

## 植物珪酸体, その特性と応用

近藤 鍊 三<sup>1)</sup>・佐瀬 隆<sup>2)</sup>

### Opal Phytoliths, their Nature and Application

Renzo KONDO<sup>1)</sup> and Takashi SASE<sup>2)</sup>

#### 1. はじめに

人間の主要栽培植物の多くはイネ科草本の仲間である。これらの葉身, 葉鞘, 根, 花序部などに宝石のオパールと光学のおよび理化学的性質の同一な, 微小な鉱物が多数含有されている (METCALFE, 1960; PARRY & SMITHSON, 1964, 1966; BLACKMAN & PARRY, 1968; PEASE & ANDERSON, 1969; BONNET, 1972)。これらの鉱物は, 植物起源のオパールという意味で, Plant opal, Opal phytolith, Grass opal などの名称が土壌学者によってつけられている (BEARVERS & STEPHEN, 1958; SMITHSON, 1958; BARKER, 1959a, b)。一方, 植物学者は, 古くから植物体の表皮細胞に珪素が沈積することを認め, その細胞を珪化細胞と呼んだ (GROB, 1896; NETOLIZKY, 1929; PRAT, 1936)。

Plant opal (以下, 植物珪酸体, あるいは珪酸体と略記) の存在に最初に注目した一人に, 微化石研究の先駆者である EHRENBERG がいる (BARKER, 1960a)。彼は, 空気塵, 雨水, 泥炭, 珪藻土などから形態の異なる多数の植物珪酸体を分離, 記載し, ある種のものが特定の植物に由来することを明らかにした (EHRENBERG, 1847, 1854)。

その後, 若干の空白期間があるものの, 植物組織中の珪酸体の形態, 分布, 数量が多様多様で, しかも特定の植物に固有であることが主として植物学者によって認識され (GROB, 1896; 大木, 1927-30; 早田, 1929; 佐竹, 1929-30; 加藤, 1932-33; PRAT, 1936, METCALFE, 1956, 1960), また, ロシアの土壌学者によって物質循環の観点から土壌中の植物珪酸体についての研究が進められてきた (RUPRECHT, 1866; TYRIN, 1937; Usov,

1943)。しかし, 環境復元法として植物珪酸体が注目され, その研究が飛躍的に進展したのは 1950 年代に SMITHSON (1956a, b, 1958) の報告が公表されてからである。わが国における植物珪酸体研究の先駆者である菅野・有村 (1958a, b) および加藤 (1958) によって報告がなされたのもこのころである。

植物珪酸体研究の初期のころに, 前記の EHRENBERG (1838) によりトウヒの化石も発見されている。花粉を用いた環境復元法 (花粉分析) は, 前世紀の後半から北歐諸国を中心に活発に行われ, その研究業績は膨大である (中村, 1967; 塚田, 1974)。一方, 植物珪酸体は, 一部の研究者を除きほとんど注目されず, 花粉研究に大きく遅れをとった。その最大の理由としては, 同一植物でも部位の違いによって生産される珪酸体の量および種類が多様で, しかも, 植物間で類似の珪酸体が多数含有されているために, 植物珪酸体の特徴を十分把握できず, 形態の記載および分類に時間を要したことがあげられる。また, 植物珪酸体は, 珪酸集積の多い植物以外に形成されず, 古環境の復元法としては総合性に欠けると見なされたことも大いに関係していると思われる。

総合性に優れる花粉分析にもいくつかの弱点がある。まず, 花粉はかなり遠方まで飛散するため広域的な植生を復元するには適するが, 局所的環境の復元にはあまり有効とはいえない。また, 地表に落下後, 比較的早く分解消失するクスノキ科 (中村, 1967; TSUKADA, 1967) などの樹木, ならびに花粉の形態が類似するイネ科植物 (中村, 1967) の同定にはあまり適さない。さらに, 花粉は還元状態下の泥炭地および海底などに落下した場合には半永久的にその場所に保存されるが, 火山灰地のような通気性の良い土壌, あるいは堆積物では花粉外壁の主

1) 帯広畜産大学環境土壌学研究室 Laboratory of Environmental Soil Science, Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine.

2) 盛岡第四高等学校 Morioka Fourth High School.

成分であるスポロポレニンは酸化分解され残存しにくい(中村, 1967).

一方, 植物珪酸体は, 風塵, 糞として遠方まで運ばれるものもあるが (SMITHSON, 1958; BARKER, 1959b, 1960d; FOLGER *et al.*, 1967), 飛散の程度も低く, 概して移動性に乏しい. そのため局所的な植生の復元には花粉より優れた面がある. また, 有機物(泥炭, 腐植)に乏しく, 花粉化石がさほど含有していない堆積物および土壌を対象とした場合, 花粉分析に匹敵する古環境復元法として大いに期待されている (ROVNER, 1971). そして, なによりも, 植物珪酸体は花粉で不十分なイネ科植物の同定にその力を発揮することである (KURMANN, 1982). このように, 植物珪酸体分析は新しい可能性を秘めた古環境復元のための解析法であるといえよう.

現段階では, イネ科植物を中心に, カヤツリグサ科, シダ類, ツククサ科, ラン科などの草本類, ヤシ科を含む樹木類について研究がおし進められているにすぎず, また, それらの植物でも全ての部位について検索されているわけではない.

しかしながら, これまで明らかにされた範囲内でも, 植物の各グループには特徴的な形態の珪酸体がそれぞれ確認されており, 植物珪酸体分析による古環境復元はこれからますます発展することが期待されている (LUTWICK, 1969; ROVNER, 1971, 1975; GEIS & JONES, 1973; 加藤, 1977; WILDING *et al.*, 1977; 塚田, 1980; PEARSALL, 1982).

筆者らは, これまで植物珪酸体について数回にわたり紹介(近藤, 1974, 1975, 1977, 1983a, b, 1984a; 佐瀬, 1980c)する機会を得たが, 十分意をつくしたとはいえない.

そこで, 本稿ではすでに紹介した内容を含め, 植物珪酸体の基礎的な側面と植物珪酸体の応用例を中心に論じたい.

## 2. 植物体における珪素の分布および役割

大部分の植物はあらゆる部位に珪素を多少とも沈積させるが, とくに珪素集積の高い植物種や部位がある.

珪素集積の高い植物は, 系統樹の中でコケ植物, シダ植物のヒカゲノカズラ類, トクサ類およびその一部の科, イネ科, カヤツリグサ科の一部に局存している(高橋, 1976a, b, 1981, 高橋ほか, 1981). また, 植物体内で珪素が最も集積する部位は葉部であり, イネ科植物では表皮細胞, 樹木類では維管細胞と表皮細胞において珪素の集積が著しい(PARRY & SMITHSON, 1966; BONNET, 1972;

GEIS, 1973; 近藤, 1975, 1983a). これは, 葉部でとくに蒸散作用が活発に行われ, 『蒸発皿効果』として珪素が沈積するためであると考えられている(BABA, 1956; 吉田, 1965). このことは, 成熟した植物,あるいは生育期間の長い植物が若い植物に比べて概して珪素含量が多く(PARRY & SMITHSON, 1964; WILDING & DREES, 1968; JOHNSTON *et al.*, 1967; SANGSTER, 1970), また熱帯および亜熱帯地域の樹木が温帯地域の樹木に比べると珪素含量が高い傾向にあるという事実(Amos, 1952)とよく符合している.

一般に単子葉被子植物は双子葉植物の10から20倍の珪素を含有している(WILDING *et al.*, 1977). とくに, イネ科植物では20%以上の珪素を含有している種もあるが, 普通乾物当たり5~15%である(NORGREN, 1973; 高橋・三宅, 1976a; WILDING & DREES, 1968). 他方, 多くの樹木類の珪素含量は1%以下(最大9.4%, Amos, 1952)であり, とくに針葉樹のそれは少ない. しかし, 若干の樹木, 例えばモクレン科, クワ科, ブナ科およびニレ科の一部はイネ科植物に匹敵するほど高い珪素を含有することもある(WILDING & DREES, 1971; GEIS, 1973; 近藤, 1975). 以上のように, 植物体内での珪素含量は, 植物の種類, 部位および生育時期などによって異なる. これを決定する要因としては, 植物の潜在的珪酸吸収能, 蒸散作用, 土壌条件(とくに, 水素イオン濃度, アルミニウム・鉄の存在)などの相連があげられる(JONES & HANDRECK, 1963, 1967).

植物における珪素の栄養生理学的役割については, 一部(ケイ藻, イネ)を除いてあまり明らかにされていないが, 一般には植物体の骨格的役割を果たしたり, 葉部の凋萎を整えたり, また病害虫に対して保護作用をしたりするとされている(YOSHIDA *et al.*, 1962).

## 3. 植物珪酸体の定義, 特性

植物珪酸体は, コケ植物門, 維管束植物門などの高等植物の細胞組織に充填する非晶質含水珪酸( $\text{SiO}_2, n\text{H}_2\text{O}$ )と定義される. したがって, 単細胞藻類など, 下等植物の細胞膜に由来する含水珪酸は植物珪酸体とは呼ばない(近藤, 1983a).

植物珪酸体に対して, 放散虫および海綿動物の体の内外に発達する非晶質含水珪酸があるが, これは動物珪酸体(宇津川ほか, 1979)と呼ばれており, とくに, 地層の示準化石として地質学的に重要である. なお, 植物珪酸体と動物珪酸体は, 貝殻, 歯などと共に Biolith (Bio: life, lith: rock)の範疇に包含される(JONES & HAY, 1975).

植物珪酸体の化学組成は、珪酸 (67~95%) を主成分とし、それに水分 (3~12%)、有機炭素 (<0.1~6%) および少量の無機元素 (Al, Na, Ca, Fe, K, Ti) を含んでいる (KANNO & ARIMURA, 1958b; JONES & BEAVERS, 1963; JONES & MALINE, 1963; ARIMURA & KANNO, 1965b; WILDING *et al.*, 1977; BARTOLI, 1985). なお、植物体、土壌、および宝石のオパールの間で化学組成に大きな違いは認められない (WILDING *et al.*, 1977).

植物珪酸体は、通常無色であるが、褐色あるいは黒色を呈するものもある (JONES & MILNE, 1963). 有色の程度は、含有する有機炭素量に多少とも関係する (WILDING *et al.*, 1977). 土壌中では酸化鉄の被覆で黄褐色から褐色を帯びるが、脱鉄処理により本来の無色となる (KANNO & ARIMURA, 1958b; 有村・菅野, 1965a, b). 光学性は一般に等方体であるが、異方体を示すものも稀にある (加藤, 1960; WILDING & DREES, 1976). また、植物珪酸体は、土壌中で長期間埋積すると玉髓を経て二次石英に変質することもある (BEAVERS & STEPHEN, 1958; JONES & BEAVERS, 1963; YARILOVA, 1952).

屈折率は 1.41~1.48 ときわめて低く、比重は 1.5~2.3 g/cc である (JONES & BEAVERS, 1963; KANNO & ARIMURA, 1958b; WILDING *et al.*, 1967). これらの値は、植物珪酸体の含水量に左右され、例えば水が約4%から28%に増加すると屈折率は 1.46 から 1.40 に減少する。同様に、比重も 2.3 から 1.8 に減少する (WILDING & DREES, 1976). 比重は含水量のほかにも、珪酸体内部の空洞の有無、有機物の混入率および微細な非晶質珪酸球体の配列などの違いによって変化する (WILDING *et al.*, 1977).

粒径は、2 $\mu$ 以下から200 $\mu$ 以上にもおよび、植物種によってかなり幅が認められる (JONES & HAY, 1975). イネ科植物および樹木から分離した珪酸体は 50~70% が 5 $\mu$ 以下の粒径である (JONES & BEAVERS, 1964b; WILDING & DREES, 1971; GEIS, 1973).

比表面積は、珪酸体の粒径および形態によって異なるが、0.4~122 m<sup>2</sup>/g とかなり大きい (PEINEMANN *et al.*, 1970; WILDING & DREES, 1976).

X線回折は、4 $\text{Å}$ と10 $\text{Å}$ 付近に微弱な幅広い反射がみられ、“X線非晶質”であり (WILDING & DREES, 1974, 1976), 人工のシリカゲルに極めて類似している (JONES & SEGNI, 1971). 土壌および植物体において、一部、石英、 $\alpha$ -クリストバル石、トリデマイドのピークが観察されるが、これは珪酸体分離時の処理温度および処理

時のアルカリ金属の存在によって非晶質珪酸が結晶性珪酸へ転移した結果と考えられている (LANNING *et al.*, 1958; JONES *et al.*, 1964; JONES & MILNE, 1963; 有村・菅野, 1965a).

なお、樹木葉部起源珪酸体のX線回折によれば、 $\alpha$ -石英およびクリストバル石は、自然の代謝作用によって葉中で合成されたものであり、それらは分離調整時に生成される人工物でないことが WILDING & DREES (1974) によって指摘された。したがって、植物および土壌から珪酸体を分離する際には、低温灰化 (60°C)、あるいは湿式灰化のいずれか好ましい分離調整法を用いるべきである (WILDING *et al.*, 1977).

土壌および植物体から分離した珪酸体の赤外線スペクトルは、シリカゲルおよび天然オパールのそれとわけて類似している (YOSHIDA *et al.*, 1962; JONES & BEAVERS, 1963; 有村・菅野, 1965a; WILDING *et al.*, 1967). 研究者によってピーク位置にわずかの差が報告されているが、吸収帯は 460~470, 785~800, 1050~1110, 1625~1650, および 3425~3700 cm<sup>-1</sup> の領域にそれぞれ分布している。

電子顕微鏡 (TEM) では、植物珪酸体は不規則な非晶質珪酸の球体 (0.5~1.0 $\mu$ ) によって充填された内部構造が観察される。一般に宝石のオパールに比べてその球体は小さく、また、それらの配列も不規則である (JONES *et al.*, 1966; WILDING & DREES, 1974, 1976). 時折、植物体 (とくに、樹木) で観察される不透明珪酸体は、光学顕微鏡では同定できないが、走査型電子顕微鏡 (SEM) はその同定にきわめて有効である (WILDING & DREES, 1971, 1973).

植物珪酸体の 50~600°C の反応範囲における熱的特性は、珪酸体の給源植物、粒径、および分離調整時の処理法などの違いに左右されるが、95~120°C に1ないし数個の水分に由来する吸熱ピーク、350~500°C に有機物の酸化に由来する幅広い発熱ピークがみられる (JONES & BEAVERS, 1963; JONES & MILNE, 1963; TWISS *et al.*, 1967).

土壌の各種環境下における植物珪酸体の風化抵抗性については不明な点が多いが、第三紀層および中生代の堆積物から植物珪酸体が発見されていることから、埋積環境さえ良ければかなり安定といえよう (BARKER, 1960a; JONES, 1964; GILL, 1967).

WILDING & DREES (1974), WILDING *et al.* (1979) および BARTOLI & WILDING (1980) は、植物珪酸体の安定性を冷・温水あるいは薬品にたいする溶解性から評

価した。すなわち、冷水および温水処理によって植物珪酸体から 2~50 mgSi/l が溶解し、また、0.1 N NaOH 煮沸処理によって樹木起源珪酸体の 35~80% が溶解した。近藤ほか(未発表)によれば、1% 炭酸ナトリウム、0.6 N 塩酸および温水処理 (60°C, 1時間) による植物珪酸体の溶解性は、炭酸ナトリウム (25~176 mg Si/l) 温水 (0.2~9.6 mg Si/l) > 塩酸 (0.13~1.6 mg Si/l) の順であり、また植物種間で差が認められた。とくに、針葉樹起源珪酸体はいずれの溶媒に対して抵抗性があった。このような植物珪酸体の溶解性の違いは、珪酸体の比表面積、アルミニウム含量、和水量、年齢、および珪酸体を包む植物組織の分解率など、多くの要因が複雑に関与した結果と考えられている (BARTOLI & SELMI, 1977; BARTOLI & WILDING, 1980)。

#### 4. 植物珪酸体の分離・定量法

##### 1) 植物体

植物から珪酸体を分離する方法は乾式法と湿式法の二通りがある (図-1 参照)。

乾式法 (LANNING *et al.*, 1958; LANNING, 1961) は、植物試料を磁性ルツボに取り、マッフル炉で灰化・冷却後、秤量する最も簡単な方法である。ただし、マッフル炉に入れる前に試料は水洗いと稀塩酸温浸したものを用いる。乾式法は試料の種類、加熱温度・時間などで灰化の良し悪しが決まる。また、加熱によって植物珪酸体は石英 (573°C)、 $\alpha$ -クリストパル石 (700°C)、トリデマイト (900°C) に一部変質 (BEAVERS & STEPHEN, 1958; PARFENOVA & YARILOVA, 1962) したり、珪酸体同志が結合 (JONES & BEAVERS, 1964a) したりするので、光学性や物理性を調べる場合注意を要する。500~700°C の条件で5時間程度の灰化が一般的である (菅野・有村, 1958a, b; JONES & BEAVERS, 1964a; JONES & MALINE, 1963; ROVNER, 1971; TWISS *et al.*, 1969)。

湿式法 (SMITHSON, 1958; STERLING, 1967) は、化学薬品により有機物のみを分解する方法で、操作がやや複雑である。化学薬品として、過酸化水素、クロム酸、過塩素酸、硝酸、硫酸などが用いられている。とくに、過塩素酸、硝酸、硫酸の混液 (4:10:1) あるいは過塩素酸、硝酸混液 (1:1) による分解法が広く採用されている (TWISS *et al.*, 1969; ROVNER, 1971; BONNET, 1972; 佐瀬・加藤, 1976a; 加藤, 1977; 塚田, 1980; 近藤, 1981)。この方法は、分解中に刺激ガスおよび爆発性の過塩素酸ガスが発生するのでドラフトを使用すること、分解完了後、水洗いを遠心分離、あるいはデカンテーション

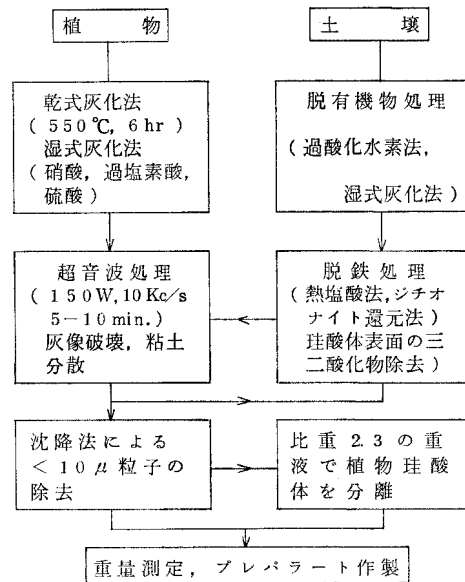


図 1 植物珪酸体の分離・定量法

ンで十分おこなうことが大切である。

なお、乾式および湿式の両方法で分離した試料は重量を測定した後、超音波処理によって灰像を完全に破壊し、10 $\mu$ 以下の粒径を沈降法によって除去する。さらに、10 $\mu$ 以上の珪酸体は形態観察用として保存する。

上記の方法と平行して、植物体を灰化した後、その灰の組織像を調べる灰像法 (MOLICH, 1920) を実施すべきである。

灰像法 (渡辺, 1973-4) には、乾式法と湿式法がある。乾式法は、マッフル炉 (またはバーナー) で灰化する一般的な方法と、低温プラズマ灰化法 (UMEMOTO & HOZUMI, 1973) がある。前者は市販の灰化器 (またはルツボ) で調整するが、灰像が収縮したり、もろくなりやすいので取扱に注意を要する。反面、後者は組織の破壊がほとんどないが、装置が高価である。乾式灰化法に対し、過酸化水素を用いる湿式灰化法は組織の変化が少なく、なによりもイネ科植物葉身の表と裏側を分離してそれぞれ観察出来るという利点がある。筆者らは、この方法で良い結果を得ており、多くのイネ科植物葉身の灰像標本を収集している。

##### 2) 土壌

土壌から植物珪酸体を分離する方法 (図-1 参照) は、①. 脱有機物処理 (過酸化水素法, 湿式灰化法), ②. 脱鉄処理 (ジチオナイト還元法, 熱塩酸法), ③. 超音波処理 (150 W, 10 Kc/s, 5~10 分) および④. フルイ分けおよびデカンテーション (沈降法により 10 $\mu$ 以下の

粒子を除去)の各操作をへた後、重液(比重 2.30)で行う(佐瀬・近藤, 1974; 加藤, 1977; 近藤, 1983a)。この操作で最も重要なことは、土壤粒子を完全に分散させることで、このことがその後の珪酸体分離の良し悪しを決定する。したがって、有機物と鉄の除去は念入りに行うことが肝要である。また、植物珪酸体はアルカリ性で溶解し易いので、可能な限り酸性条件で各処理を行う必要がある。なお、植物珪酸体は水道水中にも含まれることがあるので、デカンテーション時には可能な限り純水を用いる。

重液は、プロロホルム・アセトン(またはニトロベンゼン)混液、四臭化エタン・エチルアルコール混液、ツレー液(ヨウ化カリ:ヨウ化水銀:水=7:6:2)などが用いられている(KANNO & ARIMURA, 1958b; JONES & BEAVERS, 1964b; OBERHOLSTYER, 1968; ROVNER, 1971; JONES & HAY, 1975)。

重液分離は、重液と試料をほぼ 20:1 の割合で混合し、遠心分離によって珪酸体を抽出する。その際、浮上物は肉眼で認められなくなるまで数回繰り返す。浮上部(珪酸体)はスポイト、特殊な遠心管(近藤, 1982a, c)、あるいは遠心管の下部を凍結させること(OBERHOLSTYER, 1968)などによって、ろ紙上に回収する。回収した珪酸体は秤量管に移し重量(w)を測定する。

なお、重液分離法の土壤試料の粒径は、研究目的によって異なるが、一般に 20~50  $\mu$ 、10~100  $\mu$ 、10~200  $\mu$  が用いられている(JONES & BEAVERS, 1964a, b; 佐瀬・近藤, 1974; KONDO, 1977)。

あらかじめ土壤の容積重を測定しておくこと、次式によって土壤中の珪酸体含有量(Pw)が算出される(加藤, 1977)。

$$Pw = w \cdot s \cdot d \cdot \delta \cdot 0.1 \quad (\text{mg/cm}^2) \quad (1)$$

ただし、s は 10~100  $\mu$  画分試料の重量%, d は土層の厚さ、 $\delta$  は土壤の仮比重である。上述の重液による珪酸体の重量測定は、かなり煩雑であり、また浮上部に珪酸以外の夾雑物が混入することも稀でない。そこで、試料中の珪酸体個数(以下珪酸体密度と呼ぶ)を計測する方法が提唱されている(藤原, 1976a, b)。

珪酸体密度は、重量法、容積法およびガラス・ビーズによる間接法によって測定されている。重量法は、数 mg の試料をプレパラートに展開した後、珪酸体個数を直接数える方法であるが、その精度に問題がある(藤原, 1976b)。容積法は、グリセリン中に試料を希釈し、マイクロピペットで一定量を吸引し、プレパラートに展開する方法である。時間と労力をおしまなければ比較的良好

な方法といえよう。ガラス・ビーズ法は、一定の大きさのガラス・ビーズを同定率確定用として使い、それらの一定量を土壤と混合した後、ガラス・ビーズと珪酸体の粒数比から珪酸体密度を間接的に次式にしたがって求める(藤原, 1976b)。

$$Sp = \frac{a \times Gw}{Sw} \times \frac{\beta}{\alpha} \quad (2)$$

ただし、Sw は試料の乾燥重量、Gw は添加ガラス・ビーズ重量、a はガラス・ビーズ 1 g 中の個数、 $\alpha$ 、 $\beta$  はそれぞれ数えたガラスビーズおよび植物珪酸体の個数を表している。

この方法は、重量法および容量法に比べ時間的にも労力的にも有利であるが、ガラス・ビーズの比重、粒径を試料のそれに合わせることで、それらの混合が十分なされることが前提である。

なお、植物珪酸体 1 g 中の個数(n)がわかれば、次式から試料の植物珪酸体含有量(Pw)が算出できる。

$$Pw = \frac{Sp}{n} \quad (\text{g}) \quad (3)$$

上述の方法のほかに、粒数パーセントを重量パーセントに換算する試みが提示されている(加藤, 1977; 加藤ほか, 1980)。すなわち、細砂部(0.2~0.02 mm)中の大型珪酸体の粒数パーセント(n')を求め、次式によって珪酸体含量(Pw')を算出する。

$$Pw' = n' \cdot \gamma \cdot fs \cdot \delta \cdot 0.1 \quad (\text{mg/cm}^2) \quad (4)$$

ただし、fs は細砂部の重量パーセント、 $\gamma$  は n' を細砂当たり重量パーセントに換算する係数(0.55)である。

### 3) 土器胎土

土器胎土から植物珪酸体を分離する方法は、基本的に土壤のそれと同じである。土器は焼成(600~800°C)しているので、土壤と同じ方法では粒子を分散させることは極めて難しい。そこで、前処理として土器片を水中に浸し、低真空で軟化した後、機械的に圧砕(藤原, 1980)したり、鉄乳鉢で胎土中の細レキを注意深く粉碎した後、10 数回脱鉄処理を繰り返す方法(上條, 1984)が行われている。最近、近藤(未発表)は、湿式灰化(硝酸、過塩素酸、硫酸混液)および超音波処理によって土器片を軟化する方法を検討した。この方法は上記の二つの方法に比べて、効率良く土粒子をほぐすことができる。

なお、上記の各処理前に土器片表面の付着物をグライNDER、あるいは超音波洗浄によって除く必要がある。

## 5. 植物珪酸体の形態およびその特徴

植物珪酸体の形態は、それらの給源細胞組織の形には

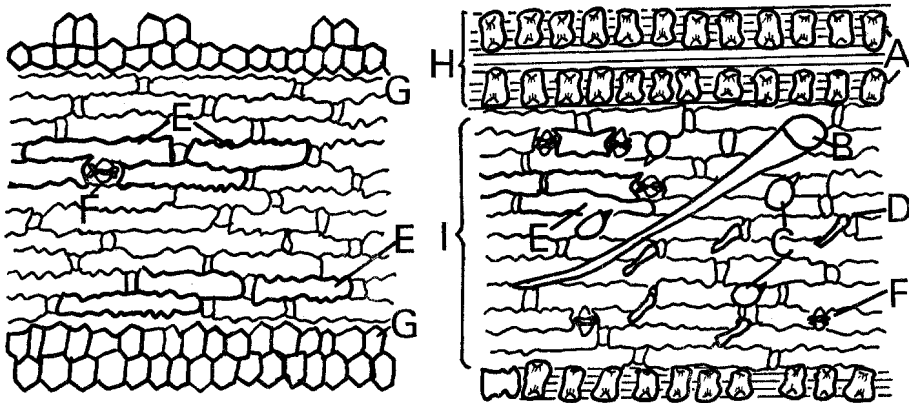


図 2 葉身表皮細胞中の植物珪酸体

A: 短細胞 (タケ型珪酸体), B: マクロヘアー, C: プリッケルヘアー (ポイント型珪酸体), D: ミクロヘアー, E: 長細胞 (棒状型珪酸体), F: 気孔, G: 機動細胞 (ファン型珪酸体), H: 葉脈 (実線の部分に葉脈が走っている), I: 葉脈間。

左図は、エゾミヤコザサ (*Sasa apoiensis*) 葉身表側, 右図は裏側。

ば依存する (図-2 参照)。

イネ科植物の皮表細胞は、短細胞、長細胞、機動細胞および特殊細胞 (コルク、気孔、プリッケルヘアー、マクロヘアー、ミクロヘアー、乳頭突起) から構成される (METCALFE, 1960)。このうち、短細胞は葉脈上の表皮細胞に配列する小型の細胞で、生育のごく初期に珪化する。この内部に形成される珪酸体の形状は分類指標の一つとされている (PRAT, 1936; METCALFE, 1960)。すなわち、キビ亜科では垂鈴形 (写真図版 I. J~R), イチゴツナギ亜科<sup>3)</sup> ではボート形、帽子形、星状形 (写真図版 I. S~W), タケ亜科では長座鞍形 (写真図版 I. A~D), スズメガヤ亜科では短座鞍形 (写真図版 I. E~G), ダンチク亜科では垂鈴形、あるいは短座鞍形 (写真図版 I. H) の各珪酸体が形成される。

短細胞以外の細胞も生育がすすむにつれて漸次珪化し、細胞の形に支配された特有な珪酸体となるが、短細胞と異なり全ての細胞が珪化するわけではない。

長細胞には棒状形の珪酸体 (写真図版 II. I~M) ができ、それらは平滑辺、刺状辺などを有し、側面が平滑状、刺状あるいは鋸歯状の突起を示すものなどがある (TWISS *et al.*, 1969)。

機動細胞は、葉の展開運動を司り、水分蒸発防止機能をもつといわれる葉脈間に配列する大型の細胞である (SMITHSON, 1958; PARRY & SMITHSON, 1964)。この細胞由来の珪酸体 (写真図版 II. A~H) はその断面の形状

が扇 (または、食パン) 状を呈し、属あるいは一部種レベルで微妙な差異が認められる (加藤, 1960; 佐瀬・近藤, 1974; 藤原, 1976b; 藤原・佐々木, 1978; 近藤ほか, 1982; 河室, 1983c, 1984)。とくに、イネとその近縁種では、属・種レベルで断面形状、側面突起、裏面紋様の大きさなどに差があり、相互に区別される (藤原, 1976b, 藤原・佐々木, 1978)。一般にイチゴツナギ亜科では、機動細胞の発達が悪く (佐瀬・近藤, 1974; 藤原, 1983), それ由来の珪酸体はほとんど形成されない。プリッケルヘアーは、最も一般的な毛の細胞 (BARKER, 1960b) で、石ぞく状、カギ状形態の珪酸体 (写真図版 II. N~P) になる。マクロヘアーは、突起物の長い大型の細胞で、ゴルフクラブ状の珪酸体 (写真図版 II. T, U) になる。ミクロヘアーは、2細胞性の小型細胞で、スワン型フラスコ状、パイプ状、L字状形態などの珪酸体 (写真図版 II. Q~S) になる。気孔は、垂鈴形あるいは上腕骨状形態の珪酸体 (写真図版 III. E) になる。

この他に、柵状細胞に由来するグローブ状あるいは和ぐし状珪酸体 (写真図版 II. V~X), 導管由来の棒ヤスリ状珪酸体 (写真図版 III. B, C), コルク細胞由来の皿状珪酸体 (写真図版 III. G) などがある。

以上のような珪酸体の特徴は、主にわが国のイネ科植物を対象したものであるが、諸外国の植物、例えばブラジル、セラード地方のイネ科植物には、日本と異なる形態の珪酸体が多数観察される (SENDULSKY & LABOUR-

3) かつては、ウシノケグサ亜科として分類されていたが、今日ではイチゴツナギ亜科 (Pooideae) として分類されるのが普通である。

AIU, 1966; CAMPOS & LABOURIA, 1969; FIGUEIREDO & HANDRO, 1971). 今後, イネ科植物起源珪酸体の汎世界的カタログ作りが必要である.

なお, 葉部以外の各部位にも珪酸体は形成されるが, その研究はまだ不十分である (PEASE & ANDERSON, 1969; YECK & GRAY, 1969; BLACKMAN, 1971).

樹木葉部起源の珪酸体の多くは, 前述のイネ科植物起源のそれと明瞭に区別されるが, 針葉樹起源珪酸体の一部は, イネ科植物の機動細胞および長細胞起源珪酸体に酷似している (BRYDON *et al.*, 1963; WILDING & DREES, 1971; GEIS, 1973; KLEIN & GEIS, 1978; 近藤・隅田, 1978). それらの珪酸体は, 柔細胞, 仮導管に由来する単純な立方体あるいは不規則多面体形態を示し, それらの側面および表面にへソ状の円孔が観察される (KLEIN & GEIS, 1978). BRYDON *et al.* (1963) は, トガサワラ属の星状厚膜細胞に由来する珪酸体が他の樹木のそれと明瞭に区別されることを報告した.

広葉樹起源珪酸体の形態は非常に豊富である. 例えば, モクレン科のタイサンボク, マンサク科のイヌノキ, ブナ科などは維管束細胞由来のY字形, あるいは『へ』の字形 (写真図版Ⅳ. I, J), ニレ科, クワ科, スイカズラ科のタニウツギなどは表皮毛細胞由来の中空ソケット状珪酸体 (写真図版Ⅳ. M) を含有する (GEIS, 1973; WILDING & DREES, 1973; 近藤・ピアソン, 1981). 多くの広葉樹は, 葉部表皮細胞に由来する四ないし五角形板状, はめ絵パズル状珪酸体 (写真図版Ⅳ. A, B) を含んでいる (GEIS, 1973; 近藤, 1975; WILDING & DREES, 1971, WILDING *et al.*, 1977; 近藤・ピアソン, 1981). この他に, クスノキ科のヤマコウバシおよびクワ科は球状 (写真図版Ⅳ. D), タブノキはブレード状 (写真図版Ⅳ. F, G), モクレン科およびスダジイは多面体状, 紡錘状あるいは塊状形態の珪酸体 (写真図版Ⅳ. C, E) をそれぞれ含有している (近藤, 1975; KONDO, 1977; 近藤・ピアソン, 1981). また, ヤシ科はその葉部表皮細胞にコンペイ糖状, 表面が顆粒状突起物で覆われた円錐状あるいは円板状, とぐる状形態の珪酸体が検出される (SEWDLKSY & LABOURIAU, 1966; KONDO, 1977; 近藤・隅田, 1978). このうち, コンペイ糖状珪酸体 (写真図版Ⅳ. Q, T) は多くのヤシ科でごく普通に観察される (TOMILINSON, 1961; CUTLER, 1978). 一方, 円錐状およびとぐる状珪酸体は一部の属にのみ観察され, 前者 (写真図版Ⅳ. R, S) はクロツグ属 (近藤, 1984b), 後者はクジャクヤシ属 (SENDULSKY & LAUBOURIAU, 1966) に由

来する<sup>9)</sup>. なお, コンペイ糖状珪酸体に類似するものは, オーストラリアおよび南アフリカに自生するイグサ目のレスチオン科の茎に含有されている (CUTLER, 1978).

珪酸体は樹木葉部にのみ形成されるわけではなく, 材部および樹皮にも検出されている (DRUM, 1968; 平田ほか, 1972; SCURFIELD *et al.*, 1974; RICHER, 1980; NANKO & CÔTE, 1980; 南光・CÔTE, 1981).

木材組織中の珪酸体の存在は, 熱帯産材の主要な特徴の一つとされており, 須藤ほか (1967) は多数の南方材について珪酸体の存在を検討した.

RICHER (1980) は, 約 750 種のクスノキ科およびその類縁科材中の珪酸体を走査型電子顕微鏡で検討し, その放射組織, 柔細胞, 繊維中には Smooth grains, Rough grains, および Aggregates の三タイプの珪酸体が含まれていることを報告した. すなわち Smooth grains は, 極めて小さい (5~12  $\mu$ ) ほぼ球状の粒子で, *Litsea*, *Beilschmiedea* の一部の種および *Endlicheria krukovii* にのみ観察される, ごく稀れた珪酸体である. Rough grains は, 8  $\mu$  から 35  $\mu$  の不規則な外観を示す球状粒子 (成長したカリフラワーの花序に類似) で, *Mezilaurus* などに典型的に観察される珪酸体 (写真図版Ⅳ. N) である. Aggregates は, 不規則な外観および深い亀裂の表面構造を持つ, 最も一般的な珪酸体 (ミミズの糞塊に類似) である. このタイプの珪酸体は, 粒径にかなり幅が見られ (15~70  $\mu$ ), *Beilschmiedea*, *Endinandra*, *Potameia* の殆ど全ての種および *Cryptocarya* の一部の種で検出される.

イネ科植物および樹木以外の研究は甚だ不十分といえるが, 若干の植物で特徴的形態の珪酸体が検出されている (ROVNER, 1971; 近藤, 1982a). 例えば, カヤツリグサ科の葉部表皮細胞には先端が尖った中空ハット状 (顆粒状突起物が周辺に配列) の珪酸体 (写真図版Ⅲ. K~M) が観察され (PARFENOVA & YARILOVA, 1962; WITTY & KNOX, 1964; MEHRA & SHARMA, 1965; 近藤・原田, 1980), それらはカヤツリグサ科に固有であるので, MEHRA & SHARMA (1965) によってカヤツリグサ型と命名された. また, それらの種子の表皮細胞中にも, ホック状 (写真図版Ⅲ. O, P) および表面が多孔質の五ないし六角形板状珪酸体 (写真図版Ⅲ. Q) が検出される (RAESIDE, 1970; 佐瀬, 未発表).

ラン科シンピジュウム属は, ヤシ科クロツグ属の珪酸体に極めて似ており, 光学顕微鏡では区別することは困難であるが, それらを走査型顕微鏡で観察すると, シン

4) 最近, コモチクジャクヤシ葉部の表皮細胞を観察したところ, クロツグ属と同じ形態の珪酸体であることが判明した.

ビジュウム属の珪酸体(写真図版Ⅲ. V, W)は小球体で裏面が満たされた円盤状形態を示し、クロツグ属のそれと明確に区別される(近藤, 1984b)。この他に、ツクサ類、カンナ類、*Criobalanea*, *Podoslemonaceae*, *Rapalaceae*にも特徴的形態の珪酸体が含有されている(CARLIQUIST, 1961; SENDULSKY & LABOURIAU, 1966)。シダ植物のトクサ類、ヒカゲノカズラ類およびヒダ類の一部は珪素含有量が高いが、大部分は同定不能の小破片である。トクサ類には背骨状のほかに、突起物をもつヘルメット状珪酸体(写真図版Ⅲ. T, U)がみられる(近藤・原田, 1980)。また、ワラビなど一部のシダ類には、その断面が三角形で、表面に多数の小孔を有する棒状形態の珪酸体(写真図版Ⅲ. S)が観察される(近藤・佐藤, 1985; 佐瀬ほか, 1985)。シダ類、アキカラマツ草などの多くの草本類には、広葉樹起源のはめ絵パズル状珪酸体に類似した珪酸体(写真図版Ⅲ. R)がみられる。しかし、シダ類、双子葉草本起源珪酸体の研究は今のところ不備であり、今後の研究課題とされる。

なお、植物体における珪酸体の生成、発達過程および機能などについての詳細な研究は、各種の植物を対象として植物学者(または、作物学者)によって検討されている(PARRY & SMITHSON, 1958, 1964, 1966; HANDREK & JONES, 1967; BLACKMAN, 1968, 1969; BLACKMAN & PARRY, 1968; SANGSTER, 1970; KAUFMAN *et al.* 1971; TAKEOKA *et al.*, 1983; TAKEOKA *et al.*, 1983)。

## 6. 植物珪酸体の分類

植物珪酸体の分類は、イネ科植物、樹木類について一部報告されているが、すべての植物を網羅した分類案は未だ提示されていない。

イネ科植物の亜科および若干の属は、その葉脈上の短細胞に形成される珪酸体の形態に基づいて同定される。PRAT (1936)は、*Panicoideae*を *Eu-Panicoides* (*Melindeae*, *Panicaceae*, *Tripsaceae*, *Andropogoneae* の4属)と *Chlorides* (*Chlorideae*, *Zoysieae* の2属, *Eragrostis*, *Sporobolus* の2種)二グループに区別し、*Eu-panicoideae*は、垂鈴形および十字形珪酸体を、*Chlorideae*は両刃の鎌形珪酸体を含むとした。また、*Festucoideae* (*Aveneae*, *Agrostideae*, *Festuceae*, *Hordeae*)にみられる珪酸体は、円形、楕円形、矩形などの単純な幾何学的形態であると述べている。METCALFE (1956)は、鞍形珪酸体の多くが *Bambusoideae*に含まれることを報告した。館岡(1956)は、日本産、北米産およびインド産イネ科植物の表皮細胞を観察し、その珪化細胞の形態はPRAT(1936)

の分類記載と同様な結果をえた。

加藤(1960)は本邦のイネ科植物葉身中の珪酸体をまゆ型、かぎ型、棒状型、食パン型に分類し、まゆ型および食パン型珪酸体は植物種により形態が多少異なることを指摘した。

TWISS *et al.* (1969)は、PRAT, METCALFEらの植物学者のこれまでの研究成果をふまえ、イネ科植物葉身中の珪酸体を a) *Festucoid Class* b) *Chloridoid Class* c) *Panicoid Class* および d) *Elongate Class* に大別し、a)~c) *Class*は、植物分類グループと密接な関係にあることを明らかにした。佐瀬・近藤(1974)は、TWISS *et al.* (1969)の4 *Class*に機動細胞、Prickle hair由来の珪酸体およびササ属の短細胞に由来する珪酸体を付加することを提案し(表-1参照)、この分類法を用いて本邦に自生するイネ科植物、北海道の現世および埋没火山灰土壌腐植層の珪酸体組成を明らかにした。近藤ほか(1983)は、上記の分類をさらに発展させた新分類を提示した(表-2)。この分類ではイネ族由来の短細胞起源珪酸体を *Panicoid Class* から独立させ、さらに各 *Class*を形態的観点から細分する試みがなされている。

大越(1980, 1982b)は、短細胞由来の珪酸体の表面形態に着目し、それらの珪酸体を食パン状、まゆ状および芋虫(ビスケット)状に大別した。この分類は、まゆ状(垂鈴形)珪酸体の特徴を的確にとらえている点において評価されるが、名称などが独断的で、既存の分類との間に混乱を招く。

最近、BROWN (1984)は、北米中央部に自生する112種のイネ科植物各部位の植物珪酸体を、I. Plate, II. Trichome, III. Double Outline, IV. Saddle, V. Trapezoid, VI. Bilobate, VII. Polylobate, および VIII. Cross に大別し、さらに各 *Class* をごく僅かな形態的差異によって細分した。しかし、この分類には、土壤中で比較的多く検出される機動細胞珪酸体を重視しておらず、それらを長細胞珪酸体と同じ *Plate Class* に包含している。

以上の分類は、植物珪酸体の形態を基本としており、それらに起源細胞および植物分類グループを関連づけながら作成されている。そのため、ややもすると分類基準に一貫性が乏しいとみなされる。他方、形態および起源細胞のみを基準とする分類は統一性があるが、それのみでは珪酸体の給源植物がわかりづらいと言う欠点がある。

植生の歴史、古気候の推定など、応用面から植物珪酸体を見ると、それらの分類は植物分類グループとの直接



表 1 イネ科草本類のグループ別珪酸体組成 (%)\*

植 物 名	タケ型	ヒゲシ バ 型	ダンチ ク 型	キビ型	ウシノケ グサ 型	ファン 型	ポイン イ 型	棒状型	その他
ミヤコザサ	61	1				7	6	18	7
クマイザサ	18	1				35	11	14	21
チシマザサ	37	2				26	10	6	19
アズマネザサ	34	7				32	16	3	9
シホウチク	52	3				27	11	1	7
カンチク	16	15				37	20	1	11
マダケ	32	3				45	7	5	8
オヒシバ		26		+		6	41	5	22
シバ		18				18	42	1	21
ネズミガヤ		4		2		20	59	14	1
ヨシ		29	22			10	17	7	15
ヌマガヤ		5	15	51		5	15	2	7
ダンチク			+	53		3	28	2	13
イネ				15		57	12	9	7
ススキ				24		22	49	3	2
チガヤ				14		17	44	4	21
イヌビエ				54		10	31	5	+
エノコログサ				23		14	42	21	+
メヒシバ				63		4	31	2	+
トウモロコシ				36		5	23	2	33
ヤマアワ					46		26	24	4
イワノガリヤス					11		41	41	7
ハネガヤ					55	1	30	12	2
キツネガヤ					25		44	16	15
オオウシノケグサ					32	3	52	13	+
シバムギ					44		50	3	3
コムギ					45		31	16	8

\* 近藤 (1983 a)

的關係, つまり植物名がわからなければ, 十分發揮できない. 以上のことから明らかなように, 各植物と対応した分類が理想的であるが, 同一植物体には様々の形態の珪酸体(例えば, 同じタイプでも変異がある. 写真図版 V参照)が多数含有されているために, 残念ながら植物分類グループとの関連のみで全ての珪酸体を分類することは困難である. したがって, 現段階では近藤ほか(1983)の分類法(表-2)がより有効と考えられる.

今日, 大部分のイネ科植物起源珪酸体はその形態的特徴により, 亜科・属レベルまで区別される. しかしながら, *Nardus stricta* 葉中の分岐状細胞由来の『ト』の字形珪酸体 (SMITHSON, 1958), イネ葉中の機動細胞起源珪酸体 (藤原, 1976a, b; 藤原・佐々木, 1978) は, その種特有の形態を示しているため種レベルまで区別されるといわれている. 近藤・栄 (1979), 近藤ほか (未発表) は, イネ科植物起源珪酸体中, とくに短細胞由来の小型珪酸体の形態およびその粒径に着目し, 小麦類 (27種), タケ・ササ類 (80種) の属, あるいは種間の違い

を検討し, 属, 一部種レベルまで区別される可能性を示した. UMEMOTO (1973) は, 小麦の野性型と栽培型の間に, 珪酸体の形態, 粒径, 葉中での配列にかなりの違いがあることを指摘した.

樹木起源珪酸体は, イネ科植物と同様に多種多様な形態を示すが, その分類はほとんど報告されていない.

ROVNER (1971) は, 植物珪酸体の古生態学への応用について論じ, その中で体系的な珪酸体分類の必要性を指摘し, 同時に広葉樹, 針葉樹, 双子葉草本類, イネ科草本およびイネ科以外の単子葉草本類起源珪酸体の形態的特徴を調べた.

GEIS (1973) および KLEIN & GEIS (1978) は, 米国, ニューヨーク州に自生する 23 属 36 種の広葉樹および 6 属 17 種の針葉樹葉部の珪化度と珪酸体の形態を詳細に検討し, それらの樹木起源珪酸体が科・属レベルで区別されることを指摘した. しかし, 樹木起源珪酸体の分類案については全く触れられていない.

近藤・隅田 (1978), 近藤・ピアソン (1981) は, 本邦

表 2 イネ科植物起源珪酸体の新分類 (近藤・佐瀬・相馬, 1983)\*

- I. **Orizoid Class** イネ族  
イネ, サヤヌカグサタイプ等 2タイプの亜鈴形
- II. **Panicoid Class** キビ亜科, ダンチュク亜科, スズメガヤ亜科の一部  
1. 亜鈴形: 1) 短軸 2) 長軸 3) 正常  
4) こぶ付き 5) フリル付け  
2. 複合亜鈴形: 1) 規則 2) 不規則  
3. 十字形: 1) 薄肉 2) 厚肉
- III. **Bambusoid Class** タケ亜科 (タケ類・ササ類)  
ミヤコザサ, チシマザサ, メダケ, ホウオウチクタイプ等, 6タイプの長座鞍形
- IV. **Chloridoid Class** スズメガヤ亜科, ダンチュク亜科・タケ亜科の一部  
シバ, ヨシ, オヒシバ, ニワホコリ, カゼクサ等, 5タイプの短座鞍形
- V. **Arundoid Class** ダンチュク亜科, タケ亜科  
2タイプの長座鞍形
- VI. **Fetsuoid Class** イチゴツナギ亜科  
1. 長楕円形, 長方形, 方形等, 6タイプのポート形  
2. 3タイプの帽子形  
3. 2タイプの星状形
- VII. **Elongate Class**  
平滑辺棒状形, 刺状辺棒状形, 鋸歯辺棒状形等, 13タイプの棒状形
- VIII. **Point-shape Class**  
6タイプの矢じり (かぎ) 状形
- IX. **Fan-shape Class**  
ヨシ, ジュズダマ, シバ, イネ, ヒエ, ササ, ネザサ, ススキ, オヒシバ, ヌマガヤ等, 20タイプの扇 (食パン状) 形
- X. **Club-shape Class**
- XI. **Pipe-shape Class**
- XII. **Spine-shape Class**
- XIII. その他

\* 一部改変

I~VI: 短細胞に由来する珪酸体. VII: 長細胞に由来する珪酸体. VIII: ブリッケルヘアに由来する珪酸体. IX: 機動細胞に由来する珪酸体. X: マクロヘアに由来する珪酸体. XI: ミクロヘアに由来する珪酸体. XII: 細状細胞に由来する珪酸体.

に自生, あるいは栽培されている樹木, 55科 110属 200種について, その葉面表皮細胞に由来する珪酸体の形態を光学および走査型電子顕微鏡で観察し, ヤシ科起源珪酸体をコンペイ糖状形態の一群, 針葉樹起源珪酸体を立方体状, 板状形態など五群, 広葉樹起源珪酸体をはめ絵パズル状, 五角形状, Y字形状など八群に大別した.

イネ科植物および樹木起源珪酸体以外の分類は, ほと

んど検討されておらず, 今後の研究課題である.

## 7. 土壌および地質堆積物中の植物珪酸体

### 1) 土壌中の植物珪酸体

植物珪酸体は, 土壌の主要構成成分ではないが, 大多数の土壌, とくに表層でごく普通に検出される.

1866年, RUPRECHT によって, チェルノーゼムの植物珪酸体が注目されて以来, その存在と意義が多くの研究者によって報告されてきた.

SMITHSON (1956b, 1958) は RUPRECHT など西欧の研究者の業績を総括的に紹介するとともに, 英国の牧野土壌から分離した植物珪酸体を, その地表に生育するイネ科牧草由来の珪酸体と関連づけ, また家畜糞中にも植物珪酸体が含まれていることを認め, 牧野土壌の植物珪酸体の一部は, 家畜の移動および堆肥の施用によって運搬, 供給されることを示した.

BARKER (1959b) は, オーストラリアのビクトリア土壌から形態の異なる多数の植物珪酸体を分離, 記載し, それらの多くは地表面で枯死, 腐朽および燃焼後に, 植物体から放出されたもので, 他のごく一部は動物の糞として土壌に持ち込まれること, さらに, 植物珪酸体は雨, 風, 雪などと共に他の地域から運搬されることも述べている.

米国では, BEAVERS & STEPHEN (1958) によってイリノイ州のレス土壌から分離した植物珪酸体の特性と分布が報告され, 古土壌の指示者として植物珪酸体の有用性が認められた.

上述の研究よりやや遅れ, 本邦の土壌, とくに火山灰土壌から分離した植物珪酸体の分布, 形態, 特性などが KANNO & ARIMURA (1958b), 加藤 (1958, 1960), 有村・菅野 (1965a, b), によって報告された.

土壌中の植物珪酸体量は, ある地域から他の地域にかけてはもちろん, 同一地域内でもかなり幅広く変わるが, 地理的要因よりも植物種, 土壌条件, 気候, 地形, 珪酸体の安定性など多くの要因が相互に関係している (JONES & HANDREK, 1967; WILDING & DREES, 1968, 1971, 1974).

植物珪酸量の評価は, どの範囲の粒径試料から分離したかによって変わる. 一般には風化抵抗性の強い珪酸体を多く含む 20~50 $\mu$  粒径試料が用いられている (JONES & HAY, 1975). しかし, 土壌によっては, 珪酸体粒径にかなりの幅がみられる. 例えば, 西オクラホマ州の Ustolls (乾燥地帯のブルニゼム), ミネソタ州の Udolls (湿潤地帯のブルニゼム) 中の植物珪酸体の 2/3 以上は

5~20  $\mu$  であったが、東オクラホマ州、イリノイ州の Udolls では、5~20  $\mu$  と 20~50  $\mu$  の珪酸体がほぼ同程度含まれていた (JONES & BEAVERS, 1964a; VERMA & RUST, 1969; YECK & GRAY, 1972)。

一般に、土壌中の植物珪酸体量は乾土当たり <0.1% ~3% (平均 2.5% 以下) の範囲にある (GEIS & JONES, 1973) とされているが、きわめて高含量を示す土壌がある。例えば、RIQUIER (1960) はインド洋上のレ・エニオン島のアカシア、バンブー、コケ、シダなどの植生下に発達するポドソル様土壌の漂白層 ( $A_2$  層) のほとんどすべてが植物珪酸体であることを報告した。NORGREN (1973) は、オレゴン州において植物珪酸体が 20% 以上含有する草原土壌を見出している。本邦において、KANNO & ARIMURA (1958b) は火山灰土壌の 20~200  $\mu$  粒径試料の 30~60% が植物珪酸体であることを報告した。また、東海地方の黒ボク土表層には乾土当たり最大 16% の植物珪酸体が含有されていた (加藤, 1960)。北海道から九州に分布する火山灰土壌腐植層 (埋没層も含む) の植物珪酸体は各地域によって違いがあるが、0.3~17% の範囲 (181 試料の平均は、3.8%) におさまる (佐瀬・近藤, 1974; 佐瀬・加藤, 1976b; 近藤, 1982a, 1983b)。これらの値は、ある限られた粒径 (例えば、20~50  $\mu$ , 10~100  $\mu$ ) に基づいて算出されたものであるため、土壌中の植物珪酸体総量は少なく見積ってもその 2 倍以上になる (VERMA & RUST, 1964)。この概算は、前記の JONES & BEAVERS (1964a) および GEIS (1973) によって報告された植物珪酸体の粒径分布に基づいている。このように、土壌中で高い植物珪酸体量を示す理由は、遊離の珪酸を多量に含む母材の土壌上に珪酸植物が育成することと関係あるといわれている (WILDING *et al.*, 1977)。

土壌断面において、植物珪酸体量は一般に表層で高く、下層に向かって漸減する。植物珪酸体が確認される深さの下限は埋没層を除くとほぼ 50~100 cm である (JONES & BEAVERS, 1964a; WITTY & KNOX, 1964; WILDING & DREES, 1968)。この植物珪酸体の深度分布は、植物被によって異なり、森林土壌に比べ草原土壌でより下層まで達している。

累積テフラやレスを母材とする土壌断面では下層で植物珪酸体の極大値が得られることがある。それらの層準は、炭素含量もそこで極大値を示すことが多いので、テフラおよびレスの堆積静止期あるいは静緩期の古土壌表層と推定されている (加藤, 1963, 1977; VERMA & RUST, 1969; NORGREN, 1973; WILDING *et al.*, 1977)。

このような埋没土壌の確認は、埋没過程になんらかの原因で有機物が消失した際により有効な方法といえよう。

植物珪酸体量は、土壌有機物 (または、炭素量) と正の相関関係がある (菅野, 1961; 加藤, 1962, 1963, 1977; 佐瀬・近藤, 1974; 佐瀬・加藤, 1976b; 近藤, 1983a)。この事実は、植物珪酸体の供給源である植物が腐植形成に関与していたことを示唆する。

佐瀬・加藤 (1976b) は、本邦の火山灰土壌腐植層の植物珪酸体量と有機炭素量との関係をタケ・ササ類を珪酸体の給源植物とするグループと、それ以外のイネ科草本類を給源植物とするグループに分け検討した。その結果、植物珪酸体量と有機炭素量との間には有意な正の相関関係がそれぞれあったが、有機炭素量/植物珪酸体量比に違いが認められた。この違いは植物種の珪酸体含量の差に起因し、ササ・ネザサ類が腐植の主要な給源植物の場合には、ススキ類が腐植給源植物の場合よりその比が小さくなることを予測した。

植物珪酸体量は、土壌採取地点における自然の生産力を反映するものとみなされている。

例えば、JONES & BEAVERS (1964a) は、イリノイ州のブルニゼム土壌分布域に発達するカタナ土壌の植物珪酸体量を調べた結果、排水中程度の土壌が最も多いことを認めた。このことは、イリノイ州中西部において *Andropogon gerardi Vitman* の生産量が排水中程度の土壌で最も高いこと (ALEXANDER *et al.*, 1968) と良く一致している。同様な結果は、北海道、十勝地方の火山灰由来のカタナ土壌においても確認されている (近藤・太田, 1979)。

異なる植生下の土壌から分離した珪酸体量は、森林植生より草地植生下の土壌において明らかに多いことが示された (WILDING & DREES, 1971)。これは、草地の主要構成種がイネ科植物であるためである。WITTY & KNOX (1964) は、隣接する森林および草地土壌の植物珪酸体量 (15~100  $\mu$ ) を調べた結果、草地土壌が約 10 倍以上も多く含有していることを報告し、過去数千年間、森林と草原の分布がほとんど不変であったことを推測した。

WILDING & DREES (1968) は、オハイオ州中西部の漂礫堆積物上に発達する土壌の植物珪酸体量を調べ、ブルニゼム土壌は灰褐色ポドソル土壌の 4 倍珪酸体量含有していることを報告し、草原の影響を受けた年数はブルニゼム土壌では平均 1,250 年、灰褐色ポドソル土壌では 250 年であると推測した。さらに、WILDING &

DREES (1971) は、現在草原下であっても植物珪酸体量が少ない所は最近まで森林植生の影響下にあったと主張した。しかし、林床にササをとまうことの多い本邦の森林土壌は植物珪酸体量が高くなると予測される。したがって、植物珪酸体量の多少だけから植生の違いを論ずることは危険である。

なお、土壌中の珪酸サイクル、土壌化学および土壌生成に植物珪酸体は重要な役割を演じているが、この方面における研究 (WILDING & DREES, 1974; BARTOLI & SELMI, 1977; BARTOLI & SOUEHIER, 1978; ANDERSON, 1979; BARTOLI *et al.*, 1980; ANDREJWEKO, 1983; BARTOLI, 1985) は極めて少なく、今後早急に解決すべき課題である。

## 2) 地質堆積物、その他に含有する植物珪酸体

植物珪酸体がいずれの年代までさかのぼって堆積物中に残存するかは、地質学および古生物学を専攻する研究者の関心時である。

微化石としての特徴を備えている植物珪酸体は、ウイスコンシン氷河期のレスおよび漂礫堆積物 (JONES *et al.*, 1963; JONES & BEAVERS, 1964a; WILDING & DREES, 1968), 新生代および中生代の堆積物 (BARKER, 1960d), 第三紀の堆積物 (JONES, 1964; BARKER, 1960c; GILL, 1967) および白亜紀の頁岩 (JONES *et al.*, 1963) から検出されている。

最近、RETTALLACK (1984) は、生態系および土壌発達の中で、古土壌に含有される各種化石が酸化還元、pH などの物理化学的要因により変化する過程をモデル化し、時間経過および酸性の増加に伴い植物珪酸体のみが究極的に Ultisol あるいは Spodosol 中に長期間保存されることを推定した。

また、植物珪酸体は空気塵 (BARKER, 1960d; FOLGER *et al.*, 1967; TWISS *et al.*, 1969), 雨 (BARKER, 1959b), 動物の糞 (SMITHSON, 1958; BARKER, 1959b; JONES & HANDRECK, 1967), 深海 (FOLGER *et al.*, 1967; MIKKELSEN, 1984) 中でも発見されている。

地質堆積物中の植物珪酸体の研究は、土壌中のそれに比べ情報が極めて乏しい。今後、この方面からのアプローチが必要と思われる。

## 8. 植物珪酸体の応用

一片の植物葉から抽出される植物珪酸体は、われわれが評価している以上に利用性に富み、その応用範囲も狭

表 3 植物珪酸体分析の応用\*

植 物 学	<ul style="list-style-type: none"> <li>植物分類の基準 (配列・分布)</li> <li>植物系統樹との関連性</li> <li>植物群落の構成状態 (草原と森林の分布、草原・湿原の変遷)</li> <li>植物群落の生産力の推定</li> </ul>
動 物 学	<ul style="list-style-type: none"> <li>野生動物の食性と摂食量の推定</li> <li>糞石との関係</li> </ul>
農 学	<ul style="list-style-type: none"> <li>栽培作物の伝播経路</li> <li>作付体系の変遷</li> <li>光合成能との関係</li> <li>乾燥牧草中のマメ科 (またはイネ科) 率の推定</li> </ul>
土 壌 肥 料 学	<ul style="list-style-type: none"> <li>土壌生成における植生の影響</li> <li>腐植層の成因</li> <li>腐植蓄積年数の推定</li> <li>腐植層の年代の推定</li> <li>過去の表層の確認</li> <li>過去に施用された稲藁堆肥量の推定</li> </ul>
地 質 学	<ul style="list-style-type: none"> <li>古植生・古気候の復元</li> <li>示準地層の確認</li> </ul>
考 古 学	<ul style="list-style-type: none"> <li>土器の産地同定</li> <li>農耕開始期の推定</li> <li>古代人の生活様式 (衣食住) の推定</li> <li>古代人集落周辺の環境復元</li> </ul>
そ の 他	<ul style="list-style-type: none"> <li>生業の鑑識</li> <li>法廷における犯罪識別 (微量土砂試料の鑑別)</li> </ul>

\* 灰像分析を含む

罪捜査の物的証拠のきめてとなる微量土砂試料の鑑別から動物の糞分析にいたるまで各分野から注目されている。

植物珪酸体の応用は、植物珪酸体をどのようにとらえるかによって二大別される。すなわち、一つは植物珪酸体そのものを物質的に利用することであり、他の一つは植物珪酸体のもつ形態的特質を利用することである。前者の例としては、植物珪酸体の高い珪素含有量に着目し、薬品処理によって低コストの珪酸化合物 (例えば、四塩化珪素) を生成し、IC, 光ファイバーなど先端技術の担い手であるシリコンの原料源としての利用が試みられていることがあげられる<sup>5)</sup>。後者の例としては、植物珪酸体の量および種類を調べることによって、植生の

5) 北海道新聞, 1985年6月4日による。

工業技術院道開発試験場はイネのモミガラからシリコンを取り出す技術を開発、実用化をめざしている。

状況および環境を復元する植物珪酸体分析法があげられる。

ここでは、植物珪酸体分析の面から、各分野への応用について紹介したい。

表-3 は、これまで植物珪酸体分析で応用されている研究、あるいは発展可能な研究項目を列記したものであり、今後ますます植物珪酸体の活用が期待できよう。

### 1) イネ科植物の同定・分類

植物学への貢献は、珪酸体が植物分類、とくにイネ科植物の分類指標に用いられていることである。植物葉表皮細胞の植物珪酸体の形態、分布、配列などを調べる研究は、PRAT(1936, 1960) はじめ多くの植物学者の伝統的手法となっている。例えば、本邦において大木(1927-30)はこの方法を適用し、多くのタケ・ササ類の灰像を顕察し、表皮細胞中の短細胞、ブリッケルヘア、マイクロヘア、機動細胞の配列、粒径などを記載し、分類している。このような灰像法による手法は、本邦のイラクサ群(佐竹, 1929-30)、コムギ・オオムギ(加藤, 1932, 1933)の分類学的研究および薬用葉の鑑別(小原・近藤, 1929, 1931; 近藤, 1931)に適用された。

館岡(1956)は、日本産、インド産および北米産のズガヤ亜科、キビ亜科葉身114種の解剖学的特徴を検討し、その中で表皮細胞中の短細胞由来珪酸体の形態がPRATの記載(Panicoid, Chloridoid subtype)と一致し、Festucoid typeのものは全く認められなかったと述べている。

STEWART(1965)は野生動物の糞および胃の内容物の構成を同定するための基礎研究として、東アフリカ(ケニヤ)に自生するイネ科植物57属163種の植物珪酸体を検討した。

BLACKMAN(1971)は、カナダ南アルバータ州の牧草地のイネ科植物26種について、植物珪酸体の形態と分布を詳細に検討し、それがイネ科植物の同定および分類のための予備調査に有益であることを示した。

上記の研究は、いずれも破片および外形では鑑別困難な植物葉をその植物珪酸体の形態、配列、分布から同定しようとしたものである。このような方法は、薬用学においても用いられている。例えば、漢方薬は色々な植物の葉、茎、樹皮、根あるいは根茎を断片化し混ぜ合わせているため、外観から同定することは困難である。天然薬の輸入業者はそれが混ざ物か天然のものか十分熟知する必要がある。このようなことから、UMEMOTO & HOZUMI(1973)は中国で伝統的に用いられている利尿剤“Dan-zhu-ye”にどのような植物が混入しているか植

物珪酸体の形態と分布から検討し、それらがササクサ(*Lophalherum sinenses*)あるいはその類縁イネ科植物であることをつぎとめた。

### 2) 栽培作物の伝播

栽培作物がいつごろ本邦に伝播したかは、農耕文化の成立を知るうえで極めて重要なことである。

稲作は、これまで考古学遺跡の炭化植物遺体、炭化種子の灰像分析から弥生時代以降の存在が実証(WATANABE, 1968; 渡辺, 1981)されているが、さらにどのくらいまで年代をさかのぼるかについては推測の域を脱していなかった。藤原(1974, 1976a, c, d, 1979, 1980, 1983, 1984)は、イネの機動細胞珪酸体の形態に着目し、多くの弥生および縄文時代の遺跡土壌とそれに伴う土器胎土中からイネ機動細胞珪酸体を検出した。その結果、本邦における稲作の歴史は少なくとも縄文晩期までさかのぼることが実証された。また、藤原・佐々木(1978)はイネ機動細胞珪酸体の大きさ・形状を11種23系統について検討し、日本稲と外国稲との間に異なる傾向があることをつぎとめた。しかし、一部例外もみられ、それらは『仙』などの中国稲を含んでおり、日本稲の渡来経路に中国稲がなんらかの形で関与していたことが推測された。

一方、イネ以前の原初農耕として、ヒユ、アワなどが栽培されていたとの仮説(石田・泉, 1967)が以前より唱えられていたが、松谷(1981a, b)は、この仮説を実証すべく縄文遺跡出土の小型炭化種子およびパン状炭化物の灰像分析を検討した。しかし、ヒユ、アワは弥生時代のものから検出(WATANABE, 1970; 渡辺, 1981)されているが、縄文時代からは今のところそれと断定できる証拠は確認されていない。

最近、佐々木(1984)によって、焼畑農業の存在を機動細胞珪酸体を用いた方法で実証しようとする試みがなされ、現在も依然として焼畑農業がおこなわれている宮崎県椎葉村の向山土壌を対象として分析がなされた。その結果、キビ族の機動細胞珪酸体が多量に存在する地点( $25 \times 10^8$  個/ $m^2$ 以上)はほぼ焼畑の範囲に一致することが明らかになり、このような手法によって古代遺跡周辺の焼畑範囲が推定可能であることを示唆した。

中国では、イネ、アワが約5,000年前に既に栽培されていたことが土器胎土に含まれる植物遺体の灰像分析によって実証されている(EDMAN & SÖDERBERG, 1929)。同様な灰像分析による研究は、近東およびヨーロッパの遺跡出土の炭化パンおよび土器胎土に適用され、それらからはオオムギ、コムギ、ライムギなどが検出された

(HELBAEK, 1952, 1959, 1961).

中央アメリカでは、トウモロコシの過去における栽培の事実を、短細胞由来の十字形珪酸体の粒径およびその比を利用して立証した例が報告されている (PEARSALL, 1978, 1980, 1982; PIPERNO, 1980).

PEARSALL (1978) は、エクアドルのサンタ・エルナ半島の考古学遺跡 (Real Alto) 土壌からトウモロコシに特有な  $16 \mu$  以上の十字形珪酸体を検出した。すなわち、遺跡土壌の十字形珪酸体の頻度分布は、エクアドルのイネ科野草 (ガマグラス属, クリノイガ属, オヒンバ属) のそれより、むしろトウモロコシの9系統の平均値に近似していることをつきとめた。その後、PEARSALL (1980) は多くのイネ科野草、遺跡土壌および表層土壌を追加検討し、十字形珪酸体の4カテゴリー (小, 中, 大, 特大) の頻度分布がイネ科野草に比し、代表的トウモロコシのそれに一致することを考古学土壌試料から実証した。一方、表層土壌の十字形珪酸体の頻度分布はイネ科野草のそれと酷似していた。これらの結果は、トウモロコシ栽培が Real Alto 遺跡において当時すでに存在していたという仮説 (LATHRAP *et al.*, 1977) を支持した。PIPERNO (1980) は、パナマの遺跡に前記の方法を適用し、中央パナマ太平洋岸地域におけるトウモロコシ栽培 (2,500~1,000 B.C) の存在を実証した。非イネ科栽培植物 (例えば、ショクヨウカンナ, キヤッサバ) に由来する珪酸体の同定は PEARSELL (1980) および PIPERNO (1981) によって試みられているが、まだ研究は不十分であり、さらに、それらの分類および生態的な関連性を十分検討する必要がある。

なお、作付体系の変遷 (例えば、乾燥農業におけるかんがい, 熱帯農業における盛り土およびうね立て技術など) を究明する手段として植物珪酸体は、ハワイ島, 中央アメリカ, ペルー, シリアの遺跡土壌で適用されている (TURNER & HARISON, 1981; MILLER, 1980; PEARSALL, 1982; PEARSALL & TRIMBLE, 1984)。

今後、この種の研究発展が大いに期待されている。

### 3) 考古学遺物の同定

植物珪酸体は、耐熱性に富んでいるため、花粉および植物遺体が殆ど見出しえない焼土および土器胎土からも検出される場合が多い。そこで、この性質を利用して、考古学遺跡の焼土および灰の植物珪酸体分析から、古代人がどのような植物を燃料として用いていたか、また、それらを生産した遺跡周辺の植生はどのようなものであったかなど、貴重な情報が得られる。

このような見地から、加藤 (1975) は、愛鷹山麓に位

置する元野遺跡 (縄文早期後葉) の焼土とその下の黒土層の植物珪酸体分析を行い、いずれの試料もタケ型が圧倒的に多くキビ型がこれに続く組成を示した。ただ、両試料で異なる点は珪酸体量が焼土試料で明らかに富加 (650 kg ないし 1,100 kg) していたことである。このことは、古代人が遺跡周辺に生育していたタケ・ササ類などのイネ科植物を燃料の一部として用いていたことを示している。同様な結果は、八王子市弁天橋遺跡 (縄文早期後葉) および多摩ニュータウン遺跡 (縄文前期後葉) の焼土、ならびに黒土層の植物珪酸体分析においても得られている (近藤, 1981; 佐瀬, 1984)。佐瀬 (1982) は、多摩ニュータウン遺跡 (古墳時代) の焼土を分析し、焼土試料は同時代の対照土壌に比べて、珪酸体量が多く、かつキビ型が多いことで特徴づけられた。このようなことから、ススキなどのキビ亜科植物が選択的に燃料として使用された可能性を指摘した。

大越 (1982a) は、千葉県栄町龍角寺ニュータウン遺跡 (縄文中期) において多数の焼土を分析し、タケ類, ササ類に由来するタケ型が圧倒的に多いことを認めた。また、平安時代のカマド試料では、縄文時代と異なるススキなどに由来するキビ型が多く検出された。ただし、これらの結果は、対照土壌を検討せず、焼土試料から分離した珪酸体を全て灰に由来したものとして取り扱っている。しかし、焼土には焼成前の土壌も当然混入しているので、それらに含まれていた植物珪酸についても十分考慮し、焼土周辺土壌を対照として分析すべきであろう。

土器胎土中には、しばしば植物珪酸体が検出されるが、これは古代人が土器製作時に粘土の中につなぎをよくするなど、なんらかの目的から植物繊維を混入したか、あるいは素地自体にすでに植物珪酸体が混入していた場合の二通りが考えられる (上條, 1984)。前者であれば植物珪酸体分析から混ぜた植物種が判明でき、後者であれば粘土採取地などの産地同定が可能である。

土器胎土の植物珪酸体については、熊本県の各期縄文土器のイネ機動細胞珪酸体を探索した藤原 (1980, 1984)、神奈川県海老名市上浜田遺跡産出の繊維土器を検討した佐瀬 (1981) および北海道帯広市曉遺跡産出の繊維土器を検討した近藤・佐藤 (1985) の報告がある。前述した佐瀬 (1981) の分析結果からは繊維状物質の給源は不明確であったが、近藤・佐藤 (1985) の結果はササ属を混ぜた可能性が指摘された。最近、近藤ほか (未発表) は、栃木県産出の土師器の植物珪酸体分析を行い、土壌腐植層に匹敵できるほど多量の珪酸体を含む例、ならびに産出の違いにより珪酸体組成がかなり異なる例を

見出ししている。

ヨーロッパでは、昔からつり鐘鑄造の際、粘土に牛糞を混ぜて用いることが今日でも習慣として残っている。イギリスの13世紀の礼拝堂遺跡から出土したつり鐘鑄造器の破片中からイネ科植物起源の珪酸体が見出されており、つり鐘鑄造の際に粘土の補強に家畜の糞を用いていたことが実証された(CUTLER, 1978)。これは、植物珪酸体が溶融した鐘青銅によって粘土の中で熱せられても、その耐熱性のため残存した例である。

古代の家畜(有蹄類)がどのような餌を食べていたかを知る方法として、遺跡出土の歯に付着、あるいはエナメル質間に埋藏した植物片の植物珪酸体分析が用いられ、環境考古学の分野に広く適用される可能性が ARMITAGE (1975) によって指摘された。

以上、述べてきた以外にも、植物珪酸体の考古学遺物への応用は石器に付着している植物片、草ぶきの壁や屋根、履物、編物、さらに食料の貯蔵庫、脱穀場などにも適用されよう。

#### 4) 土壌と植生の関係

土壌学における植物珪酸体の寄与は、土壌生成因子としての植生の影響を知る手がかりを与えてくれることである。このような情報は、本邦の火山灰土壌、埋没腐植層および古土壌の生成、分類を研究するに当たって極めて有益である。

周知のように、本邦に分布している火山灰土壌の表層は、独特の黒い色を呈しており、そのため火山灰土壌を黒ボク土あるいは Andosol (暗土) とも呼んでいる(加藤, 1983)。この黒ボク土腐植層の成因については、従来からススキなどの草原植生が密接に関係しているとの考え(山根, 1973)があるが、実証には至っていない。このことを解決するには、腐植層中の植物珪酸体分析が有効である。

菅野・有村(1958a)、加藤(1960)は、植物珪酸体の形態からササ、ススキ、チガヤなどが主要な給源植物と推測した。その後、本邦各地の現世および埋没黒ボク土腐植層の植物珪酸体組成が、佐瀬・近藤(1974)、佐瀬・加藤(1976a)および近藤(1982a)によって検討され、北海道ではササ属、イチゴツナギ亜科、東北・北関東・中部ではキビ亜科、ササ属、関東・東海・中国・九州ではメダケ属(主にネザサ)、キビ亜科が完新世をつうじて、黒ボク土の腐植給源植物であることが示された。このことは、黒ボク土の腐植給源植物としてススキを重要視した前記の説と異なり、気候帯により異なっていたと

いう多元説を示唆している。上記の珪酸体組成から推測された草地植生は、NUMATA (1969) により明らかにされた本邦の半自然草原植生分布と非常に良く一致し、興味深い。

なお、九州大隅半島以南の火山灰土腐植層中には、イネ科植物起源珪酸体よりタブノキ、スダジイ、イスノキなどの照葉樹林に由来する樹木起源珪酸体を多く含む例が観察され、それらの土壌は概して腐植含量が低い傾向にある(近藤, 1982b)。

黒ボク土の分布範囲の中で、植生の違いで全く性質の異なる土壌が生成される場合がある。すなわち、黒ボク土は草原植生下に限られ、ブナ林など森林植生下では褐色森林土の土壌が生成されるといわれている(山根, 1973)。佐瀬ほか(1985)は、富士西麓および天城山地に分布する植生以外の土壌生成因子がほぼ同一の黒ボク土と褐色森林土の植物珪酸体分析をおこなった結果、黒ボク土はキビ亜科、イチゴツナギ亜科などの草原植生、また、褐色森林土はササ属を林床に伴うブナ植生、および常緑ガン植生下でそれぞれ生成されたことが示唆された。永塚(1984)は秩父地方において佐瀬ほか(1985)と同様な見地から二つの土壌の植物珪酸体を検討し、褐色森林土には常緑ガンに由来する樹木起源珪酸体が多量に含まれていることを明らかにした。河室(1981, 1983a)は、長野県黒姫山および十和田八甲田山に分布する火山灰由来の褐色森林土と黒色土の植物珪酸体組成を検討し、褐色森林土ではササ属、黒色土ではススキがそれらの生成に関与していたことを推測した。

ニュージーランドの Andisol<sup>6)</sup> 腐植層中には、樹木木部起源およびシダ類起源の珪酸体が多数含有され、本邦の黒ボク土の植物珪酸体組成と異質であることが佐瀬ほか(未発表)によって示された。このことは、腐植の特性を考慮すると両国の黒ボク土の生成に植生経歴が何らかの形で関与してきたことを暗示し、大変興味深い。

九州・沖縄・西南諸島に分布する赤黄色土は、イスノキ、タブノキ、スダジイ、常緑ガンに由来する樹木起源珪酸体によって特徴づけられ、小笠原諸島の赤色土はヤシ科・イスノキ起源珪酸体で特徴づけられることが近藤(1975b)によって報告された。さらに、近藤(1984b)は、それらの珪酸体が全珪酸体の10~30%以上を占める場合、森林植生の影響が大きいことを指摘した。

ブラジル・アマゾン河流域に分布する黄色ラトソル・腐植質黄色ラトソル土壌は、ヤシ科起源のコンペイ糖状珪酸体を多数含んでおり、それらはヤシ科植物を優占す

6) 火山灰土分類国際委員会(ICOMANDO)による分類。

る植生下で生成されたことが推測された。また、腐植質黄色ラトソル土は、黄色ラトソル土よりイネ科植物起源珪酸体を多く含有しており、腐植集積に人為作用とともにイネ科植物が関与していたことが示唆された (KONDO & IWASA, 1981)。

REQUIER (1960) は、アフリカ東部のレ・ユニオン島の玄武岩母材の熱帯土壌において、ポドソル性の灰白層 (5~30 cm) のほとんどがアカシア、バンブー、シダ、コケなどに由来する植物珪酸体であることを見出し、それらの珪酸体が著しく集積したことにより生成した疑似ポドソルであることを明らかにした。

近藤・小崎 (1986) は、過湿潤から半乾燥地帯に分布する西アフリカの低地土壌の植物珪酸体分析をおこない、それらの土壌にはキビ型およびコンベイ糖状珪酸体を普遍的に検出されることを見出した。また、気候、地形などによって珪酸体組成に特徴がみられ、一般に乾燥地帯ほどイネ科植物起源の珪酸体が多く、湿潤地帯に向かって樹木・ヤシ科起源珪酸体が多く検出された。さらに、ヤシ科起源珪酸体は、氾濫原、断層低地においてその出現頻度が低く、小規模な内陸谷で高い傾向にあった。

植物珪酸体は、低湿地の土壌の堆積様式および生成環境を推測する指標として極めて有効である。例えば、低湿地土壌の黒色土層の起源判別に植物珪酸体の組成を観察することで、黒ボク土の腐植が流入再堆積したものか、泥炭が分解したものかを鑑定できる (加藤, 1977)。さらに、植物珪酸体分離の際に混入する珪藻および海綿骨針などを併せて考察すると、一層堆積環境が明瞭にされよう (梅村・近藤, 1984)。

泥炭あるいは泥炭土がどのような植物から構成されているかは、泥炭土の生成・分類および理化学性を知る上で重要であるが、慣例化されている肉眼観察による植物同定は植物学的知識と熟練を必要とするばかりでなく、分解のすすんだ泥炭土には適用できない (近藤, 1980)。このようなことから、近藤・原田 (1980) は、泥炭地植物と泥炭土の植物珪酸体を検討し、肉眼判定の出来ない植物の同定が可能であることを指摘した。また、乾燥化による泥炭地の環境変化は泥炭地に進入するササ属の珪酸体を同定することで推測可能である。

以上のように、植物珪酸体分析は土壌と植生の関係を知るうえで有効な手段といえよう。

##### 5) 草地植生の変遷

植物珪酸体の植物生態学への応用は、過去に何度もイ

ネ科植生が変化したような場所で発揮される。

本邦に広く分布する黒ボク土は、まさにこの条件にうってつけといえよう。

黒ボク土は、火山活動による降灰と土壌生成の繰り返しによって多数の腐植層を累積しているが、それらの腐植層の植物珪酸体組成を調べることで、イネ科植生の歴史が究明できる。

各地の累積性黒ボク土断面に見られる埋没腐植層の植物珪酸体分析によれば、今日の半自然草原植生分布の成立は約 8,000 年前にさかのぼれそうである (近藤, 1982a)。それ以前では黒ボク土の埋没腐植層は関東以北では確認されず、関東地域でも退色した暗色帯として見られるにすぎない。一方、東海、九州地域では、依然として明瞭な埋没腐植層が存続している。このような地域差は、1 万年以前の寒冷気候の影響を無視して考えることは出来ないであろう。

北海道においては、8,000 年以前は現世の主要構成種であるササ属がほとんど姿を消し、イチゴツナギ亜科優占のイネ科植生が成立していたと思われる (佐瀬・近藤, 1974; 近藤, 1982a)。

十勝地方の居辺 16 遺跡土壌の植物珪酸体分析 (近藤, 1985) によれば、約 19,000 年前の先土器Ⅱ包含層でウシノケグサ型珪酸体の割合はピークに達する。ウシノケグサ型の給源植物であるイチゴツナギ亜科は寒冷地型イネ科植物 (C3 植物) であるので、その珪酸体の割合の増加は、気候寒冷化のバロメーターの一つと考えられており (佐瀬・近藤, 1974; 佐瀬, 1980c)、2 万年前後がウルム氷期の最寒冷期とされていることと前記の結果は良く一致している。前述の包含層下位の先土器Ⅲ包含層 (約 32,000 年前)<sup>7)</sup> においてタケ型珪酸体が出現し、気候の緩和が示されるが、その割合はウシノケグサ型より明らかに小さく、また、ポイント型がファン型より多い特徴から、この時代は現代よりやや寒冷な気候であったと推測される。このような 1 万年以前のウシノケグサ型珪酸体によって特徴づけられる分析結果は、十勝地方の多くの土壌および遺跡土壌断面で得られた結果と一致する (近藤・太田, 1979; 近藤, 1985; 近藤・佐瀬, 1985)。

東北、八戸周辺地域で行った植物珪酸体分析の結果は、約 8,500 年前に堆積した南部浮石層直下の埋没腐植層までは現在と同じキビ亜科優占のイネ科植生であった (佐瀬・加藤, 1976a; 佐瀬, 1980a)。一方、約 13,000 年前に堆積した八戸浮石直下の埋没腐植層では、ウシノ

7) 辻 秀子氏よりの私信 (<sup>14</sup>C 年代測定値)。



ケグサ型、ポイント型、棒状型珪酸体の割合が増加し、イチゴツナギ亜科がイネ科植生の主要構成種であったことが示された(佐瀬, 1980b)。また、同時にこれらの層準で、モミ属など針葉樹起源珪酸体が多数検出され、当時この地域は亜寒帯針葉樹林が広がっていたことを物語っている。この結果は、大池ほか(1977)による花粉分析の結果と矛盾していない。八戸浮石層下位に累積する高館テフラ層のうち、約25,000年前に堆積したと推測されるビスケット浮石直下の埋没土まではウシノケグサ型の割合が高く、イチゴツナギ亜科優占のイネ科植生が推定された(佐瀬, 未発表)。八戸浮石から合同浮石が堆積した時期は最終氷期のUpper Pleniglacial(平川, 1975)に対比可能と考えられる。合同浮石層よりさらに下位の高館テフラ層は全般にタケ型の割合が高く、ササ属優占のイネ科植生が推測されるが、オレンジ浮石の層準ではキビ型の割合が増え、アオスジ浮石の層準ではウシノケグサ型の割合が増加する。前者は気候の温暖化、後者は寒冷化を意味するものと思われる。

東京都練馬区成増、多摩丘陵および埼玉県浦和市大宮台地の関東ローム層の植物珪酸体分析(佐瀬ほか, 1982; 細野・佐瀬, 1985; 佐瀬, 未発表)によると、表層はネザサなど、タケ類に由来するタケ型(以後、タケ型と呼ぶ)の割合が高く、かつキビ型もかなり検出されることからネザサ節、キビ亜科を主体とするイネ科植生であったと思われる。表層下部からは植物珪酸体が徐々に変化し、ササ属に由来するタケ型(以後、ササ型と呼ぶ)の割合が増加する。これは、暖温帯イネ科植生から冷温帯イネ科植生への移行を示すものであろう。立川ローム層はササ型の割合が高いことで特徴づけられる。同様な結果は、府中市幸町の関東ローム層において近藤(1982a)によって報告されている。一般に、立川ローム層の暗色帯は温暖期の埋没腐植層と考えられているが(松井ほか, 1968)、そのことを示す植物珪酸体組成の変化は認められない。また、立川ローム層には、最終氷期の最寒冷期と考えられる2万年前後の層準も含まれているが、それを示す植物珪酸体組成の変動も全く認められない。したがって、立川期はササ属の優占する冷温帯草地植生が成立し、継続した時代と考えられる。

武蔵野ローム層では、その上部層準においてタケ型の割合が増加するネザサ主体のイネ科植生が推定される。一方、武蔵野ローム層下部を特徴づける東京軽石の層準(4.9×10<sup>4</sup>±5,000 F.Ty.B.P., 町田・鈴木, 1971)では、ウシノケグサ型、棒状型、ポイント型珪酸体の割合が増加し、気候の寒冷化に伴うイチゴツナギ亜科を主

とするイネ科植生の成立が示される。立川、武蔵野ローム層をとおり、寒冷型イネ科であるイチゴツナギ亜科の勢力拡大が示されるのはこの層準に限られるので、関東地域は一般に最寒冷期とされている2万年前より、むしろ5万年前後が寒冷であった可能性が大きい。このような関東地域の二つの寒冷期の植生の差については、相模地域の大型植物化石・花粉化石群集を詳細に検討したTsuji *et al.* (1984)によっても同様に指摘されている。武蔵野ローム層の植物珪酸体分析はまだ十分といえず、異なった地点におけるデータの集積が必要である。

九州地方の植物珪酸体分析の結果(佐瀬・加藤, 1976a; 近藤, 1982a, b)によると、約9,000年前までは関東地域と同様にネザサ、キビ亜科を主とするイネ科植生が支配的であったが、それ以前2万年前後まではタケ型の割合が減少し、かわってササ型の割合が増大するササ属の優勢なイネ科植生が成立していたと思われる。関東地域と異なる点は、アカホヤ(K-Ah)上部の腐植層で照葉樹林起源珪酸体の出現頻度が高いことと、キビ型がタケ型をうわまわっていることである。このことは、暖地型イネ科植物であるキビ亜科(C4植物)が優勢であったことを示し、照葉樹林が最も隆盛した時代とも一致する。また、九州の一部の地域では1万年前においても照葉樹林の存在徴候がイスノキ、ダブノキ、スダジイに由来する珪酸体から示唆された(近藤, 1982a, b)。

近藤(1982a)は、各地の累積黒ボク土を用いて、約2万年以後の植生変化を表4のように纏めている。分析された試料は年代がほぼ確定した層準を対象としているが、前述の植物珪酸体分析の結果と矛盾するものではない。

以上、通覧してきたように、累積テフラ層の植物珪酸体分析は連続したイネ科植生、照葉樹林の広がりなど、自然環境の変遷をたどるうえで極めて有効な方法といえよう。

なお、米国において古環境復元のための植物珪酸体研究は、1960~1970年にわかり、土壌学者によって行われてきたが、最近では考古学発掘プロジェクトの一貫として研究されることが多い(Pearsall, 1982)。例えば、Lewis (1978, 1981)は、北西ネブラスカ州、ワイオミング州および北東コロラド州の遺跡土壌を分析し、キビ型、ヒゲシバ型およびウシノケグサ型珪酸体の出現割合から古植生を復元した。同様な研究は、Robinson (1980)によって、テキサス州の中央、南部および沿岸地帯の古環境を復元する手段として考古学遺跡に適用された。

表 4 地域別, 時代別に復元した腐植給源植生 (近藤, 1984a)

地域	腐植給源植生
北海道	現世～約 8,000 年 B. P. タケ亜科(ササ類) ≧ イチゴツナギ亜科 > キビ亜科草本類, 落葉広葉樹 約 8,000～20,000 年 B. P. イチゴツナギ亜科 ≧ キビ亜科 > タケ亜科(ササ類) 草本類
東北	現世～約 8,000 年 B. P. キビ亜科(ススキ類) ≧ タケ亜科(ササ類) > イチゴツナギ亜科草本類, 落葉広葉樹 又は, ヒゲシバ亜科(シバ類), ダンテク亜科(ヨシ) > タケ亜科草本類 約 8,000～20,000 年 B. P. タケ亜科(ササ類) > イチゴツナギ亜科, キビ亜科草本類 又は, イチゴツナギ亜科, 針葉樹 > タケ亜科 > キビ亜科草本類
中部	現世～約 9,000 年 B. P. キビ亜科, ヒゲシバ亜科 > タケ亜科(ササ類) 草本類 約 9,000～25,000 年 B. P. タケ亜科(ササ類) > キビ亜科, ダンテク亜科(ヨシ) 草本類
関東	現世～約 8,000 年 B. P. タケ亜科(ネザサ, ササ類) > キビ亜科 > ヒゲシバ亜科(シバ) 草本類 約 8,000～25,000 年 B. P. タケ亜科(ササ類) ≧ キビ亜科, イチゴツナギ亜科草本類
中国	現世～約 8,000 年 B. P. キビ亜科 ≧ タケ亜科(ネザサ, ササ類) 又は, ヒゲシバ亜科 > イチゴツナギ亜科草本類 約 8,000～20,000 年 B. P. タケ亜科(ササ類) > キビ亜科草本類
九州	現世～約 9,000 年 B. P. タケ亜科(ネザサ) ≧ キビ亜科草本類 又は, キビ亜科, 照葉樹林 > タケ亜科(ネザサ) 草本類 約 9,000～20,000 年 B. P. タケ亜科(ササ類, タケ類) ≧ キビ亜科草本類 ≧ 照葉樹林

#### 6) 土壌中の年間植物珪酸体生産量および植物乾物量の概算

土壌中の植物珪酸体年間生産量 (Pwy) は, 試料の層厚 (d), 仮比重 ( $\delta$ ), 植物珪酸体含有量 (w) および地表露出期間 (y) のデータから, 前述の式 (1) (加藤, 1977) によって求められる:  $Pwy = Pw/y$

黒ボク土の年間植物珪酸体生産量は, かなり地域差が

認められ (佐瀬・近藤, 1974; 佐瀬・加藤, 1976b), 気温が高くタケ型珪酸体を多く含む九州, 宮崎県では最高値 ( $10 \text{ g/m}^2 \cdot \text{y}$ ) を示し, 東北, 青森県では最小 ( $0.54 \text{ g/m}^2 \cdot \text{y}$ ), 北海道南部では  $2.4 \text{ g/m}^2 \cdot \text{y}$  とふたたび高くなる. これは, 主要草地形が東北ではススキ, 北海道ではササ類であることと関係している可能性がある (佐瀬・加藤, 1976b; 加藤, 1977).

いずれにしても, 土壌中の年平均植物珪酸体生産量は, 代表的イネ科草本 (ススキ,  $3.3 \text{ g/m}^2 \cdot \text{y}$ ; ササ属,  $5.6 \sim 7.4 \text{ g/m}^2 \cdot \text{y}$ ; ネザサ,  $15 \text{ g/m}^2 \cdot \text{y}$ , 佐瀬・加藤, 1976b) に比べ全般的に低い. これは, 珪酸体をあまり残さない植物を混じえていることと, 小型珪酸体の溶解が関係していると考えられている (佐瀬・加藤, 1976b; 加藤, 1977).

土壌中の植物珪酸体含有量 (Pw) を植物体の珪酸体含有率 (S) で除すと, 過去の年間乾物量 (G) が推定できる:  $G = (Pw \times 100) / S$

この時, S は植物種によって異なるので, 植物珪酸体組成から給源種を推定し, 適当な S を決める必要がある. また, 別に土壌および植物体の特定の珪酸体の個数を直接法, あるいはグラス・ビーズ法で数え, 年間乾物生産量を推定する方法がある.

藤原 (1979) は福岡県・板付および群馬県・日高遺跡土壌において, また, 佐々木 (1979) は東京・なすな原および三重・北堀遺跡土壌において, それぞれに含まれる機動細胞珪酸体の密度から, 水田として利用された全期間のイネ, ヨシ, タケ類の乾物生産量を推定した. 近藤・石田 (1981) は, 北海道・帯広市のカシワ林下に発達する黒ボク土 A<sub>00</sub> および A 層の植物珪酸体密度から, カシワ, ススキ, ミヤコザサの葉部乾物生産量を推定した. カシワは, 風化抵抗性が弱い珪酸体を含有しているため, 過少評価されたが, ミヤコザサはほぼ妥当な値 ( $80 \sim 280 \text{ g/m}^2 \cdot \text{y}$ ) を示した. このような単位体積当たりの珪酸体個数を利用する方法は, 農耕地において過去に施用されたイネ糞堆肥量の推定に大いに役立っている.

佐々木・藤原 (1975) は, イネ葉身の機動細胞珪酸体の形状がイネ族のマコモ, サヤスカグサ, アシカキと明確に区別されることに着目し, その機動細胞珪酸体の密度を測定することによって, 過去に施用されたイネ糞堆肥量を推定した. この結果は, 実際, 施用された 40 年間の投入量に近似する値 ( $39.4 \text{ t}$ ) であった. 橋川ほか (1980) は古代から近世までに開田された滋賀県南部平地の水田について, 投入されてきたイネ糞およびイネ科植物体の総量を佐々木・藤原 (1975) と同様な方法で検

計し、開田以来、平均 400 g/10 a・年以上のイネ藁堆肥が投入されたことを明らかにした。

土壤中の植物珪酸体量 (Pw) がわかれば、それらの値を植物体の年間珪酸体生産量 (Pw') で除すことで珪酸体の蓄積年数 (Tw) が算出される： $Tw = Pw / Pw'$

加藤 (1977) は、東京西部、赤城南麓、宇都宮東郊および愛鷹南麓の黒ボク層、ローム層の蓄積年数を求め、それらの結果と既知の考古学的遺物および  $^{14}C$  年代と比較した。それによると、両者の関係は黒土層ではほぼ一致するが、ローム層では著しく小さく、凹地の黒土層ではかなり大きい値を示した。このような違いは、植物の年間珪酸体生産量を過大、あるいは過小に見積もられたためと考えられ、試料の堆積環境などを熟知する必要性が指摘された。

### 7) 野性動物の摂食量および食性の推定

野生動物の摂食量および食性を知る手がかりとして、最近、植物珪酸体分析が注目されている。

従来、野生動物の糞および胃の内容物の構成は、それらの中に含まれている植物片をポイント・クォドランド法 (STEWART, 1967) を用いて定量的に調べられている。

TAKATSUKI (1978) は、上記の方法に基づいてエゾシカの糞分析を飼育下でおこなった。その結果、与えた植物 (ススキ、アズマネザサ、シバ) の同定は可能であったが、餌と糞の量的関係は一致しなかった。

佐藤 (1981) は、エゾシカの食性を究明するにあたって、まず給餌実験から植物珪酸体回収率 (採食後、2日以内に珪酸体を排泄) を検討した。餌は、クマイザサおよびチモンシーを用い、植物体と糞の植物珪酸体がそれぞれ測定され、クマイザサは  $97.2 \pm 1.12\%$ 、チモンシーは  $94.3 \pm 0.63\%$  (99% 信頼区間) それぞれ回収された。このことは、エゾシカの体内で植物珪酸体はほとんど分解されず、消化にたいして抵抗性があることを示すばかりでなく、糞中の植物珪酸体分析によって野生動物の摂食量および食性が定性的、かつ定量的に把握できることを示唆している。

この方法に基づいて、野外におけるエゾシカの糞分析が季節的に追跡された (藤巻ほか, 1983)。それによると、エゾシカは春季に他の時期よりミヤコザサを多く食べ、それ以降はミヤコザサ以外の草本類を多く採食することが推測された。さらに、エゾシカの一匹当たりの排泄量、摂食した植物種およびその部位が判明できるならば、摂食量の推算も可能である。また、糞中の植物珪酸体組成を調べることで、おおよその食性が推定でき、野生動物を保護・管理するうえで貴重な情報を提供するで

あろう。

### 8) その他の応用

植物珪酸体の風化度は、植物珪酸体の性質および埋積環境によって変わるが、下層あるいは埋没年代の古いほど、その表面に円孔が多数みられ、徐々に輪郭が不明瞭になる。この珪酸体の風化度に着目し、加藤 (1977) は、愛鷹山麓の累積黒ボク土断面の植物珪酸体の風化度と  $^{14}C$  年代との関係を検討した。その結果、それらの間にはかなり良い正の相関関係があることをつきとめた。また、加藤ほか (1980) は他の土壌断面について追加検討し、前記と同様な結果を得た。河室 (1983b) は、加藤 (1977) と同様な観点から植物珪酸体の風化度を4段階に区分し、それを八甲田山の火山灰由来の各種土壌 (褐色森林土、ポドソル、黒色土、埋没黒色土) から分離した植物珪酸体に適用した。その結果、 $^{14}C$  年代が古いほど、植物珪酸体の風化度が大きくなるが、土壌の種類によって風化度にかかなりの違いがあることを認めた。これらの方法は、どの種の珪酸体を対象にするか、風化度および埋積環境をどのように評価するかなど、煩雑な問題を抱えている。この点を十分考慮し、客観的に風化度を評価できれば、概略の年代判定として適用できよう。

土壤中の植物珪酸体の絶対年代は、珪酸体に含有される炭素の  $^{14}C$  年代測定によって求められる。植物珪酸体の炭素は、それらを給源した植物の繁茂時に珪素と一緒に吸蔵したものであるため、後世の有機物混入の心配はほとんどないと思われる。WILDING (1967) は、オハイオ州西部のブルニゼム土壌から植物珪酸体を分離し、その  $^{14}C$  年代を測定して、約 13,300 年という値を得た。ただし、珪酸体の炭素量 (<0.13~6%) はごく僅かしか含有されていないので  $^{14}C$  年代測定には数キログラムの土壌が必要となる。最近、炭素量数ミリグラムで  $^{14}C$  年代測定可能な加速器質量分析器が開発され、実用化されている。この方法が日常的に利用できるなら、植物珪酸体を用いた  $^{14}C$  年代は考古学および土壌学に大いに貢献するであろう。

犯罪事件には、なんらかの形でその現場に衣類、履物などの遺留品が残される。警察は、それらに付着している植物片、土、あるいは塵を丹念に収集し、異同識別することで物証の一部として法廷に提示する。このような犯罪捜査に植物珪酸体が利用された例として放火事件があり、現場に残された灰の植物珪酸体分析によってイネ藁が放火に用いられたことが実証された (丸茂、未発表)。最近、MARUMO (1986) は、埼玉県川越市において地形、土地利用の異なる土壌の植物珪酸体分析を行い、そ

これらの違いによって珪酸体組成に相異があることを認められた。その結果、植物珪酸体分析は、鉱物学的に差の認められない土壌試料の異同判別を行う場合、植生の相違があれば互いに識別できるので、その鑑定に有効な一手法であると考えた。

最近、この種の研究が都道府県警察の科学捜査研究所において関心を集めている。

以上、環境復元法としての植物珪酸体の能力について基礎的な側面とその応用面から紹介してきた。前述してきたように、何の変哲もない一枚の植物葉に隠されている自然界の小さな事実が、過去から現在にまたがる自然環境とそれをとりまく人間の生活文化の扉を開く鍵となってくれることは大変興味深いことである。今後、わが国において益々この種の研究が飛躍することを願ってやまない。

## 9. おわりに

過去 140 年間、内外において植物珪酸体にまつわる様々な研究が報告されてきたが、その数は 300 篇を越えていない。その多くは 1958 年以降からの研究であり、同時代に研究の緒についた花粉分析研究に比べると、かなり見劣りがする。

最近、10 年間のわが国および米国における植物珪酸体研究の発展は目を見張るものがある。とくに、わが国における黒ボク土腐植層の給源植物の同定、水稻栽培の歴史、草地植生の変遷、照葉樹林起源珪酸体の同定、米国におけるトウモロコシ栽培の歴史、作付体系の変遷、古環境の復元などの研究例があげられよう。

これまで述べてきたように、植物珪酸体分析はある面において花粉分析に匹敵する環境復元法といえるが、研究を着手してから日がまだ浅く、発展段階にあるため方法論などにおいても未解決の問題が多い。しかし、その応用範囲が広く、各分野にわたって成果が期待できるため、さらに、一層の基礎研究が望まれる。

今後、究めるべき若干の項目を以下に列記し、結とする。

①. 体系的植物珪酸体分類の確立 (とくに、イネ科は属レベルまで細分)、②. 各種植物の珪酸体生産量 (量、個数) リストの作製、③. 各種環境下における珪酸体の物理、化学的動向 (移動性、安定性)、④. 植物珪酸体組成と現植生との対応関係、⑤. イネ以外の栽培植物の歴史および作付体系の変遷、⑥. 同一試料における植物珪酸体と大型植物遺体、花粉・胞子などとの相互関係を検討、あるいは解明する必要がある。

## 文 献

- ALEXANDER, J. D., J. B. FEHRENBACHER, and B. W. RAY (1968) Characteristics of dark colored soils developed under prairie in a toposequence in northwestern Illinois. p. 34—38, In P. SCHRAMM (ed.), *Prairie and prairie reconstruction. Knox College Biol. Field Sta. Spec. Pub.* **3**, Galesburg, Illinois
- ANDERJWEKO, M. J. (1983) Biogenic silica in peats: possible source for chertification in lignites. Los Alamos Natl. Lab. (Rep.) La (U.S.), La-9907—OBES, Miner. Matter Peat, DE84—002332, p. 25—37, *Chemical Abst.*, **101**, 9402V
- ANDERSON, D. W. (1979) The pedologenic origins and characteristics of organic matter of solod soils. *Can. J. Soil Sci.*, **59**, p. 357—362
- AMOS, G. L. (1952) Silica in timbers. *Comm. Sci. Ind. Res. Org. Aust. Bull.*, **267**, p. 1—55
- 有村玄洋・菅野一朗 (1965a) 植物蛋白石について (予報). 九州農試彙報, **11**, p. 97—109
- ARIMURA, S. and KANNO, I. (1965b) Some mineralogical and chemical characteristics of plant opal in soils and grasses of Japan. *Bull. Kyushu Agric. Expt. Sta.*, **11**, p. 110—120
- ARMITAGE, P. L. (1975) The extraction and identification of opal phytoliths from the teeth of ungulates. *Jour. of Archaeol. Sci.*, **2**, p. 187—197
- BABA, I. (1956) Studies on the nutrition of the rice plant with special reference to nitrogen and silica. *Proc. Roy. Soc. Japan*, **24**, p. 29—33
- BARKER, G. (1959a) Fossil opal-phytoliths and phytolith nomenclature. *Aust. J. Sci.*, **21**, p. 305—306
- BARKER, G. (1959b) Opal phytoliths in some Victorian soils and "red rain" residues. *Aust. J. Bot.*, **7**, p. 64—87
- BARKER, G. (1960a) Phytolitharien. *Aust. J. of Sci.*, **22**, p. 392—393
- BARKER, G. (1960b) Hock-shaped opal phytoliths in the epidermal cells of oats. *Aust. J. Bot.*, **8**, p. 69—74
- BARKER, G. (1960c) Fossil opal phytoliths. *Miropaleontology*, **6**, p. 79—85
- BARKER, G. (1960d) Phytoliths in some Australian dusts. *Proc. Roy. Soc. Victoria.*, **72**, p. 21—40
- BARTOLI, F. (1985) Crystallochemistry and surface properties of biogenic opal. *J. Soil Sci.*, **36**, p. 335—350
- BARTOLI, F. and SELMI, M. (1977) Sur l'évolution du silicium végétal en milieux pédogénétiques aérés acides. *C. R. Acad. Sci. Paris Series D* **284**, p. 279—282
- BARTOLI, F. and B. SOUEHIER (1978) Cycle et rôle du silicium d'origine végétale dans les écosystèmes forestiers tempérés. *Ann. Sci. Forest.*, **35** p. 187—202
- BARTOLI, F., L. J. MONROZIER, and J. L. RAPAIRE (1980) Sur la stabilisation des matières organiques azotées

- par les minéraux silico-alumineux dans les podozols: phytolithes et argiles. *C. R. Acad. Sci., Paris Series D* **291**, p. 183—186
- BARTOLI, F., and L. P. WILDING (1980) Dissolution of biogenic opal as a function of its physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, p. 873—878
- BEAVERS, A. H. and I. STEPHEN (1958) Some features of the distribution of plant opal in Illinois soils. *Soil Sci.*, **86**, p. 1—5
- BLACKMAN, E. (1968) The pattern and sequence of opaline silica deposition in rye (*Secale cereale L.*). *Ann. Bot.*, **32**, p. 207—218
- BLACKMAN, E. (1969) Observations on the development of the silica cells of the leaf sheath of wheat (*Triticum aestivum*). *Can. J. Bot.*, **47**, p. 827—838
- BLACKMAN, E. (1971) Opaline silica bodies in the range grasses of southern Alberta. *Can. J. Bot.*, **49**, p. 769—781
- BLACKMAN, E. and D. W. PARRY (1968) Opaline silica deposition in rye (*Secale cereales L.*). *Ann. Bot.*, **32**, p. 199—206
- BONNET, O. T. (1972) Silicification cells of grasses: a major source of plant opal in Illinois soils. *Agr. Exp. Sta. Bull.*, **742**, p. 1—32
- BROWN, D. A. (1984) Prospects and limits of a phytolith key for grasses in the central United States. *J. Archaeol. Sci.*, **11**, p. 345—368
- BRYDON, J. E., W. G. DORE, J. S. CLARK (1963) Silicified plant asteroscleroids preserved in soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **27**, p. 476—477
- CARLQUIST, S. (1961) Comparative plant anatomy. 146p., Holt, Rinehart & Winston, New York
- CAMPOS, A. C. and L. G. LABOURIAU (1969) Corpos silicosos de gramíneas dos Cerrados II. *Pesq. agropec. bras.* **4**, p. 143—151
- CUTLER, D. F. (1978) Applied plant anatomy. 103 p., Longman, London, 入門応用植物解剖学 (遠山益訳, 1981), 210p., 共立出版, 東京
- DRUM, R. W. (1968) Silicification of *Betula* woody tissue in *vitro*. *Science*, **161**, p. 175—176
- EDMAN, G. and E. SÖDERBERG (1929) Auffindung von Reis in einer Tonscherbe aus einer etwas Fünftausendjährigen chinesischen Siedlung. *Geol. Soc. China*, **8**, p. 363—365
- EHRENBERG, C. G. (1838) Beobachtungen über neue Läger fossiler Infusorien und des Vorkommen von Fichtenblütenstaub neben deutlichen Fichtenholz, Haifischzähnen, Echintten und Infusorien in volhynischen Feuersteinen der Kreide. Ver. Preuss. Akad. Wiss. Berlin
- EHRENBERG, C. G. (1847) Passatstaub und Blutregen. *Deutsche Akad. Wiss. Berlin Abh.*, **1847**, p. 269—460
- EHRENBERG, C. G. (1854) Microgeologie, das Erde und Felsen schaffende Wirken des unsichtbar kleinen selbststängigen Lebens auf der Erde. 374p., L. Voss, Leipzig
- FIGUEIREDO, R. C. L. and W. HANDRO (1971) Corpos silicosos de gramíneas dos Cerrados V. p. 215—230, III Simposio sobre o Cerrado, Edgard Blucher, São Paulo
- 藤巻祐藏, 立原厚子, 佐藤孝則 (1985) 植物珪酸体によるエゾシカの食性分析, 日生態講演要旨集, **32**, p. 97
- FOLGER, D. W., L. H. BURCKLE and B. C. HEEZEN (1967) Opal phytoliths in a North Atlantic dust fall. *Science*, **155**, p. 1243—1244
- 藤原宏志 (1974) 野方中原遺跡土壌の Plant Opal 分析, 福岡市埋蔵文化財調査報告書, **30**, p. 50—51
- 藤原宏志 (1976a) 板付遺跡における Plant Opal 分析, 福岡市埋蔵文化財調査報告書, **35**, p. 53—58
- 藤原宏志 (1976b) プラント・オパール分析法の基礎的研究 (1)—数種イネ科植物の珪酸体標本と定量分析法一, 考古学と自然科学, **9**, p. 15—29
- 藤原宏志 (1976c) プラント・オパール分析による古代栽培植物遺物の探索, 考古学雑誌, **62**, p. 54—62.
- 藤原宏志 (1976d) 古代土器胎土に含まれるプラント・オパールの検出, 考古学ジャーナル, **125**, p. 6—10
- 藤原宏志 (1979) プラント・オパール分析法の基礎的研究 (3)—福岡・板付遺跡 (夜臼期) 水田および群馬・日高遺跡 (弥生時代) 水田におけるイネ (*O. sativa L.*) 生産総量の推定一, 考古学と自然科学, **12**, p. 29—42.
- 藤原宏志 (1980) プラント・オパール分析の基礎的研究 (4)—熊本地方における縄文土器胎土に含まれるプラント・オパールの検出—考古学と自然科学, **13**, p. 55—65.
- 藤原宏志 (1983) プラント・オパールからみた縄文から弥生—縄文晩期から弥生初頭における稲作の実証的検討一, 歴史公論, **8**, p. 63—70
- 藤原宏志 (1984) プラント・オパール分析法とその応用—先史時代の水田址探査一, 考古学ジャーナル, **227**, p. 2—7
- 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一, 考古学と自然科学, **11**, p. 9—20
- 藤原宏志・佐々木章・末吉孝行 (1975) 熊本・上ノ原遺跡 (縄文晩期初頭) 土壌の Plant Opal 分析, 日本作物学会九州支部会報, No. 42, p. 49—53
- GEIS, J. W. (1973) Biogenic silica in selected species of deciduous angiosperms. *Soil Sci.*, **116**, p. 113—130
- GEIS, J. W. and R. L. JONES (1973) Ecological significance of biogenic opaline silica. p. 74—85, In D. L. DINAL (ed.), *First soil microcommunities Conf. USAEC, Soil Microcommunities I.*
- GILL, E. D. (1967) Stability of biogenetic opal. *Science*, **158**, p. 810
- GROB, A. (1896) Beiträge zur Anatomie der Epidermis der Gramineebblätter. *Bibliotheca Botanica* **7**, p. 1—122

- HANDRECK, K. A. and L. P. H. JONES (1967) Uptake of monosilicic acid by *Trifolium incarnatum* (L.). Australian J. Biol. Sci., **20**, p. 483—485.
- 橋川 潮・森脇 勉・渡部忠世 (1980) 水田に投入された有機物の定量—古代から近世までに開田された水田の諸例, 日作紀, **49**, 別号 2, p. 153—154.
- 早田文蔵 (1929) ササ属の解剖分類学的研究, 植物学雑誌, **43**, p. 23—45
- HELBAEK, H. (1952) Early crops in southern England. Proc. Prehist. Soc. **18**, p. 194—233
- HERBAEK, H. (1959) How farming began in the Old World. Archaeology, **12**, p. 183—189
- HELBAEK, H. (1961) Studing the diet of ancient man. Archaeology, **14**, p. 95—101
- 平田友信・佐伯 浩・原田 浩 (1972) 南洋材の柔細胞中の結晶およびシリカの走査電子顕微鏡による観察, 京大農学部演習林報告, No. 44, p. 194—205.
- 平川一臣 (1975) 東・中部ヨーロッパにおける最終氷期の細分に関する諸研究の紹介, 第四紀研究, **14**, p. 123—138
- 細野 衛・佐瀬 隆 (1985) 浦和市の関東ローム層—とくに鉱物と植物珪酸体について—, p. 83—101, 浦和市史「調査報告書第 17 集自然編」, 埼玉県浦和市総務部市史編集室
- 石田英一郎・泉 靖一編 (1967) シンボジュウム日本農耕文化の起源, 210p., 角川書店, 東京
- JONES, J. B., J. V. SANDERS and E. R. SEGNI (1964) Structure of opal, Nature, **204**, p. 990—991.
- JONES J. B. and E. R. Segnit, (1971) The nature of opal. I. Nomenclature and constituent phases. J. Geol. Soc. Aust., **18**, p. 57—68.
- JONES, L. H. P. and K. A. HANDRECK (1963) Effects of iron and aluminum oxides on silica in solution in soils. Nature, **198**, p. 852—853.
- JONES, L. H. P. and K. A. HANDRECK (1967) Silica in soils, plants, and animals. Adv. Agron., **19**, p. 107—149.
- JONES, L. H. P. and A. A. MILNE (1963) Studies of silica in the oat plant. I. Chemical and physical properties of the silica. Plant Soil, **18**, p. 207—220.
- JONES, L. H. P., A. A. MILNE, and J. V. SANDERS (1966) Tabashir: an opal of plant origin. Science, **151**, p. 464—466.
- JONES, R. L. (1964) Note on occurrence of opal phytoliths in some Cenozoic sedimentary rocks J. Paleontol., **38**, p. 773—775.
- JONES, R. L. and A. H. BEAVERS (1963) Some mineralogical and chemical properties of plant opal. Soil Sci., **96**, p. 375—379.
- JONES, R. L. and A. H. BEAVERS (1964a) Aspects of catenary and depth distribution of opal phytoliths in Illinois soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., **28**, p. 413—416.
- JONES, R. L. and A. H. BEAVERS (1964b) Variation of opal phytolith content among some great soil groups in Illinois. Soil Sci. Soc. Am. Proc., **28**, p. 711—712.
- JONES, R. L. and W. W. HAY (1975) Bioliths. p. 481—496, In J. E. GIESKING (ed.), Soil Components, Vol. 2, Inorganic components, Springer-Verlag, New York.
- JONES, R. L., W. W. HAY, and A. H. BEAVERS (1963) Microfossils in Wisconsin loess and till from western Illinois and eastern Iowa. Science, **140**, p. 1222—1224.
- JONES, R. L., J. MCKENZIE, and A. H. BEAVERS (1964) Opaline microfossils in some Michigan soils. Ohio J. Sci., **64**, p. 417—423.
- JOHNSTON, A., L. M. BEZEAU and S. SMOLIAK (1967) Variation in silica content of range grasses. Can. J. Plant Sci., **47**, p. 65—71.
- 上條朝宏 (1984) 縄文土器の胎土分析, 歴史公論, **10**, p. 134—147
- 菅野一郎 (1961) 日本の主要土壌型の生成分類学的研究 I, 序論および第 I 編 腐植質アロフェン土, 九州農試彙報, **7**, p. 1—185
- 菅野一郎・有村玄洋 (1958a) 土壌中の植物蛋白石 (Plant Opal) について, ベドロジスト, **2**, p. 78—85
- KANNO, I. and S. ARIMURA (1958b) Plant opal in Japanese soils. Soil Plant Food, **4**, p. 62—76.
- 加藤富司 (1932) 本邦産大麦の「スボドグラム」, 宮崎高等農林学校学術報告, 4号, p. 87—110
- 加藤富司 (1933) 小麦の葉の「スボドグラム」, 宮崎高等農林学校学術報告, 5号, p. 29—50
- 加藤芳朗 (1958) 「黒ボク」土壌中のプラント・オパールについて, ベドロジスト, **2**, p. 73—77
- 加藤芳朗 (1960) 「黒ボク」土壌中の植物起源粒子について (予報), 土肥誌, **30**, p. 549—552
- 加藤芳朗 (1962) 関東ローム層の細砂鉱物組成, 地球科学, **62**, p. 11—20
- 加藤芳朗 (1963) 火山灰中の植物珪酸体, 第四紀研究, **3**, p. 59—61
- 加藤芳朗 (1975) 元野遺跡発掘調査報告書, p. 48—49, 沼津市教育委員会
- 加藤芳朗 (1977) 植物珪酸体—土の化石—, 静岡地学36号, p. 4—16
- 加藤芳朗 (1933) 火山灰土の生成メカニズム, p. 5—30, 火山灰土—生成・性質・分類—, 日本土壤肥料学会編, 博友社
- 加藤芳朗・佐瀬 隆・堺井茂雄・金沢信夫 (1980) 植物珪酸体による土壌生成年代の推定, 土肥要旨集, **30**, p. 133
- KAUFMAN, P. B., W. S. BIGELOW, R. SCHMID, and N. S. GHOSHEH (1971) Electron microprobe analysis of silica in epidermal cells of *Equisetum*. Amer. J. Bot., **58**, p. 309—316.
- 河室公康 (1981) 火山抛物体に由来する森林土壌の生成学論的研究 (III)—長野県黒姫山の褐色森林土と黒色土について (予報)—, 92回日林論, p. 183—186

- 河室公康 (1983 a) 十和田火山灰由来の褐色森林土および黒色土のA層および埋没A層中の植物珪酸体について, 94回日林論, p. 183—186
- 河室公康 (1983 b) 土壌中の植物珪酸体の風化度と年代との関係について, 35回日林関東支論, p. 123—126
- 河室公康 (1983 c) 走査電子顕微鏡観察によるササ属およびススキ属等の植物珪酸体の形態について, 35回日林関東支論, p. 127—129
- 河室公康 (1984) 植物珪酸体(I)—林野に群生する主なイネ科植物葉中の植物珪酸体の形態, 森林立地, **26**, p. 18—25
- KLEIN, R. L. and J. W. GEIS (1978) Biogenic silica in the Pinaceae. *Soil Sci.*, **126**, p. 145—156.
- 近藤鍊三 (1974) Opal phytoliths—植物珪酸体の形態的特徴とイネ科植物分類グループとの関連一, ペドロジスト, **18**, p. 1—10
- 近藤鍊三 (1975) 樹木起源の珪酸体について, ペドロジスト, **20**, p. 174—190
- KONDO, R. (1977) Opal phytolith, inorganic particles in plants and soils. *JARQ*, **11**, p. 198—203.
- 近藤鍊三 (1980) 泥炭土の有機物に関する化学的研究, 376p., 博士論文, 名古屋大学
- 近藤鍊三 (1981) 弁天橋遺跡土壌の植物珪酸体分析, p. 67—71, 弁天橋遺跡調査報告書, 八王子市弁天橋遺跡調査研究会
- 近藤鍊三 (1982a) Plant Opal による黒色腐植層の成因究明に関する研究, 32 p., 昭和56年度科学研究費(一般研究C) 研究成果報告書
- 近藤鍊三 (1982 b) 九州の埋没火山灰土壌腐植層中の植物珪酸体について, 土肥要旨集, **28**, p. 146
- 近藤鍊三 (1982 c) 茅野市御社宮司遺跡土壌のプラント・オパール分析, p. 208—212, 長野県中央道埋蔵文化財包蔵地発掘調査報告—茅野市 その5—昭和52・53年度, 日本道路公団名古屋建設局・長野県教育委員会
- 近藤鍊三 (1983 a) 植物珪酸体(プラント・オパール)分析の農学および理学への応用, 十勝農学談話会誌, 第24号, p. 66—83
- 近藤鍊三 (1983 b) 土壌中の植物起源オパール“植物珪酸体分析”から何がわかるか, 化学と生物, **21**, p. 739—741.
- 近藤鍊三 (1984 a) プラント・オパールとその応用をめぐって, 歴史公論, **10**, p. 114—123
- 近藤鍊三 (1984 b) 土壌中の非イネ科起源珪酸体について, 土肥要旨集, **30**, p. 149
- 近藤鍊三 (1985) 居辺16遺跡土壌の植物珪酸体分析, p. 70—77, 居辺遺跡, 上士幌町教育委員会
- 近藤鍊三・原田孝幸 (1980) 泥炭地植物および泥炭土の植物ケイ酸体について, 土肥要旨集, **26**, p. 134
- 近藤鍊三・石田正人 (1981) カシワ林下の火山灰土壌の植物珪酸体について, 土肥要旨集, **27**, p. 125
- KONDO, R. and Y. IWASA (1981) Biogenic opal of humic yellow latosol and yellow latosol in Amazon region. *Res. Bull. Obihiro Univ.*, **12**, p. 231—239.
- 近藤鍊三・小崎 隆 (1986) 西アフリカ低地土壌の植物珪酸体について, 土肥要旨集, **32**, p. 134
- 近藤鍊三・太田泰広 (1979) 水分環境を異にする火山灰土壌腐植層中の植物珪酸体について, 土肥要旨集, **25**, p. 233
- 近藤鍊三・ピアスン友子 (1981) 樹木葉のケイ酸体に関する研究(第2報), 双子葉被子植物樹木葉の植物ケイ酸体について, 帯畜大研報, **12**, p. 217—229
- 近藤鍊三・榮美津子 (1979) ササ類の珪酸体について, 土肥要旨集, **25**, p. 148
- 近藤鍊三・佐藤孝則 (1985) 曉遺跡土壌の植物珪酸体分析, 土器胎土の植物珪酸体組成, p. 121—132, 帯広市埋蔵文化財調査報告書「帯広・曉遺跡」, 帯広市教育委員会
- 近藤鍊三・隅田友子 (1978) 樹木葉のケイ酸体に関する研究(第1報), 裸子植物および単子葉被子植物樹木葉の植物ケイ酸体について, 土肥誌, **49**, p. 138—144.
- 近藤鍊三・佐瀬 隆・相馬 靖 (1983) イネ科草本類起源ケイ酸体の細分類について, 土肥要旨集, **29**, p. 143
- 近藤良男 (1931) 灰像による生薬鑑識の研究, 第3報, 薬学雑誌, **51**, p. 913—935
- KURMANN, M. H. (1982) An opal phytolith and paly-nomorph study of extant and fossil soils in Kansas. *Ohio J. Sci.*, **82**, p. 18.
- LANNING, F. C. (1961) Silica and calcium in black raspberries. *Proc. Amer. Hort. Soci.*, **76**, p. 349—358.
- LANNING, F. C., W. X. PONNAIYA, and C. F. CRUMPTON (1958) The chemical nature of silica in plants. *Plant Physio.*, **33**, p. 339—343.
- LATHRAP, D. W., J. G. MARGOS, and J. A. ZEIDLER (1977) Real Alto: An ancient ceremonial center. *Archaeology*, **30**, p. 2—13.
- LEWIS, R. O. (1978) Use of opal phytoliths in paleoenvironmental reconstruction. *Wyoming Contributions to Anthropology*, **1**, p. 127—132, Cited from D. M. PEARSALL (1982).
- LEWIS, R. O. (1981) Use of opal phytoliths in paleoenvironmental reconstruction. *J. Ethnobiol.*, **1**, p. 175—181.
- LUTWICK, L. E. (1969) Identification of phytoliths in soils. p. 77—82, In S. PAWLUK (ed.), *Pedology and Quarernary Research Symposium, National Canadian Research Council and Univ. of Alberta, Canada.*
- 町田 洋・鈴木正男 (1971) 火山灰の絶対年代と第四紀後期の編年—フィッジョン・トラック法による試み, 科学, **41**, p. 263—270
- 松井 健・成瀬 洋・黒部 隆 (1968) 立川ローム層中の暗色帯(埋没古土壌腐植層)の<sup>14</sup>C年代, 地球科学, **22**, p. 40—41
- MARUMO, Y. (1986) Morphological analysis of opal phytoliths for soil discrimination in forensic science investigation. *Jour. of Forensic Sciences*, Manuscript.
- 松谷曉子 (1981 a) 長野県諏訪原村大石遺跡で出土のタール状炭化粒子の同定について, p. 141—143, 長野県中央道埋蔵文化財発掘調査報告—諏訪市その4—昭和54年度鑑定結果

- 松谷暁子 (1981b) 灰像と炭化像による縄文時代の作物栽培の探究, 考古学ジャーナル, **192**, p. 20—22
- MEHRA, P. N. and O. P. SHARMA (1965) Epidermal silica cells in the *Cyperaceae*. *Botan. Gaz.*, **126**, p. 53—58.
- METCALFE, C. R. (1956) Some thoughts on the structure of Bamboo leaves. *Bot. Mag. (Tokyo)*, **69**, p. 391—400.
- METCALFE, C. R. (1960) Anatomy of the Dicotyledons. I. Gramineae. 731 p., Oxford Univ. Press, London.
- MIKELSON N. (1984) Diatoms in the Zaire deep sea-fan and Pleistocene paleoclimatic trends in the Angola basin and west Equatorial Africa. *Neth. J. Sea Res.* **17**, p. 280—292, *Biological Abst.*, **79**, 70260.
- MILLER, A. (1980) Phytoliths as indicators of farming techniques. Paper presented at the 45th meeting of society for American Archaeology, Philadelphia, Cited from D. M. PEARSALL (1982).
- MOLICH, H. (1920) Aschenbild und Pflanzenverwandschaft. *Stizb. Akad. Wiss. Wien*, **129**, p. 261—294.
- 中村 純 (1967) 花粉分析, 232p., 古今書院, 東京
- 永塚鎮男 (1984) 火山灰に由来する褐色森林土の成因的特徴 (2)—土壌生成に及ぼす植生の影響—, 土肥要旨集, **30**, p. 148
- NANKO, H. and W. A. CÔTÈ (1980) Crystals and other inclusions in the phloem, p. 47—51, Bark structure of hardwoods grown on southern pine sites. Syracuse Univ. Press, Syracuse, New York.
- 南光浩毅・W. A. CÔTÈ (1981) *Magnolia* と *Aphananthe* の二次師部中のシリカを含む師部繊維, 第 31 回日本木材学会大会研究発表要旨集, p. 70
- NETOLIZKY, F. (1929) Die Kieselskörper. p. 1—19, In K. LINSBAURE (ed.), *Handbuch der Pflanzenanatomie*, Berlin.
- NORGREN, J. A. (1973) Distribution, form and identification of plant opal in Oregon soils. Ph. D. Dissertation, 176p. Oregon State Univ., Corvallis, *Diss. Abst. Int.*, **33**, 4321B.
- NUMATA, M. (1969) Progressive and retrogressive gradient of grassland vegetation measured by degree of succession-Ecological judgement of grassland and condition and trend IV. *Vegetatio*, **19**, p. 96—127.
- 小原亀太郎・近藤良男 (1929, 1931) 灰像による生業鑑識の研究 (第 1～2 報), 薬学雑誌, **49**, p. 1036—1048, **51**, p. 738—749
- OBERHOLSTER, R. E. (1968) A method for the separation of plant opal in soils. *S. Afr. J. Agric. Sci.*, **11**, p. 195—196.
- 大池昭二・松山 力・竹内貞子 (1977) 八戸浮石層直下の埋没化石林の  $^{14}\text{C}$  年代—日本の第四紀層の  $^{14}\text{C}$  年代 (118)—, 地球科学, **31**, p. 136—137
- 大木麒一 (1927—30) 竹類のアッシュンビルドの分類学的価値に就きて (予報 1—9), 植物学雑誌, **41**, p. 719—731, **42**, p. 270—278, p. 311—317, p. 383—395, p. 515—524, **43**, p. 193—205, p. 479—489, **44**, p. 351—359, p. 534—545
- 大越昌子 (1980) 市川市土宇遺跡 No. 100 地点における住居址出土灰の分析結果について, 日本考古学研究所集報, **II**, p. 90—113
- 大越昌子 (1982a) 龍角寺ニュータウン遺跡群, **III**. 焼土中の灰の分析, p. 341—360, 龍角寺ニュータウン遺跡調査会
- 大越昌子 (1982b) 寿能泥炭層遺跡発掘調査報告書—自然編— 3. プラント・オバー, p. 239—265, 埼玉県教育委員会
- PARFENOVA, E. I. and E. A. YARILOVA (1962) Mineralogical investigation in soil science. 206 p., Acad. of Sci. (USSR), 土壤鉱物学 (佐野 豊訳), 238 p., たち書房, 米子.
- PARRY, D. W. and F. SMITHSON (1958) Silicification of bulliform cells in grasses. *Nature*, **181**, p. 1549—1550.
- PARRY, D. W., and F. SMITHSON (1964) Type of opaline silica deposits in the leaves of British grasses. *Ann. Bot.*, **28**, p. 169—185.
- PARRY, D. W. and F. SMITHSON (1966) Opaline silica in the inflorescences of some British grasses and cereals. *Ann. Bot.*, **30**, p. 525—538.
- PEASE, D. S. and J. U. ANDERSON (1969) Opal phytoliths in *Bouteloua Eriopoda* Torr. roots and soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33**, p. 321—322.
- PEARSALL, D. M. (1978) Phytolith analysis of archaeological soils: Evidence for maize cultivation in formative Ecuador. *Science*, **199**, p. 177—178.
- PEARSALL, D. M. (1980) Phytolith evidence of *Achira* and maize cultivation in formative Ecuador. Paper presented at the 45th meeting of the Society for Amer. Archaeol., Philadelphia, Cited from D. M. PEARSALL (1982).
- PEARSALL, D. M. (1982) Phytolith analysis: Applications of a new paleoethnobotanical technique in archaeology. *Amer. Anthropol.*, **84**, p. 862—871.
- PEARSALL, D. M. and M. K. TRIMBLE (1984) Identifying past agricultural activity through soil phytolith analysis: a case study from the Hawaiian Islands. *J. Archeol. Sci.*, **11**, p. 119—134.
- PEINEMANN, N., M. TSCHAPEK, and R. GRASSI (1970) Properties of phytoliths. *Z. Pflanzenemehr. Bodenkd.*, **127**, p. 126—133.
- PIPERNO, D. R. (1979) Phytolith analysis of archaeological soils from central Panama. Master Thesis, Temple Univ., Cited from D. M. PEARSALL (1982).
- PIPERNO, D. R. (1980) Phytolith evidence for maize cultivation in central Panama during the early ceramic (Monogrillo) period. Paper presented at the 45th meeting of the Society for Amer. Archaeol., Philadelphia, Cited from D. M. PEARSALL (1982).



- PIPERNO, D. R. (1981) First report on the phytolith analysis of the Vegas site OGSE-80, Ecuador. In the Vegas culture: Early prehistory of southwestern Ecuador. K. E. STOTHERT (ed.) Guayaquil, Ecuador: Museo Antropologico del Banco Central, Cited from D. M. PEARSALL (1982).
- PRAT, H. (1936) La Systématique des Graminées. *Ann. Sci. Nat. Bot. Biol. Ver.*, **18**, p. 165—258.
- PRAT, H. (1960) Vers une classification naturelle des graminées. *Bull. Soc. Bot. France*, **107**, p. 32—79.
- RAESIDE, J. D. (1970) Some New Zealand plant opals. *N. Z. J. Sci.*, **13**, p. 122—132.
- RESTALLACK, G. J. (1984) Completeness of the rock and fossil record: some estimates using fossil soils. *Paleobiology*, **10**, p. 59—78.
- RICHER, H. G. (1980) Occurrence, morphology and taxonomic implications of crystalline and siliceous inclusions in the secondary xylem of *Lauraceae* and related families. *Wood Sci. Technol.*, **14**, p. 35—44.
- RQUIER, J. (1960) Les phytoliths de certain soils Tropicaux et des podzols. *Int. Cong. Soil Sci. Trans. 7th* (Madison, Wis.), **1960**, p. 425—431.
- ROBINSON, R. L. (1980) Environmental chronology for central and south Texas: External correlations to the gulf costal plain and southern high plains. Paper presented at the 45th meeting of the Society of Amer. Archaeol., Philadelphia, Cited from D. M. PEARSALL (1982).
- ROVNER, I. (1971) Potential of opal phytoliths for use in paleoecological reconstruction. *Quat. Res.*, **1**, p. 343—359.
- ROVNER, I. (1975) Plant opal phytolith analysis in Midwestern Archaeology. A "new palynology," in prehistoric research, *Michigan Academician*, **7**, p. 129—137
- RUPRECHT, F. (1866) Geobotanical investigations on chernozem. *Acad. Sci. (USSR)*, Cited from G. Barker (1959).
- SANGSTER, A. G. (1970) Intercellular silica deposition in mature and senescent leaves of *Sieglingia decumbens* (L.) *Bernh. Ann. Bot.*, **34**, p. 557—570.
- 佐々木章 (1979) 東京・なすな原遺跡および三重・北堀遺跡 (古墳時代・水田) におけるイネ生産量の推定, p. 98—101, 自然科学の手法による遺跡・古文化財等の研究, 昭和53年度年次報告書
- 佐々木章 (1984) 焼畑山地土壌のプラント・オパール分析—宮崎県椎葉村向山一, p. 747—752, 古文化財に関する保存科学と人文・自然科学・総括報告書
- 佐々木章・藤原宏志 (1975) 過去に施用された稲藁堆肥量を推定する方法, Plant opal 分析の応用, 日本作紀, **44**, 別号1, p. 65—66
- 佐瀬 隆 (1980 a) 南部浮石層直下の埋没土壌の植物珪酸体分析, 第四紀研究, **19**, p. 119—124
- 佐瀬 隆 (1980 b) 八戸浮石層直下の埋没土壌の植物珪酸体 (プラント・オパール) 分析, 第四紀研究, **20**, p. 15—20
- 佐瀬 隆 (1980 c) 植物珪酸体 (プラント・オパール) 分析—古環境復元の新しい方法—, 岩手の地学, 第12号, p. 32—40
- 佐瀬 隆 (1981) 土器胎土の植物珪酸体分析, p. 145, 縄文土器の胎土分析, 歴史公論, **10**, (上條朝宏)
- 佐瀬 隆 (1982) 古墳時代住居址の炉に関する焼土について, —植物起源粒子の植物珪酸体から見て—, p. 303—308, 多摩ニュータウン遺跡, 東京都埋蔵文化財センター調査報告書 (第2集)
- 佐瀬 隆 (1984) No. 122 遺跡の住居址跡跡のプラントオパール分析, p. 140—149, 多摩ニュータウン遺跡, 東京都埋蔵文化財センター調査報告書
- 佐瀬 隆・細野 衛・加藤定男・駒村正治・倉林三郎・宇津川徹 (1982) 成増路露における関東ローム層の諸特性, その2—植物珪酸体分析, 日本第四紀学会講演要旨集, **12**, p. 62—63
- 佐瀬 隆・加藤芳朗 (1976 a) 現世ならびに埋没火山灰土壌腐植層中の植物起源粒子—とくに植物珪酸体に関する研究 (第I), —給源植物の推定に関する研究—, 第四紀研究, **15**, p. 21—34
- 佐瀬 隆・加藤芳朗 (1976 b) 現世ならびに埋没火山灰土壌腐植層中の植物起源粒子—とくに植物珪酸体に関する研究 (第II報) —火山灰土の腐植給源植物に関する問題と植物珪酸体を用いた古気候推定—, 第四紀研究, **15**, p. 66—74
- 佐瀬 隆・加藤芳朗・牧野誠一 (1985) 富士山麓および天城山麓の火山灰土壌の植物珪酸体分析, ベドロジスト, **29**, p. 44—59
- 佐瀬 隆・近藤鏡三 (1974) 北海道の埋没火山灰土腐植層中の植物珪酸体について, 帯畜大研報, **8**, p. 147—183
- 佐竹義輔 (1929—30) イラクサ群植物に於ける葉の Spodograms の分類学価値に就きて, 第1—3報, 植物学雑誌, **43**, p. 206—216, p. 413—421, **44**, p. 113—120
- 佐藤孝則 (1981) エゾシカ糞の植物珪酸体による食性の研究, 48p., 修士論文, 帯広畜産大学
- SCURFIELD, G., C. A. ANDERSON, and E. R. SEGNI (1974) Silica in woody stems. *Aust. J. Bot.*, **22**, p. 211—229.
- SENDULSKY, T. S. and L. G. LABOURIAU (1966) Corpos silicosos de gramineas dos Cerrado—I, p. 159—170, In L. G. LABOURIAU (ed.), II. Simpósio sôbreo Cerrado. *Anais Acad. Brasil Ciências*, **38**, Suplemento.
- SMITHSON, F. (1956a) Plant opal in soil. *Nature*, **178**, p. 107.
- SMITHSON, F. (1956b) Silica particles in some British soils. *J. Soil Sci.*, **7**, p. 122—129.
- SMITHSON, F. (1958) Grass opal in British soils. *J. Soil Sci.*, **9**, p. 148—154.
- STERING, C. (1967) Crystalline silica in plants. *Amer. J. Bot.*, **54**, p. 840—844.
- STEWART, D. R. M. (1965) The epidermal characters

- of grasses, with special reference to East African plains species. *Bot. Jb.*, **84**, p. 63—116, p. 117—174.
- STEWART, D. R. M. (1967) Analysis of plant epidermis in faeces: a technique for studying the food preferences of grazing herbivores. *J. Appl. Ecol.*, **4**, p. 83—111.
- 須藤彰司・飯高和美・山根又光・岩見 優 (1967) 南洋材中のシリカの存在, 林業試験場研究報告, No. 200, p. 43—55
- 高橋英一・三宅靖一 (1976 a) 植物界におけるケイ酸植物の分布について (その 1), 単子葉綱における分布, 土肥誌, **47**, p. 296—300
- 高橋英一・三宅靖一 (1976 b) 植物界におけるケイ酸植物の分布について (その 3), 裸子植物, 羊歯植物, 鮮苔植物における分布, 土肥誌, **47**, p. 333—337
- 高橋英一・三宅靖一 (1981) 植物界におけるケイ酸植物の分布について (その 5), イネ科植物における分布, 土肥誌, **52**, p. 503—510
- 高橋英一・田中輝夫・三宅靖一 (1981) 植物界におけるケイ酸植物の分布について (その 6), ツユクサ目—カヤツリグサ目の系統における分布およびウリ科, イラクサ科におけるケイ酸集積, 土肥誌, **52**, p. 511—515
- TAKATSUKI, S. (1978) Precision of fecal analysis: a feeding experiment with penned sika deer. *J. Mammal. Soc. Japan*, **7**, p. 167—180.
- TAKEOKA, Y., K. KONDO, and P. B. KAUFMAN (1983) Leaf surface fine structures in rice plants culture under shaded, and non-shaded conditions. *Japan, J. Crop Sci.*, **52**, p. 534—543.
- TAKEOKA, Y., O. MATSUMURA, and P. B. KAUFMAN (1983) Studies on silicification of epidermal tissues of grasses as investigated by soft X-ray image analysis. I. On the method to detect and calculate frequency of silica bodies in bulliform cell. *Japan J. Crop Sci.*, **52**, p. 544—550.
- 館岡亜緒 (1956) スズメガヤ亜科, キビ亜科の葉の解剖学的特徴の再検討, 植物研究雑誌, **31**, p. 210—218
- TOMLINSON, P. B. (1961) Anatomy of the Monocotyledons. II. Palmae, 453 p., Clarendon Press, Oxford
- TSUJI, S., M. MINAKI, and S. OSAWA (1984) Palaeobotany and paleoenvironment of the Late Pleistocene in the Sagami Region, central Japan. *The Quaternary Research*, **22**, p. 279—296
- TSUKADA, M. (1967) Vegetation in subtropical Formosa during the Pleistocene glaciations and the Holocene. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **3**, p. 49—64.
- 塚田松雄 (1974) 古生態学 II. 応用論, 231 p., 共立出版, 東京
- 塚田松雄 (1980) 植物珪酸体 (Phytolith), 軽石学雑誌, No. 6, p. 51—63
- TURNER, B. L. and P. D. HARRISON (1981) Prehistoric raised field agriculture in the Maya lowlands. *Science*, **213**, p. 399—405.
- TWISS, P. C., R. M. SMITH, and R. K. KRAUSS (1967) Composition of phytoliths from *Andropogon scoparius*. *Geol. Soc. Am. Abstr.*, p. 225.
- TWISS, P. C., E. SUESS, and R. M. SMITH (1969) Morphological classification of grass phytoliths. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33**, p. 109—115.
- TYRIN, I. V. (1937) On the biological accumulation of silica in soils. *Probl. Sov. Soil Sci.*, **4**, p. 3—23 (USSR)
- U MEMOTO, K. (1973) Mode of morphological forms of crystalline inorganic component in plants: Silicon bodies in wheat. *Chem. Pharm. Bull.* **21**, p. 1391—1393.
- U MEMOTO, K. and K. HOZUMI (1973) Identification of the plant source of the Chinese crude drug "dan-zhu-ye" using the low temperature plasma ashing techniques. *Microchimica. Acta* (Wine), p. 301—313.
- 梅村 弘・近藤錬三 (1984) 野尻湖周辺の黒ボク土のプラント・オパールについて, 土肥要旨集, **30**, p. 149
- Usov, N. I. (1943) Biological accumulation of silica in soils. *Pochvovdenie*, No. 9—10, p. 30—36 (USSR).
- 宇津川徹・細野 衛・杉原重夫 (1979) テフラ中の動物珪酸体 "Opal sponge spicules" について, ベドロジスト, **23**, p. 30—40
- VERMA, S. D. and R. H. RUST (1969) Observations on opal phytoliths in a soil biosequence in southeastern Minnesota. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **33**, p. 749—751.
- WATANABE, N. (1968) Spodographic evidences of rice from prehistoric Japan. *Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo*, **3**, p. 217—235.
- WATANABE, N. (1970) A spodographic analysis of millet from prehistoric Japan. *Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo*, **3**, p. 357—379.
- 渡辺直経 (1973—4) 灰像による穀物遺残の検出法 (上, 下), 考古学研究, **20**, p. 63—73, **21**, p. 55—62
- 渡辺直経 (1981) 遺跡の灰から穀物をさぐる—灰像による鑑別, p. 201—219, 考古学のための化学 10 章 (馬淵久夫・富永 健編), 東京大学出版, 東京
- WILDING, L. P. (1967) Radiocarbon dating of biogenic opal. *Science*. **156**, p. 66—67.
- WILDING, L. P. and L. R. DRESS (1968) Biogenic opal in soils as index of vegetative history in Prairie Peninsula. p. 96—103, In R. E. BERGSTORM (ed.), *The Quaternary of Illinois Univ. of Illinois Coll. Agric. Spec. Publ. No. 14, Urbana, Illinois*.
- WILDING, L. P. and L. R. DRESS (1971) Biogenic opal in Ohio soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **35**, p. 1004—1010.
- WILDING, L. P. and L. R. DRESS (1973) Scanning electron microscopy of opaque opaline forms isolated from forest soils in Ohio. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **37**, p. 647—650.

- WILDING, L. P. and L. R. DREES (1974) Contributions of forest opal and associated crystalline phases to fine silt and clay fractions of soils. *Clays Clay Miner.*, **22**, p. 295—306.
- WILDING, L. P. and L. R. DREES (1976) Biogenic opal in soils. Morphology, physical and chemical properties. p. 9—13, In H. HARWARD & K. WADA (eds.), *Amorphous and poorly crystalline clays. extended Abstract of U. S. -Japan Seminar*, Oregon State Univ., Corvallis, Oregon.
- WILDING, L. P., R. E. BROWN, and H. HOLOWAYCHUK (1967) Accessibility and properties of occluded carbon in biogenetic opal. *Soil Sci.*, **103**, p. 56—62.
- WILDING, L. P., C. T. HALLMARK, and N. E. SMECK (1979) Dissolution and stability of biogenic opal. *Soil Sci. Soci. Am. J.* **43**, p. 800—802.
- WILDING, L. P., N. E. SMECK, and L. R. DREES (1977) Silica in soils: quartz, cristobalite, tridymite, and opal. p. 471—552, In J. B. DIXON and S. B. WEED (eds.), *Minerals in soil environments*, *Soil Sci. Soci. Amer.*, Madison, Wisconsin
- WITTY, J. E. and E. G. KNOX (1964) Grass opal in some chestnut and forest soils in north central Oregon. *Soil Sci. Soci. Amer. Proc.*, **28**, p. 685—688.
- 山根一郎 (1973) 川渡山地草地における土壌と植生, ベドログスト, **17**, p. 112—119
- YARILOVA, E. A. (1952) Crystallization of phytolitharian in the soils. *Dokl. Acad. Nauk.* **83**, p. 911—912 (USSR).
- YECK, R. D. and F. GRAY (1969) Preliminary studies of opaline phytoliths from selected Oklahoma soils. *Pro. Okla. Acad. Sci.*, **48**, p. 112—116.
- YECK, R. D. and F. GRAY (1972) Phytolith size characteristics between Udolls and Ustolls. *Soil Sci. Soci. Amer. Proc.*, **36**, p. 639—641.
- YOSHIDA, S., Y. ONISHI, and K. KITAGISHI (1962) Histochemistry of silicon in rice plant: III. *Soil Sci. Plant Nutr.* **8**, p. 1—5.
- 吉田昌一 (1965) 水稻体中におけるケイ素の存在様式と生理的意義に関する研究, 農研報告B, **15**, p. 1—59

## 図 版 説 明

## 写真図版 I. イネ科植物起源珪酸体の走査型電子顕微鏡写真

A: エゾミヤコザサ (*Sasa apoiensis*), B: シャコタンチク (*Sasa kurilensis*), C: アズマネザサ (*Pleiblastus Chino*), D: コマチダケ (*Bambusa multiplex*), E: ローズグラス (*Chloris gayana*), F: オオニワホコリ (*Eragrostis pilosa*), G: オヒシバ (*Eleusine indica*), H: ヨシ (*Phragmites communis*), I: イネ (*Oriza sativa*), J: メヒシバ (*Digitaria ciliaris*), K: キビ (*Panicum miliaceum*), L: ヒエ (*Echinochloa utilis*), M, O: トウモロコシ (*Zea mays*), N: コブナグサ (*Arthraxon hispidus*), P: メガルカヤ (*Themeda triandra subsp. japonica*), Q: オオアブラススキ (*Spodiopogon sibiricus*), R: オギ (*Miscanthus sacchariflorus*), S: チモンソー (*Phleum pratense*), T: コムギ (*Triticum aestivum*), U: オーチャード (*Dactylis glomerata*), V: ウシノケグサ (*Festuca ovina*), W: ホガエリガヤ (*Brylkinia caudata*).

## 写真図版 II. イネ科植物起源珪酸体の走査型電子顕微鏡写真

A, L: トウモロコシ (*Zea mays*), B: ヨシ (*Phragmites communis*), C, W: イネ (*Oryza sativa*), D: ヒエ (*Echinochloa utilis*), E, R: チマキザサ (*Sasa palmata*), F, X: アケボノザサ (*Pleiblastus Akebono*), G: シバ (*Zoysia japonica*), H: オヒシバ (*Eleusine indica*), I: オーチャード (*Dactylis glomerata*), J: チヂミザサ (*Oplismenus undulatifolius*), K: メガルカヤ (*Themeda triandra subsp. japonica*), M: コムギ (*Triticum aestivum*), O: エゾミヤコザサ (*Sasa apoiensis*), P: ペンニアルライグラス (*Lolium perenne*), Q: メヒシバ (*Digitaria ciliaris*), S: オギ (*Miscanthus sacchariflorus*), T: イタリアンライグラス (*Lolium multiflorum*) V: シロガネヨシ (*Cortaderia selloana*), N, T, U: 不明.

## 写真図版 III. イネ科植物および非イネ科草本類起源珪酸体の走査型電子顕微鏡写真

A: チヂミザサ (*Oplismenus undulatifolius*), B: トウモロコシ (*Zea mays*), C: 種名不明, D: ササ属 (*Sasa spp.*), E, F, G: マコモ (*Zizania latifolia*), H, J: 不明 (ブラジル, ラトソル土から分離), I: 不明 (岩手県埋没黒ボク土から分離), K: コウボウムギ (*Carex kobomugi*), L: ワタスゲ (*Eriophorum vaginatum*), M, O, P: エゾアブラガヤ (*Scirpus wichurae*), Q: スゲ属 (*Carex spp.*), R: ワラビ (*Pteridium aquilinum*), S: シダ類 (*Pteropsida*), T, U: ミズトクサ (*Equisetum limosum*), V, W: シンピシユウム属 (*Cymbidium spp.*)\* \*左 (表), 右 (裏).

## 写真図版 IV. 樹木起源珪酸体の走査型電子顕微鏡写真

A, J: カシワ (*Quercus dentata*), B: ブナノキ (*Fagus crenata*), C: スダジイ (*Castanopsis sieboldii*), D: イヌビワ (*Ficus erecta*), E: キタコブシ (*Magnolia kobus*), F, G: タブノキ (*Persea thunbergii*), I, K: アカガシ (*Quercus acuta*), H: ヤマコウバシ (*Lindera gluca*), L: イスノキ (*Distylium racemosum*), M: ケヤキ (*Zelkova serrata*), N: 南方材 (種名不明), O: エゾマツ (*Picea jezoensis*), P: クロマツ (*Pinus thunbergii*), Q: ヤシ (*Palmae*), R, S: クロツグ (*Arenga tremula Becc. var. engleri*)\*, T: ヤエヤマヤシ (*Satakenia liukiensis*)\* 左 (裏), 右 (表).

写真図版 V. 同一葉身 (*Sasa apoiensis*) から分離したタケ型珪酸体の各種タイプ

1~5 はごく普通のタイプ, 6~9 は稀なタイプ.

