の解明>

1) 水田跡（稲作跡）の確認・探査、2) 水田跡におけるイネ籾生産量の推定、3) 稲作開始時期の検討、4) 土器胎土分析によるイネの存在の確認、5) イネ苗の植物珪酸体と水田遺構埋没の季節推定（苗代と田植えの確認）、6) イネの系統（亜種）の検討、7) イネ以外の栽培植物（ムギ類、ヒエ、アワ等）の検討、8) 畑跡や焼畑の確認・探査

<植生史の解明>

9) イネ科植物を主とする草原植生や湿地植生の復原、10) 森林植生（照葉樹林など）の変遷、11) 火山噴火が植生に及ぼした影響と回復過程の検討、12) 土壌生成と植生の関係（黒ボク土の成因）

<気候環境史の解明>

13) タケ亜科の植生変遷と気候変動（氷期-間氷期サイクル）、14) ササ類の植生変遷と積雪量の変動

<その他>

15) 土器胎土の供給源（産地）の推定、16) 炭化物や灰化物（屋根材など）の給源植物の推定、17) 繊維製品や編組製品の素材同定、18) 草食動物の糞による食性分析、19) 放牧跡の検証

（1）水田跡（稲作跡）の確認と探査

発掘調査によって古代の水田跡が検出された場合、その土壌を分析するとイネの植物珪酸体（機動細胞由来）が5,000個/g以上と多量に検出されるのが通例である。土層の堆積速度にもよるが、イネの密度が5,000個/g

以上の場合、少なくとも数十年間にわたってそこで稲作が行われていたと考えることができる。これらのことから、一般にイネの密度が5,000個/g以上の場合に、そこで稲作が行われていた可能性が高いと判断している。また、目的とする層準にイネの密度のピークが認められれば、上層から後代のものが混入した危険性は考えにくくなり、その層で稲作が行われていた可能性はより確実なものとなる。

イネの収穫法が穂刈りから株刈りに変わったと考えられる弥生時代後期～古墳時代以降には、水田跡におけるイネの密度が減少する傾向があり、密度が3,000個/g程度でも水田跡が検出される場合がある。これは、株刈りの普及によって稲わらの利用(藁製品、屋根材など)が促進され、稲わらが水田土壌に還元されなくなったためと考えられる。

青森県田舎館村の垂柳遺跡では、試掘調査の段階で植物珪酸体分析による水田跡の探査が行われた。その結果、田舎館式土器(弥生時代中期)包含層の第VI層からイネが9,800個/gと高い密度で検出され、水田跡が埋蔵されている可能性が高いと判断された。次に20mメッシュ交点の50地点についてボーリング棒による試料採取が行われ、第VI層水田跡の分布域の探査が行われた。その結果、分析によって推定された水田跡の分布域は、その後の発掘調査によって得られた考古学的所見と整合することが確かめられ、同調査法が水田跡の探査に有効であることが実証された(藤原・杉山, 1984)。

このような水田調査法は、これまでに宮城県富沢遺跡、静岡県登呂遺跡、奈良県中西・秋津遺跡、岡山県津島遺跡、福岡県板付遺跡、長崎県原の辻遺跡、宮崎県坂元A遺跡、および中国江蘇省の草鞋山遺跡など1,000箇所以上の遺跡に適用され、古代農耕の解明に大きな成果を上げている(藤原, 1998, 杉山, 2000など)。

(2) 水田跡におけるイネ籾生産量の推定

水田跡から検出されたイネの植物珪酸体密度から、そこで生産されたイネ(籾)の量を推定することができる。前述の垂柳遺跡Ⅲ区の第VI層水田層(弥生時代中期)から検出されたイネの密度は平均14,000個/gである。これに土壌の仮比重(平均 0.83 g/cm^3)と稲籾(種実)の換算係数($1.03 \times 10^{-5} \text{ g}$)をかけると、面積 1 m^2 あたりで層厚 1 cm の堆積期間に生産されたイネ籾の量は約 1.2 kg と算出される。これに第VI層の層厚 15 cm をかけて面積 10 a ($1,000 \text{ m}^2$)あたりに換算すると、第VI層水田層で生産されたイネ籾の総量は約 $18,000 \text{ kg}/10 \text{ a}$ と推定される。

当時のイネ籾の年間収量を $100 \text{ kg}/10 \text{ a}$ と仮定すると(安藤, 1993)、第VI層ではおよそ180年間と比較的長期間にわたって水田稲作が営まれていたことになる。ただし、これらの値は、稲わらがすべて水田内に還元されたと仮定して算出しているため、稲わらが水田から持ち出されていた場合は、その割合に応じて修正する必要がある。

(3) 稲作開始時期の検討

鹿児島大学構内遺跡(郡元団地L-11・12区)では、縄文時代中期(放射性炭素年代測定値で約4,400～4,800年前)に形成されたと考えられる黒色泥炭質層(13層)が確認された。植物珪酸体分析や花粉分析などの結果、13層の堆積当時はヨシ属やカヤツリグサ科などが繁茂する湿地の環境であったと考えられるが、同層上部ではこれらの植物の減少に伴ってイネの植物珪酸体をはじめ、イネ属型の花粉、水田雑草の種実が出現している。これらのことから、13層上部の時期には、ヨシ属などが生育する湿地を利用して調査地点もしくはその周辺で稲作が開始されていたと推定される(古環境研究所, 1994, 杉山, 1997)。この黒色泥炭質層については第三者による追試が行われ、イネの存在が確認されている(藤原, 1994)。縄文時代中期の土層や土器胎土からイネの植物珪酸体が検出される事例は、この他にも岡山県備前市の長縄手遺跡などで報告されている(外山, 2006)。

(4) イネ苗の植物珪酸体と遺構埋没の季節推定

生育初期(苗の段階)のイネ葉に含まれる機動細胞珪酸体は、縦長が $30 \mu \text{ m}$ 前後と明らかに小型であり、形状が未熟なものや縦長に対する横長の比率が大きいものも多く含まれている。これらの形態的な特徴から、苗の段階の植物珪酸体は生育中後期のものとは明瞭に識別される(杉山, 1998)。水田土壌に含まれるイネの植物珪酸体は、そのほとんどが生育中後期のものであり、イネ苗に由来するものの出現率は通常数%未満とわずかである。

群馬県渋川市(子持村)の黒井峯遺跡では、榛名二ツ岳伊香保テフラ(Hr-FP, 6世紀中葉)直下から”小区画の島”が検出された。この遺構面からはイネの植物珪酸体が検出されたが、その90%以上がイネ苗に由来するものであり、同遺構が”陸苗代”であることが明らかとなった(能登ほか, 1989)。また、周辺の遺跡から検出された同テフラ直下の水田面でも、イネ苗に由来する植物珪酸体の割合が30～40%前後に達するところがあり、これらの遺構がHr-FPによって埋没された季節は田植え前後の初夏と推定された(杉山, 1998)。

宮崎県都城市の鶴喰(つるはみ)遺跡でも、桜島文明軽石(Sz-3, 1471年)直下の水田面でイネ苗に由来する植物珪酸体の割合が30%前後のところがあり、田植え前後の初夏に埋没したことが推定された(杉山, 1998)。

(5) イネ以外の栽培植物の検討

植物珪酸体分析で同定される分類群のうち、栽培植物が含まれるものには、イネ以外にもムギ類(オオムギ・コムギ)、ヒエ属(ヒエが含まれる)、エノコログサ属(アワが含まれる)、キビ属(キビが含まれる)、ジュズダマ属(ハトムギが含まれる)、オヒシバ属(シコクビエが含まれる)、モロコシ属(モロコシが含まれる)、トウモロコシ属(トウモロコシが含まれる)などがある。

イネは、種および亜種レベル(ジャポニカ、インディ

カなど)で同定が可能であり、ジャポニカの生態型(温帯型、熱帯型)の判別も行われている(宇田津・藤原, 1991)。ムギ類は、穎(穀)の表皮細胞に由来する植物珪酸体に形態的特徴があり、植物組織が残存していればオオムギとコムギの識別も可能である。ヒエ属には栽培種のヒエが含まれるが、現段階ではイヌヒエなどの野生種との識別は困難である(杉山ほか, 1988)。その他の分類群についても、現在のところ栽培種と野生種とを完全に識別するには至っていない。

青森県青森市の三内丸山遺跡では、縄文時代前期の堆積層からヒエ属(イヌヒエ)が多量に検出され、食糧として利用されていた可能性が指摘されている(藤原, 1997)。また、鹿児島県霧島市の上野原遺跡(第4工区)では、桜島13テフラ(約10,600年前)直下層からヒエ属、エノコログサ属、ジュズダマ属、オヒシバ属が検出され(図1)、日本最古とされる定住集落跡との関係で注目される(杉山, 1997)。これらの可食植物の利用については、当時の生業や文化を考えるうえで重要な問題であり、今後とも慎重に検討していく必要がある。

(6) 焼畑の存在を検証する

焼畑は施設や農具をほとんど必要としないため、考古学的に遺構や遺物が検出される可能性は小さい。このため、焼畑跡の存在を証明するためには、そこで栽培された作物を確認することと、火入れが定期的に繰り返し行われたことを証明する必要がある。

宮崎県小林市下九瀬の山地(南北約2km, 東西約1km, 標高400~650m)は、現況は照葉樹林が主体であり、傾斜が急で過去に常畑として利用された履歴は認められない。ここでは高度、傾斜度、斜面の方位などを考慮した119地点について分析を行った。その結果、表土層(5cm深まで)では全体の42%の地点からイネが検出され、傾斜40度以上の急傾斜地を含む92%の地点から主要な焼畑作物が含まれるキビ族(ヒエ属、エノコログサ属、キビ属など)が検出された。

また、これらの試料からはシイ属、イスノキ属、クスノキ科などの照葉樹とともに、森林の林床では生育が困難なススキ属が多量に検出された。ススキ属の推定生産量は、焼畑のサイクルが10回以上繰り返されたときみなされる量であり、イネおよびキビ族と明らかな正の相関関係が認められた。この期間に栽培されたイネの推定生産量は約16年分、キビ族(ヒエと仮定)は約20年分に相当する。

以上の結果から、この山地ではかつて広範囲にわたって焼畑が行われており、そこでイネやキビ族などが栽培されていたことが確認された(藤原・杉山, 1983, 藤原ほか, 1984, 杉山ほか, 1988)。この研究では、現表土における比較的最近の焼畑の存在と分布域が確認されたが、同様の方法を用いて火山灰などで埋没した焼畑跡の探査や検証も可能と考えられる。

(7) タケ亜科の植生変遷から気候変動を推定する

タケ亜科(竹笹類)は日本列島のほぼ全域に分布しており、その分布状況などからメダケ属は温暖、ササ属は寒冷の指標とされている(室井, 1960, 杉山・藤原, 1986)。そこで、植物珪酸体分析の結果からメダケ率(両者の推定生産量の比率)を算出し、過去の気候を推定する試みが行われている。メダケ率が100%に近ければメダケ属が主体の温暖な気候、0%に近ければササ属が主体の寒冷な気候であることを示している。

関東地方における分析結果では、メダケ率は約2万年前頃が最も低く、およそ1万年前を境に急激に上昇している。また、約3~5万年前頃にかけてもメダケ率が比較的高くなっている。このようなメダケ率の変遷は、世界的な気候変動の基準となっている酸素同位体比曲線による酸素同位体ステージ2の寒冷期、ステージ2からステージ1への急激な温暖化、およびステージ3の相対的な温暖期に対比される(杉山, 2001など)。

宮城県築館丘陵における研究では、メダケ率の変遷と過去60万年間における約10万年周期の気候変動(氷期-間氷期サイクル)が良好に対応しており(図2)、メダケ率の検討が気候環境(温暖-寒冷)の推定に有効であることが確認された(杉山・早田, 1996, 杉山, 2001, 2017)。

メダケ率による気候環境の推定は、メダケ属が分布していない北海道や日本海側の多雪地帯を除く全国各地の広い範囲で適用可能であるが、九州南部では後氷期の早い時期に照葉樹林が分布拡大しているため、ササ属(森林の林床でも生育可能)からメダケ属(林床では生育困難)への植生変遷が遅れる場合がある(図1)。

(8) ササ属の植生変遷から積雪量の変動を推定する

人の活動に影響を及ぼす環境要因としては、気温とともに降水量(積雪量)の変動も重要であり、多くの植物にとっては気温の変動以上に降水量(積雪量)の影響が大きい。ササ属のうちミヤコザサ節は太平洋側の積雪の少ないところに分布しており、冬季の乾燥に適応している。また、チシマザサ節やチマキザサ節は日本海側の多雪地帯に分布しており、冬季の乾燥に弱い。両者の分布境界は”ミヤコザサ線”とよばれており、最大積雪約50cmの等深線とほぼ一致している(鈴木, 1978)。

ミヤコザサ線の周辺におけるこれまでの調査では、約3万年前より以前から約1.5万年前にかけては、現在は多雪地帯となっている日本海側でもミヤコザサ節型が優勢であり、積雪量が比較的少ない乾燥した環境が推定される。この時期には、ミヤコザサ線は日本海側に大きく移動していたと考えられる。約1.5万年前から約1万年前にかけては、太平洋側を含む多くの地点でチマキザサ節型の占める割合が増加しており、広域的に積雪量が増加したことを示している。約1万年前より以降では、太平洋側ではネザサ節型が急激に増加し、日本海側ではチマキザサ節型が継続して卓越している。このように、晩氷期以降の多雪化と温暖化によって、ミヤコザサ線を境

界とする現在のタケ亜科(竹笹類)の分布が成立したと推定される(杉山・早田, 1997, 杉山, 2017)。

ササ類は常緑であり、雪の中でも緑を保っていることから、大半の植物が落葉または枯死する秋から冬にかけてはシカ類などの草食動物の重要な食物となっている(高槻, 1992)。遺跡周辺にササ類が豊富に存在したことは、当時の動物相を考える上でも重要である。シカやイノシシの分布は、積雪深と密接な関係があり、ニホンシカは積雪深50 cm以上、イノシシは30 cm以上で行動が阻害される(日本野生生物研究センター, 1980)。年最高積雪約50 cmを示すミヤコザサ線の変動は、これらの動物の分布に大きく影響し、これを狩猟対象とした人の活動にも影響を与えたと考えられる。

(9) 九州南部における照葉樹林発達史

森林植生の変遷については、おもに花粉分析により検討が行われているが、花粉分析は前述のように丘陵や台地上の状況を直接的に推定するのは困難であり、照葉樹林の主要構成要素であるクスノキ科は花粉の保存性の問題から花粉分析では把握されないという問題もある。

九州南部の123地点について植物珪酸体分析を行った結果、種子島や屋久島では最終氷期を通して照葉樹林が存在していたことが確かめられた(杉山, 1999)。鹿児島県南部では、桜島薩摩テフラ(Sz-S, 約12,800年前)の下層からクスノキ科が出現しており、この頃には照葉樹林の分布拡大が開始されていたと考えられる。また、桜島11テフラ(約8,400年前)の下層では、錦江湾沿岸部や宮崎県南部沿岸部などでシイ属を主体とした照葉樹林が成立していたと考えられる。花粉分析によると約8,400年前には宮崎県南部沿岸部でシイ林が成立していたと推定されており(松下, 1992)、植物珪酸体分析の結果と整合している。なお、宮崎県南部の内陸部などではメダケ属(メダケ節やネザサ節)を主体としてススキ属なども見られるイネ科主体の草原植生が広く分布していたと考えられ、照葉樹林の分布は限られている。

鬼界アカホヤ火山灰(K-Ah, 約7,300年前)の下層の時期には、九州南部一帯のほぼ全域に照葉樹林が分布拡大していたと考えられるが、宮崎県南部の内陸部などでは依然としてイネ科主体の草原植生が継続していたと推定される。これらの地域は、黒ボク土とよばれる有機質黒色土の分布域と一致している。

(10) 黒ボク土と草原植生の関係

黒ボク土の判定率(腐植含量、土色等による)は、ススキ属やメダケ属の推定生産量と正の相関関係を示し、樹木(照葉樹)起源の密度とは負の相関関係を示すことから、黒ボク土は草原植生下で生成され、森林植生は関与していないと考えられる(杉山ほか, 2002)。黒ボク土の生成に草原植生が関与していることは、都城盆地の累積性黒ボク土における炭素・窒素安定同位体自然存在比の研究でも確認されている(井上ほか, 2001)。ススキ属

などの草原植生が維持されるためには定期的な刈り取りや火入れ(焼き払い)が必要であることから(佐瀬・細野, 1995など)、人間による植生干渉や火入れ、もしくは山火事の頻発などが照葉樹林の分布拡大を妨げる一因になったと考えられる。

このような黒ボク土は、九州以外にも関東地方、東北地方東部、北海道東部などに広く分布しており、その形成開始時期はおおむね約1万年前からとされている(佐瀬・細野, 1995)。黒ボク土の有機物を供給した植物の種類は地域や時期によって異なっているが、縄文時代においてはこれまでに確実な栽培植物は検出されておらず、黒ボク土の生成に焼畑が関与した証拠は得られていない。

(11) 鬼界アカホヤ噴火の影響と回復過程

鬼界カルデラの巨大噴火(鬼界アカホヤ噴火)に伴う幸屋火砕流(K-Ky, 約7,300年前)は、薩摩半島南部や大隅半島南部にまで到達している。火砕流が及んだ地域では、それまで分布していた照葉樹林や林床のササ類が絶えてススキ属などが繁茂する草原植生に移行しており、このような状況は池田湖テフラ(Ik, 約6,400年前)直下まで継続している。この地域では約900年間は照葉樹林が回復しなかったと考えられるが、火砕流の縁辺部などではIk直下で照葉樹や落葉広葉樹が出現しており、森林植生が回復過程にあったことが分かる(杉山, 2002)。

一方、火砕流が及ばなかった鹿児島県中部以北では、K-Ah直上でススキ属などの草原植生に移行した形跡が認められず、照葉樹の樹種や量が増加する傾向が認められた。これらのことから、照葉樹林の回復は比較的早く、照葉樹林が絶えるほどの壊滅的なダメージを受けなかった可能性が考えられる。また、泥流などの二次的災害を受けにくい台地上などでは、K-Ah直上で照葉樹林が拡大したところもあったと推定される(杉山, 2002)。

このような照葉樹林の回復と拡大には、当時の高温・多湿な気候環境が影響したと考えられる。また、テフラの降灰が生態系の秩序を攪乱することによって生態的順位の交代が誘発され(辻, 1993)、結果的に照葉樹林の拡大が促進されたことも想定される。

考古資料によると、鬼界アカホヤ噴火は轟A式土器の存続期間に起こったとされ、九州のほぼ全域に展開していた轟A式土器の製作情報が噴火の影響で断絶することはなく、土器文化は継続したと推定されている(柴畑, 2002, 2013)。ただし、火砕流が及んだ地域では、西之園式期(噴火から約250年)および轟B1式期(噴火から200~400年)の遺跡は確認されておらず、轟B2式期(噴火から400~800年)でも遺跡規模は貧弱であり、石鏃(矢じり)が多いのが特徴的である(草原で狩猟?)。定着的な遺跡が形成されるのは噴火から1,000年以上経過した曾畑式期以降であるが、この頃から堅果類の加工具である磨石・石皿類が増加しており、森林植生の回復過程と堅果類の利用との関連で興味深い。

4. おわりに

今後の研究により、植物珪酸体(プラント・オパール)分析で同定される分類群の増加、同定精度の向上、解析法の進展が期待される。また、花粉分析などの微化石分析をはじめ、考古学、土壌学、年代測定、火山灰編年などの成果を総合的に検討することで、遺跡周辺における植生や環境の実態がより詳細に解明されるであろう。

今後は、これらの知見をもとに環境変化の将来予測につなげる研究を推進する必要がある。現在、気候温暖化による環境への影響が危惧されているが、今よりも温暖であった縄文海進期や最終間氷期における古環境(植生、気候、積雪量、降水量など)を把握することは、将来の環境変化の予測に役立つと考えられる。

また、過去の大規模な噴火や津波などによる植生破壊と回復過程、およびそれに伴う人類の対応を把握することは、将来的に予想される大規模災害への対策を検討するための重要な基礎資料になるであろう。

自然科学分析によって得られる詳細で豊富な情報を、考古学的所見などとあわせて将来予測や対策に活用することは、大きな社会貢献になると期待される。

おもな参考文献

- 井上弦・米山忠克・杉山真二・岡田英樹・長友由隆(2001) 都城盆地の累積性黒ボク土における炭素・窒素安定同位体自然存在比の変遷—植物珪酸体による植生変遷との対応—. 第四紀研究, 40, p. 307-318.
- 柴畑光博(2002) 考古資料からみた鬼界アカホヤ噴火の時期と影響. 第四紀研究 41(4), p. 317-330.
- 柴畑光博(2013) 鬼界アカホヤテフラ(K-Ah), 約7,300年前)の年代と九州縄文土器編年との対応関係. 第四紀研究 52(4), p. 111-125.
- 古環境研究所(1994) 鹿児島大学構内遺跡郡元団地J・K-10・11区における自然科学分析. 鹿児島大学稲盛会館建設に伴う埋蔵文化財調査報告書, p. 79-109.
- 近藤鍊三(1995) 日本における植物珪酸体研究とその応用. 近藤祐弘教授退官記念論文集. p. 31-56.
- 佐瀬 隆・細野衛(1995) 1万年前の環境変動は火山灰土壌の生成にどのような影響を与えたか?—黒ボク土生成試論—. 近藤祐弘教授退官記念論文集. p. 57-64.
- 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, p. 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.
- 杉山真二(1999) 植物珪酸体分析からみた九州南部の照葉樹林発達史. 第四紀研究. 38, p. 109-123.
- 杉山真二(2000) 植物珪酸体(プラント・オパール). 考古学と植物学. 同成社, p. 189-213.
- 杉山真二(2001) テフラと植物珪酸体分析. 月刊地球.

23, p. 645-650.

- 杉山真二(2002) 鬼界アカホヤ噴火が南九州の植生に与えた影響—植物珪酸体分析による検討—. 第四紀研究. 41, p. 311-316.
- 杉山真二・渡邊眞紀子・山元希里(2002) 最終氷期以降の九州南部における黒ボク土発達史. 第四紀研究. 41, p. 361-373.
- 杉山真二(2009) 植物珪酸体と古生態. 人と植物の関わりあい④. 大地と森の中で—縄文時代の古生態系—. 縄文の考古学Ⅲ. 小杉康ほか編. 同成社, p. 105-114.
- 杉山真二(2010) 更新世の植生と環境. 旧石器時代. 講座日本の考古学第1巻. 青木書店, p. 156-177.
- 杉山真二(2017) 植物珪酸体分析による古環境推定—タケ亜科の植生変遷と気候および積雪量の変動—. 文化財技術研究会編. 文化財学研究, 2, p. 1-14.
- 辻 誠一郎(1993) 火山噴火が生態系に及ぼす影響. 火山灰考古学. 古今書院, p. 225-246.
- 外山秀一(2006) 遺跡の環境復原—微地形分析, 花粉分析, プラント・オパール分析とその応用—. 古今書院.
- 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, p. 15-29.
- 藤原宏志・杉山真二(1983) プラント・オパール分析による焼畑山地の調査. 民博通信. 20, p. 52-60.
- 藤原宏志・杉山真二(1984) プラント・オパール分析法の基礎的研究(5)—プラント・オパール分析による水田址の探査. 考古学と自然科学, 17, p. 73-85.
- 藤原宏志・佐々木章・杉山真二(1984) プラント・オパール分析法の基礎的研究(6)—プラント・オパール分析による畑作農耕址の検証. 考古学と自然科学. 18, p. 111-125.
- 藤原宏志(1998) 稲作の起源を探る. 岩波新書.

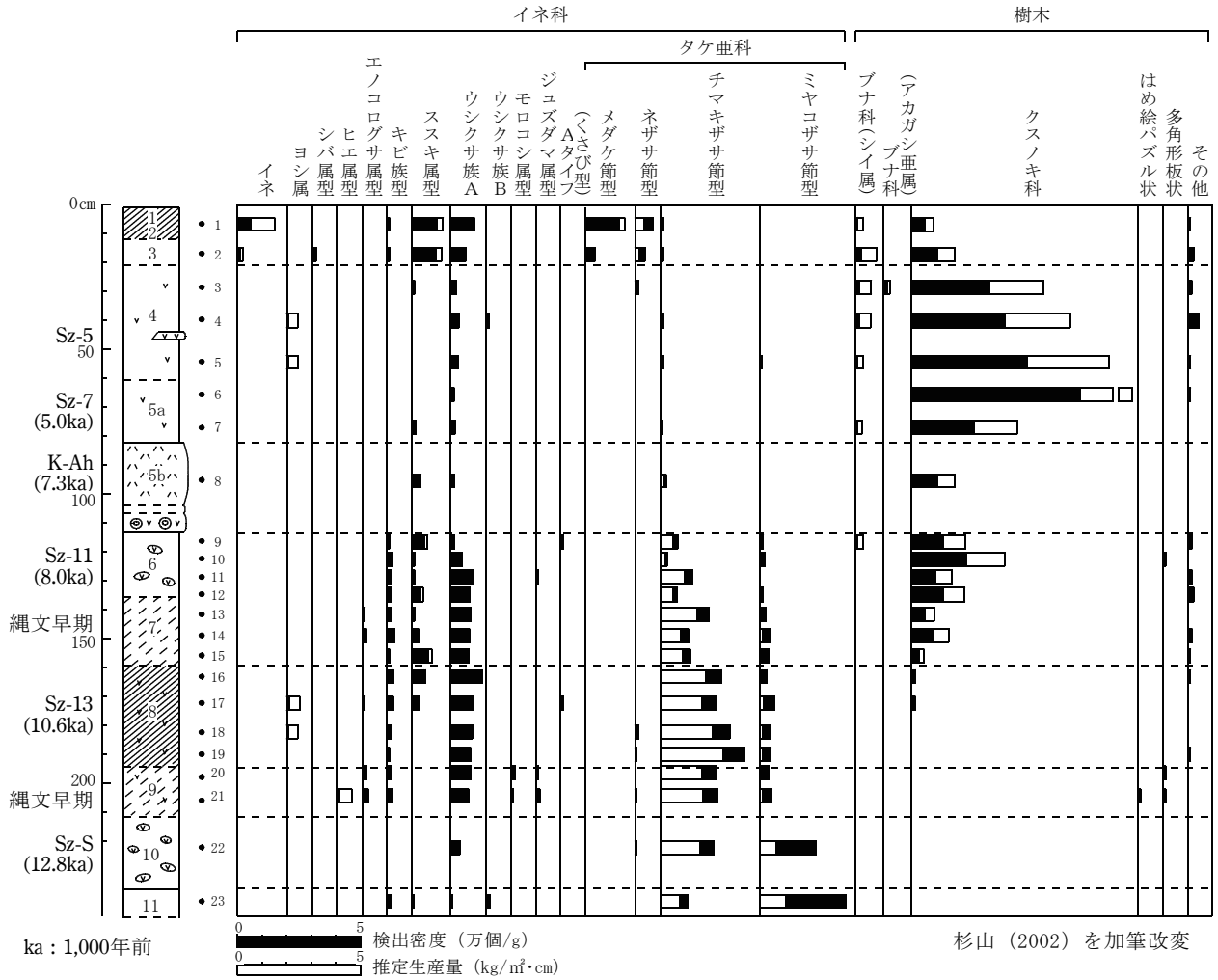


図1 鹿児島県霧島市上野原遺跡(第4工区)における植物珪酸体分析結果(主な分類群)

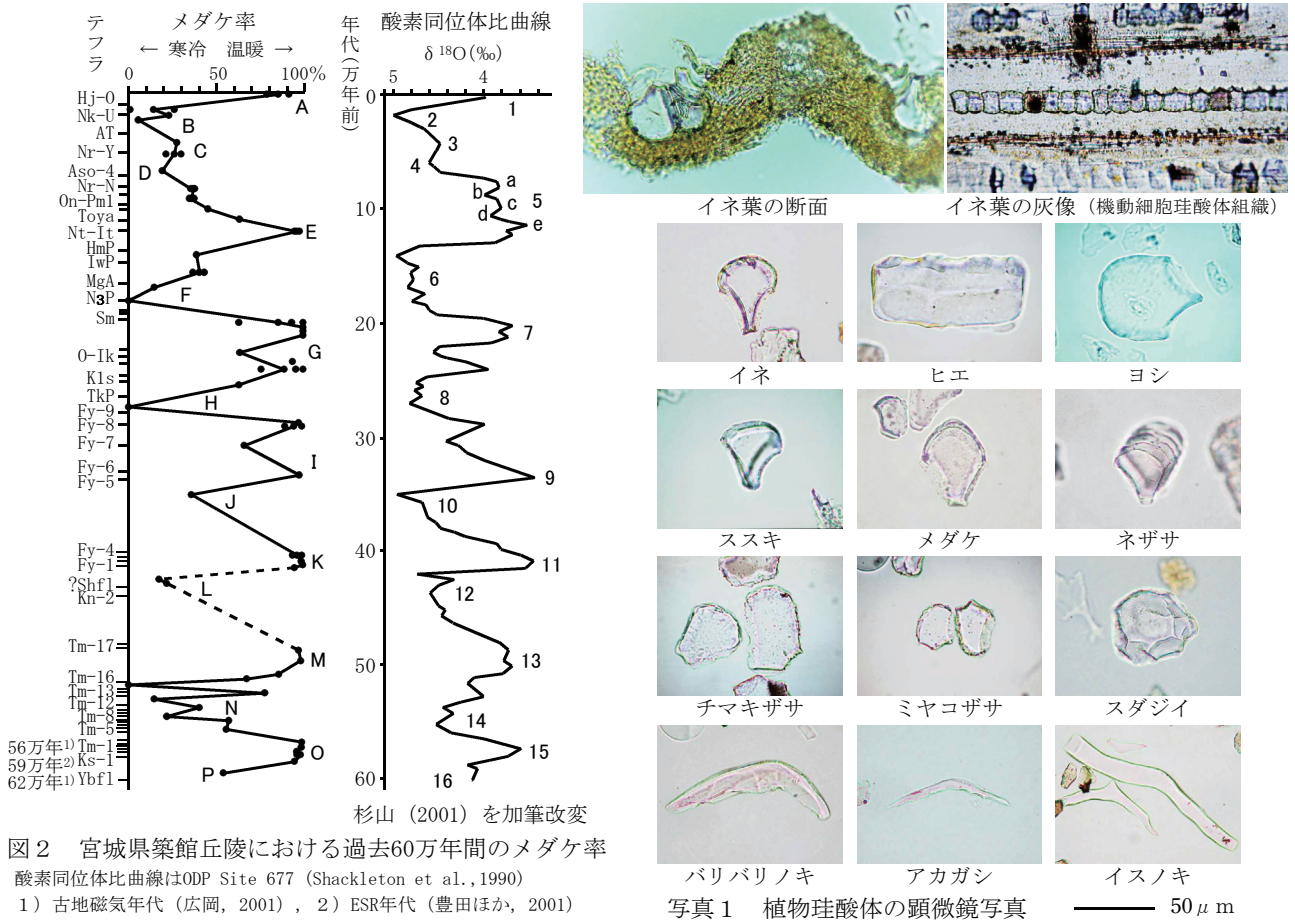


図2 宮城県築館丘陵における過去60万年間のメダケ率

酸素同位体比曲線はODP Site 677 (Shackleton et al., 1990)

1) 古地磁気年代(広岡, 2001), 2) ESR年代(豊田ほか, 2001)