

環境考古学における植物性微化石分析の現状と課題—花粉分析を中心として

守田 益宗¹⁾

●キーワード：時間スケール (temporal scale), 空間スケール (spatial scale), 花粉 (pollen), 微粒炭 (charcoal fragments), 植物珪酸体 (phytolith), 古環境 (paleoenvironment)

1. はじめに

維管束植物は根・茎・葉という器官から成り立ち、その生殖のため孢子や花粉を作り出す。また、種子植物では花や果実など特別な器官をつける。さらに、これらの植物の中にはその細胞に珪酸を沈積するものも存在する。通常、植物体は死後分解されるが、その過程でさまざまな部位や大きさの遺体や痕跡物となり堆積物中に取り込まれ保存される。このような植物体起源の遺体のうち、直接肉眼では観察できないものを微化石と呼んでいるが、なかでも花粉、孢子は研究の蓄積が多く、植生や環境を復元するのに最も利用されている微化石である。その方法は花粉分析として知られているが、沼田 (1928) により我国に始めて紹介されて以来、生態学、気候学、林学、地理学、地質学など様々な分野で利用されている。考古学分野への利用は、堀 (1952) の千葉県加茂遺跡の研究にはじまる。その後、藤 (1968) は福井県東大寺領道庄においてイネ科花粉の粒径区分などにに基づき水田耕作について論議した。さらに、中村 (1974) はイネ科花粉の表面模様の違いから野生型と栽培型の識別法を見出した。一方、土壌中の植物珪酸体の存在は 1950 年代後半には菅野・有村 (1958) や加藤 (1958) によって我国でも確認されるようになったが、考古学や古環境の復元に応用されるようになったのは 1970 年代後半以後である。なかでも、藤原 (1976) はイネ科植物葉部の機動細胞珪

酸体に着目して栽培植物種の識別法を確立した。

1976～1982 年わたる文部省科学研究費特定研究「古文化財」では、花粉分析の中村 純やプラントオパール分析の藤原宏志などの研究者グループが参加し、日本列島における稲作の拡大過程や古環境に関する研究が行われた。以後、考古学分野ではこれらの分析法が有用な研究手段として積極的に活用されるようになり、今日ではさらに植物体の燃焼痕跡物である微粒炭分析 (山野井：1996 など) をはじめ、寄生虫卵分析 (黒崎ほか：1992 など)、デンプン粒分析 (渋谷：2012) など様々な微化石分析手法 (Berglund：1986, 安田：2004 など) が利用されるまでになっている。

ここでは、古環境復元の視点から花粉分析を中心に関連する微化石分析を含め近年の動向とその問題点を概観する。

2. 花粉分析の基本原理解

花粉・孢子の表面を形成する外壁は、カロチノイドまたはカロチノイドエステルの酸化重合体であるスポロポレニンと呼ばれる物質から形成されている。この物質は非酸化的分解に対して高い耐性をもつため、湖底や湿地などの嫌氣的環境下では極めて分解されにくい。花粉・孢子は植物によって大きさ、表面の模様、発芽口の構造や配置などが異なり、その形態は分類群によってさまざまな特徴をもっている。このような花粉・孢子の形態的

¹⁾ 岡山市北区理大町 1-1 岡山理科大学

特徴によって、植物分類上の科、属などの分類群が識別できる。

通常、種子を作る植物やシダ植物では膨大な量の花粉や胞子を作り放出する。齋藤（2012）によれば樹木の花粉生産量は年間 1 ha あたり $10^{12} \sim 10^{13}$ 個オーダーという。これらの花粉・胞子は空气中に大量に散布されたり昆虫によって運搬され、やがてその一部は湖底や湿地などにたどり着き、嫌気的環境下に保存されることとなる。このようにして堆積物中に保存された花粉・胞子の種類や比率から過去の植生を復元し、さらにはその植生を支配していた気候を時空的に明らかにする手法が花粉分析である。分析結果も当初は百分率による相対表示であったが、現在では年代測定の高精度化にともない年間当たりの花粉流入量で表示することも普通になってきている。

生態系の変化は気候変動や突発的な自然災害など様々な原因によって引き起こされるが、これらの原因はその規模によって起こる頻度は異なり、影響を及ぼす範囲や期間も異なってくる。例えば、火山の超巨大噴火は滅多に起きないがその被害は壊滅的であるのに対し、小規模噴火は頻繁であるが被害はそれほどでもなく局所にとどまる。これと同様に、生態系の変化にも、それぞれに応じた空間スケールと時間スケールがある（Delcourt and Delcourt : 1988）。古環境の復元には、この時間・空間スケールの関係を常に考えておく必要がある（図 1）。

堆積物から得られた化石花粉群（花粉スペクトル：pollen spectrum）が周囲の植生をどのように反映してい

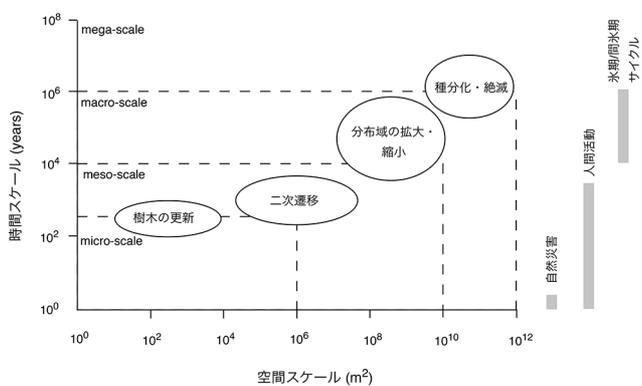


図 1 生態的变化と時間・空間スケールの関係 (Delcourt and Delcourt (1988) より)

Fig.1 Characteristic scales in time and space for certain ecological processes.

るのは、主に研究者の経験に基づき考察されてきたが、1990 年代以後の急速なコンピュータの普及に伴い、シミュレーションや多変量解析をもとにした植生や気候の客観化をめざす理論的、実証的な研究が進んでいる。

3. 環境復元の方法論の発達

3.1 数理モデルによる景観復元

大きな堆積盆の堆積物では遠距離飛来する花粉の割合が高く広域的な植生を反映するのに対し、小さな堆積盆の堆積物では局所的な植生を示すことは経験的には知られていた (Janssen : 1981, Jacobson and Bradshaw : 1981 など) (図 2)。Prentice (1985, 1988) や Sugita (1993) は、空气中での沈降速度やそれともなって飛散距離が異なる花粉をいくつか用い、異なる大きさの堆積盆における花粉の堆積量の数理モデルを提示した。次いで Sugita (1994) は、仮想的な植生モザイクのモデル計算から、ある地域内において堆積盆の中心部に堆積する花粉群の割合が周囲の植生と有意な相関がある範囲を「有効花粉飛来範囲 (relevant source area for pollen)」と定義し、この範囲がその堆積物の花粉分析結果が反映する花粉の給源範囲であるとした (図 3)。つまり、ある地域内の複数地点の花粉分析結果の違いは、この「有効花粉飛来範囲」内の植生の違いを反映した結果ということに

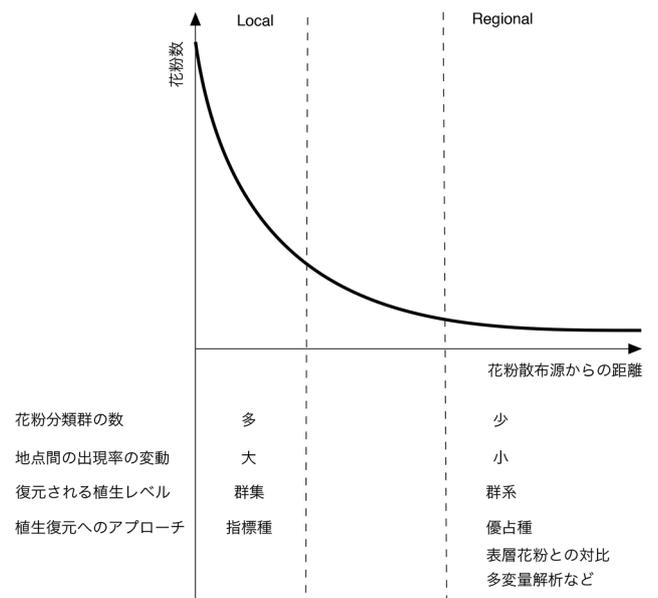


図 2 散布源からの距離による花粉群の研究方法及それらの花粉群の特徴 (Janssen (1981) より)

Fig.2 Different approaches to pollen spectra analysis at different distances from the source and their characteristics.

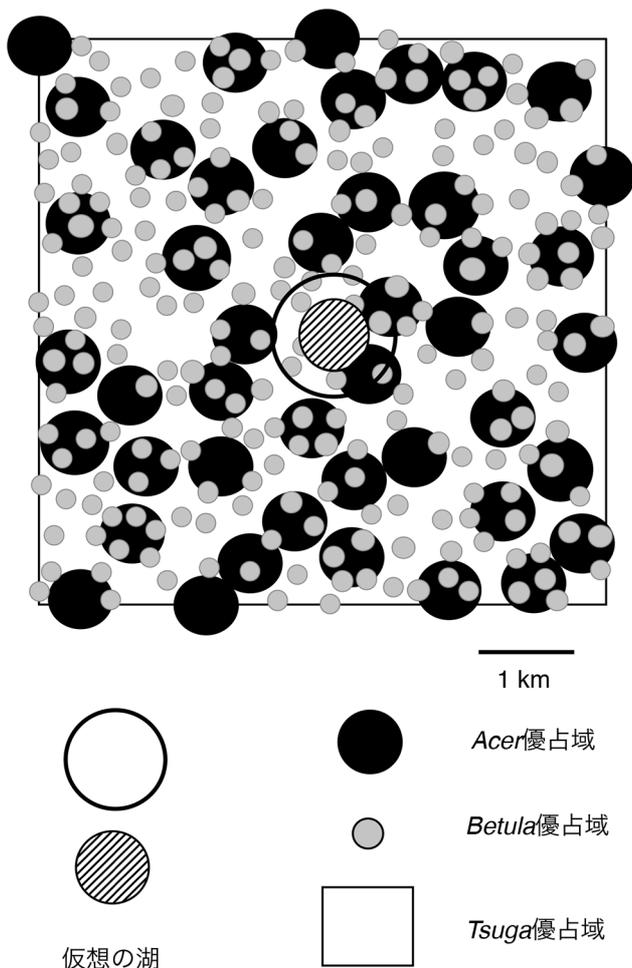


図3 シミュレーションに用いた仮想的な景観 (Sugita (1994) より)

Fig.3 An example of a hypothetical landscape used for the simulations of pollen representation.

なる。その範囲は、モデル計算により半径 2 m の堆積盆では堆積盆の端から周囲 50~100 m 以内、半径 50 m の堆積盆で周囲 300~400 m 以内、半径 250 m の堆積盆では周囲 600~800 m 以内であり、半径 750 m 以上の堆積盆になると分析地点間の差はほとんどなくなる。これらの研究は、従来の経験則を理論的に補強するものである。さらに、Sugita (2007a,b) は樹種ごとの花粉生産量も加味した上で、複数の大きな堆積盆 (1 km² 以上) の花粉分析結果から比較的大きな地域 (10⁴~10⁵ km²) の植生の量的構成を得る REVEALS (Regional Estimates of Vegetation Abundance from Large Sites) モデルと LOVE (Local Vegetation Estimate) モデルと呼ぶ小さな堆積盆の花粉分析結果からその「有効花粉飛来範囲」内の植生の量的構成を得るモデルを組み合わせることにより、ある地域内の植生景観を復元する手順を示した景観復元アルゴリズム (Landscape Reconstruction

Algorithm : LRA) も提唱している。

このように、花粉分析に数理モデルを適用することにより、復元したい空間スケールに応じたサンプリング計画を立案できるようになってきており、現在では LRA をもとにした古植生復元研究が全世界で計画・実行されるまでになっている。

3.2 環境の客観的復元

Prentice et al. (1992, 1996) は、花粉分析データからある植生の境界が時間的・空間的にどこまでの広がりをもっていたかを客観的に示す方法を考案した。この手法は植生の定量的復元法 (Biomization) として知られるが、類似した気候下では類似した相観の植生 (植物群系またはバイオーム (Biome) と呼ぶ) が成立することに着目したものである。相観は構成する植物群落の形や構造を反映しており、優占種の生活形によって決定づけられる。例えば、湿潤な亜寒帯に成立する森林は、地域によって構成する樹種は違っていても相観的には同じ常緑針葉樹林という植物群系を形成する。バイオームは優占する植物の組み合わせで決定されるが、花粉分析データでは各植生素タイプ (Plant Functional Type : PFT) に属する花粉の出現率の組み合わせをもとに、その組み合わせの類似性から数値的に各バイオームとして判別していくことになる (表 1, 2)。この手法の特徴は、表層花粉や現植生などの現世の情報からのアナロジーではなく、それぞれの分類群の生態的特性をもとに自動的にバイオームを判別・分類していくことにある。

一方、現在と過去の情報の類似性をもとに復元していく方法として注目されているのは多変量解析を応用したモダンアナログ法 (Modern Analog Techniques : MAT) である (Hutson : 1979, Overpeck et al. : 1985 など)。Nakagawa et al. (2002) は、この方法を発展させ、花粉分析データから直接気候データを推定する手法を開発した (図 4)。すなわち、堆積物中の花粉データと、気候条件がわかっている各地の現在の表層花粉データとを比較し、前者のデータが後者のデータのどれと最も類似するかによって堆積当時の気候を復元するものである。これらの数値的復元法の詳細やプログラムの入手先は、五反田 (2004)、中川 (2004, 2008) を参照されたい。

表1 PFT とそれらに割り当てられた花粉分類群の例 (五反田・福澤 (2006) より)
 Table 1 Example of plant functional types (PFTs) and the pollen taxa assigned to each.

Abbr.	Plant Functional Type (PFT)	Pollen taxa
bee	boreal evergreen conifer	<i>Abies, Picea</i>
bs	boreal summer-green	<i>Alnus, Betula, Salix, Myrica</i>
bsc	boreal summer-green conifer	<i>Larix</i>
ctcl	cool-temperate conifer	<i>Abies, Tsuga</i>
tc	temperate conifer	<i>Cryptomeria, Sciadopitys</i>
ec	eurythermic conifer	<i>Pinus, Taxaceae/Cupressaceae</i>
ts	temperate summer-green	<i>Quercus (deciduous), Carpinus, Zelkova-Ulmus, Juglans-Pterocarya, Acer, Salix, Alnus, Rhus, Fraxinus, Symplocos</i>
ts0	lower cool-temperate summer-green	<i>Fagus</i>
tsl	cool-temperate summer-green	<i>Ulmus-Zelkova, Tilia, Aesculus, Corylus, Viburnum</i>
te	temperate broadleaved evergreen	<i>Castanopsis, Ilex</i>
wtc	warm-temperate conifer	<i>Podocarpus</i>
wte	warm-temperate broadleaved evergreen	<i>Quercus (evergreen), Myrica, Camellia, Ilex, Symplocos</i>

表2 PFT とバイオームの対応関係の例 (五反田・福澤 (2006) より)
 Table 2 Example of Biomes and key PFTs that define each biome.

Biome	Plant Functional Types (PFT)
cold deciduous forest	bs, bsc, ec
cold mixed forest	bs, ctcl, ec
taiga	bee, bs, bsc, ec
cool conifer forest	bee, bs, bsc, ctcl, ec, tsl
cool mixed forest	bee, bs, ctcl, ec, ts, tsl
temperate deciduous forest	ctcl, bs, tc, ec, ts, ts0, tsl
temperate conifer forest	ctcl, tc, ec, ts, tsl, , te, wtc
broadleaved evergreen/warm mixed forest	tc, ec, ts, tsl, te, wtc, wte

以上の手法は、植生や気候の復元に客観性を与えるものとして重要であり、定量的復元法を用いた研究としては、Takahara et al. (2000) による 18000 年前と 6000 年前の日本列島全体の植生の水平・垂直分布復元や、Gotanda and Yasuda (2008) による最終氷期最盛期以降の西日本の植生の時空分布変化の研究などがある。また、MAT による研究では、Nakagawa et al. (2008) が琵琶湖堆積物を用い過去 45 万年間の気候復元を試みている。

琵琶湖堆積物を用い過去 45 万年間の気候復元を試みている。

なお、これらの手法に対しては、気候と植生が平衡状態にあるときの関係に基礎を置くことから、急激な気候変動時における植生の応答を推定する際には問題を生じることが指摘されている (高原:2006)。また、山岳上部や植生の粗密地が交錯するような植生の境界部では、

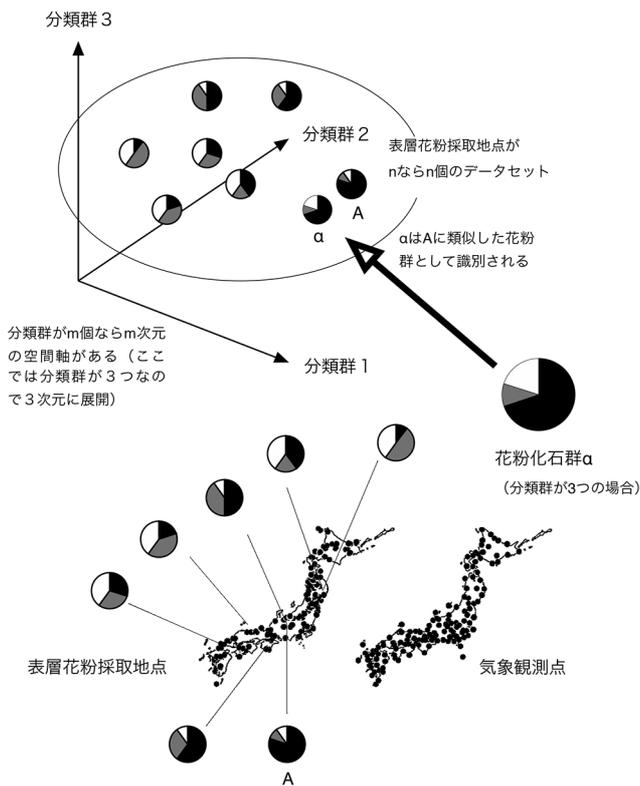


図4 モダンアナログ法（MAT）の概念図（中川（2004）より）
Fig.4 Conceptual figures related to Modern Analog Techniques (MAT).

バックグラウンドの飛来花粉の割合が時代とともに変化することは当然であり、これにより復元精度が左右される可能性が高い。後者の問題は、面積に比し地形および植生が複雑に交錯する我国では得られたデータの扱いに特に注意すべきであろう。

3.3 年代軸の高精度化

近年では¹⁴C年代測定への加速器質量分析法（AMS）の導入により、1万年より若い年代については1 mg以下の炭素量から20年程度の誤差で校正可能であり、年代決定の高精度化が進んでいる（中村：2001）。さらに、年縞堆積物では、暦年代との対比やそこから直接花粉分析用試料を採取することにより、理論的には1年当たり2時節での分析が可能となっている（中川：2015）。年代軸の高精度化を背景に、京都盆地では深泥池や遺跡の花粉分析結果が比較され、さらには絵図などの文献記録とも検討された結果、人間活動と里山林の盛衰の関係やその地域差が明らかにされている（佐々木ほか：2011）また、秋田県目潟の年縞堆積物ではAD1000から現在までのスギ林の変遷が、地域の産業史や林政史などの歴史記

録との関連で議論されるなど（Kitagawa et al.:2016）、気候変動と植生をはじめとする生態系の変動の地域による時間差や人間生活による環境変化の関連が解明されはじめてきている（安田：2016）。今後は、ほぼ同じ時間面の分析結果を任意の空間で比較することにより植生の面的復元やその経時的変化などの研究が一層すすんでいくと思われる。

3.4 他の分析法との連携

以上のような時間・空間的スケールの高精度化とともに古環境の復元内容もより具体的なものが要求されるようになってきており、花粉分析だけでは明らかにすることが難しい事柄については、他の分析手法を同時に適用することが益々重要となっている。従来、植物珪酸体分析は、前述のイネ科栽培植物種の同定のほか、あらゆる部位の珪酸体を対象にササ属とイチゴツナギ亜属の構成比から環境復元を行う研究が主であった（外山：2006、佐瀬ほか：2008aなど）。しかし、近年では花粉分析と植物珪酸体分析を同一堆積物に適用し、後者がササ属の同定に有利かつ局所的植生を反映しやすいことから、分析地点である亜高山帯の植生景観の変遷を詳細に検討した研究や（池田ほか：2016など）（図5）、また、微粒炭分析を併用することより、火入れによる植生の人為的変化や土壌形成の関係を論じた研究などもみられるようになってきている（Sasaki et al.:2004、佐瀬ほか：2008bなど）。さらに、植物珪酸体にはイネ科以外の分類群のものもあり、樹木起源の植物珪酸体の分析も行われている。とくに照葉樹林の重要な構成要素であるクスノキ科は、花粉では検出困難であり、西日本では花粉分析を補完する方法として重要となろう（杉山：1999）。

なお、これまで述べてきた微化石は一般的に、科または属レベルの同定精度にとどまるため、より同定精度の高い木材や種実などの大型植物遺体との連携も不可欠であることは言うまでもない。一般に大型化石は現地性（生活していた場所付近で化石になったもの）が高く、微化石は低いことから、同じ堆積物で両化石を分析することにより、各種群の生育立地まで考察した例もみられるようになってきている（西内ほか：2015）。

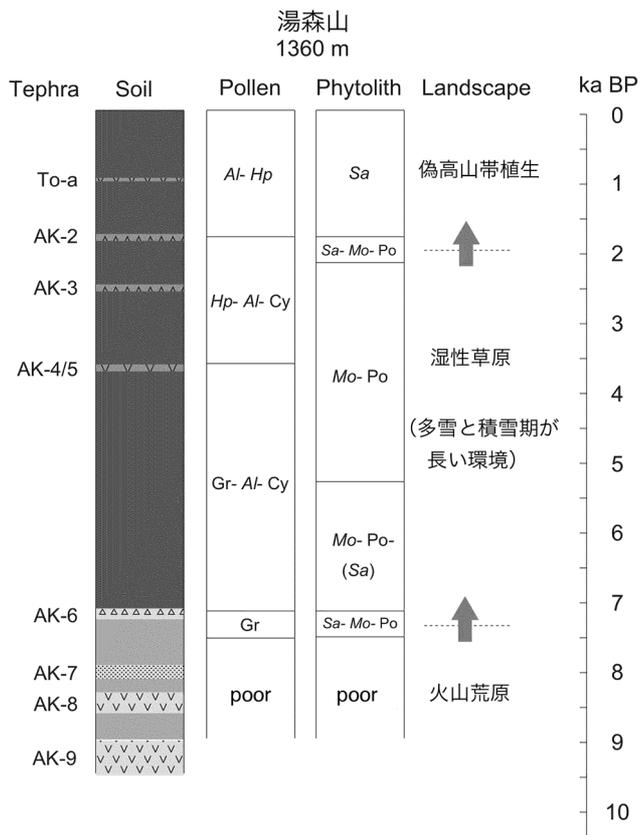


図5 秋田駒ヶ岳地域の湯森山における景観変遷(池田ほか(2016)より)

Fig.5 Landscape history on Mt. Yumori in the Akita Komagatake area based on pollen and phytolith records.

Al : *Alnus* subgen. *Alnaster*, Hp : *Pinus* subgen. *Haploxyylon*,
Cy : Cyperaceae, Gr : Gramineae, Sa : *Sasa*, Mo :
Moliniopsis, Po : Pooideae

4. 今後の研究にむけて

微化石研究の弱点は、ひとつひとつの化石のもつ情報が大型化石のそれに比べ乏しく、種の階級まで同定できる分類群がきわめて限られる点であろう。花粉の場合、高倍率観察が可能な走査型電子顕微鏡(SEM)では種レベルまで区別できるものも稀ではないが、光学顕微鏡(LM)下では、一般的に木本類で属、草本類で科レベルまでにとどまる。しかし、SEM観察では花粉表面しか観察できないことやその利便性から、今日でもLM観察が主役である。そのため、LM下での形態的差異の研究がまだまだ重要である。この方面の近年の成果としてはトドマツ(*Abies sachalinensis*)、ウラジロモミ(*Abies homolepis*)、ウルシ(*Rhus verniciflua*)、アサ(*Cannabis sativa*)の区別の可能性が示されたことであろう(Saito and Tsuchida : 1992, 吉川 : 2006, 吉川・工藤 : 2014)。

なお、ウルシ以外については比較標本数が少なくさらなる研究が待たれる。

一般に生物には変異がつきものであり、花粉の場合、発芽口や花粉壁の構造の違いのような質的相異は変異が小であるのに対し、粒径や表面構造物の密度などの量的変異は変異が大きいため、それぞれの種内変異の中を十分に明らかにしておく必要がある。また、温帯落葉樹のクリ属(*Castanea*)と照葉樹のシイ属(*Castanopsis*)は、環境復元の指標として極めて重要な種群であることから、両者の区別はかねてから注目されてきた。両者はSEM下ではその表面の紋様の違いから区別可能であるが(三好ほか:2011)、LM下では問題がある。すなわち、LMの分解能は光源の波長とレンズの開口数によって決定され、開口数1.3の高性能レンズでも可視光線を使う限りでは0.2 μmより小さくはならない(Bradbury : 1984)。乾燥状態のクリ属とシイ属の花粉外壁の微細なしわ条紋の太さは0.2 μm程度で光学顕微鏡の分解能限界に近い。両者を区別した花粉分析結果では、その根拠を示すことは当然であるが(例えば、松居ほか:2012)、現在までのところLM下での区分に十分な信頼がかけられる根拠を提示したものはない。この方面の基礎的資料のさらなる集積が重要であろう。

吉川(2011)は、クリ林およびその周辺部の表層花粉及び空中花粉採取器による調査に基づき、三内丸山遺跡周辺の縄文時代におけるクリ林の分布状況を推定している。既述のように、ある地域内の植生景観を高精度に復元する場合には花粉の飛来範囲や生産量を把握しておく必要がある。今後、植生景観の復元モデル式が高精度・複雑化するほど、さまざまな分類群について、その花粉生産量、落下速度、飛散距離、化石としての残存率などのタフオノミーに関連する基礎的データの集積が重要となってくるのは言うまでもない。また、最近では忘れがちであるが、指標種や標徴種に関する研究も重要である。例えば、畑地雑草群落の標徴種であり史前帰化植物でもあるスベリヒユ(*Portulaca oleracea*)は花粉形態的にも識別容易なのでもっと注目されてよいであろう。

微粒炭の最近の研究動向は、小椋(2007)、井上(2007)によってまとめられており、前者では微粒炭の形態から燃焼した植物の同定の可能性が、後者では100 μm以下

のサイズの micro-charcoal とそれ以上の macro-charcoal の散布特性の違いを利用することにより調査地近隣での火災の復元の可能性が示されている。また、植物珪酸体については、近藤（2010）により極めて詳細にまとめられているので、是非ともそちらを参照されたい。なお、これらの研究分野でも形態やタフノミーなどの基礎的研究の重要性が指摘されている。

5. おわりに

時間・空間スケールの高精度化とともに、以前であれば500年間で1個当たりの試料採取間隔が、現在では50年間隔も稀ではなく、また、同一時間面での平面的な試料採取も日常的になってきている。実行すべき花粉分析の試料数が増大しているほか、1試料当たりの計測花粉数も高精度化に見合った統計的信頼がえられるよう増や

す必要がある。そのため、研究の長期化をまねいたり、他分野との共同研究では花粉分析研究者の奪い合いなどの様々な問題を生み出している。複数の花粉分析研究者による分担分析では、同定精度が維持できるかの問題があり、結局、輸送船団の船足のごとく、最低のレベルに合わせざるを得なくなることも稀ではない。パターン認識技術を応用した同定作業の自動化の研究も進んでいるが（Marcos et al.: 2015 など）、実用化にはしばらく時間がかかるものと思われる。当面は、同一の地点は同じ者が担当できるよう花粉分析従事者の養成・増員とあわせ、担当者個人の同定作業の効率化が必要である。そのためには、各研究者が蓄積している同定・分析技術や分析結果をデータベース化し、それらを積極的に公開することが強く望まれる（松下：2004、守田：2012）。

引用文献

- 藤 則雄 1968 「福井市南西部の東大寺領道守庄旧耕土の花粉学的研究」 第四紀研究 7 pp.75-100
- 藤原宏志 1976 「プラント オパール分析法の基礎的研究（1）—数種イネ科植物の珪酸体標本と定量分析法」 考古学と自然科学 9 pp.15-29
- 五反田克也 2004 「バイオーム考古学」安田喜憲（編）『環境考古学ハンドブック』朝倉書店 pp.205-215
- 五反田克也・福澤仁之 2006 「バイオマイゼーション（Biomization）法を用いた日本列島の過去2万年間のバイオーム分布復元—（I）九州—」 地学雑誌 115 pp.125-135
- 堀 正一 1952 「加茂遺跡泥炭層の花分析について」『加茂遺跡—千葉県加茂独木舟出土遺跡の研究』三田史学会 pp.131-134
- 池田重人・佐瀬 隆・細野 衛・高橋利彦 2016 「完新世露頭試料の花分析組成と植物珪酸体組成から推定した奥羽山脈湯森山における偽高山帯の植生史」 植生史研究 24 pp.3-17
- 井上 淳 2007 「火災史を考える上での macro-charcoal 研究の重要性と分析方法—日本の火災史研究におけるその役割—」 植生史研究 15 pp.77-84
- 菅野一野・有村玄洋 1958 「土壌中の植物性蛋白石（Plant opal）について」 ペドロジスト 2 pp.78-80
- 加藤芳朗 1958 「「黒ボク」土壌中の Plant opal について」 ペドロジスト 2 pp.73-77
- 近藤錬三 2010 『プラント・オパール図譜—走査型電子顕微鏡による植物ケイ酸体学入門』北海道大学出版会 400p
- 黒崎 直・松井 章・金原正明 1992 「化学的に解明された古代宮都のトイレ」 月刊文化財 11月号 pp.17-25
- 三好教夫・藤木利之・木村裕子 2011 『日本産花粉図鑑』北海道大学出版会 852p
- 松居俊典・石塚正秀・此松昌彦 2012 「香川県綾川町のボーリングコアの花分析による最終氷期以降の古植生」 第四紀研究 51 pp.35-43
- 松下まり子 2004 『花粉分析と考古学』同成社 135p

- 守田益宗 2012 「花粉分析と顕微鏡：作業の効率化をめざして」 植生史研究 21 pp.73-84
- 中川 毅 2004 「花粉分析による定量的環境復元と考古学」安田喜憲（編）『環境考古学ハンドブック』朝倉書店 pp.216-236
- 中川 毅 2008 「Plugon 1.5 ユーザーマニュアル（モダンアナログ方を用いて過去の気候を定量的に復元するために開発されたユーザーフレンドリーなソフトウェア）」 第四紀研究 47 pp.355-374
- 中川 毅 2015 『時を刻む湖－7万枚の地層に挑んだ科学者たち』岩波書店 128p
- 中村 純 1974 「イネ科花粉について、とくにイネ (*Oryza sativa*) を中心として」 第四紀研究 13 pp.187-198
- 中村俊夫 2001 「放射性炭素年代とその高精度化」 第四紀研究 40 pp.445-459
- 西内李佳・百原 新・遠藤邦彦・大里重人・沖津 進 2015 「最終表最寒冷期末期の北関東丘陵域における古植生分布—宇都宮市中里の植物化石群の復元から—」 第四紀研究 54 pp.185-201
- 沼田大學 1928 「森林の変遷を知るに花粉分析法を用ふること」 林学会雑誌 10 pp.511-514
- 小椋純一 2007 「微粒炭の母材植物特定に関する研究」 植生史研究 15 pp.85-95
- 齋藤英樹 2012 『森林の花粉生産と種子繁殖への乾物投資—物質生産と有性生殖に関する研究と資料—』伊藤印刷(株)出版部 286p
- 佐々木尚子・高原 光・湯本貴和 2011 「堆積物中の花粉組成からみた京都盆地周辺における「里山」林の成立過程」 地球環境 16 pp.115-127
- 佐瀬 隆・町田 洋・細野 衛 2008a 「相模原台地，大磯丘陵，富士山東麓の立川-武蔵野ローム層に記録された植物珪酸体群集変動—酸素同位体ステージ 5.1 以降の植生・気候・土壌史の解説—」 第四紀研究 47 pp.1-14
- 佐瀬 隆・細野 衛・高地セリア好美 2008b 「三内丸山遺跡の土壌生成履歴—植生環境，人の活動および黒ボク土層の関係—」 植生史研究 16 pp.37-47
- 渋谷綾子 2012 「鹿児島県水迫遺跡出土石器の残存デンプン粒と縄文時代草創期・早期における植物利用」 植生史研究 21 pp.55-66
- 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 pp.109-102
- 高原 光 2006 「花粉分析による植生復元と気候復元」 低温科学 65 pp.97-102
- 外山秀一 2006 『遺跡の環境復元』古今書院 348p
- 山野井徹 1996 「黒土の成因に関する地質学的検討」 地質学雑誌 102 pp.526-544
- 安田喜憲 2016 『環境文明論』論創社 647p
- 安田喜憲（編）2004 『環境考古学ハンドブック』朝倉書店 706p
- 吉川昌伸 2006 「ウルシ花粉の同定と青森県における縄文時代前期頃の産状」 植生史研究 14 pp.15-27
- 吉川昌伸 2011 「クリ花粉の散布と三内丸山遺跡周辺における縄文時代のクリ林の分布状況」 植生史研究 18 pp.65-76
- 吉川昌伸・工藤雄一郎 2014 「アサ花粉の同定とその散布」 国立歴史民俗博物館研究報告 187 pp.441-456
- Berglund, B. E. (ed.) 1986 "Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology" John Wiley & Sons 869p
- Bradbury, S. 1984 "An introduction to the optical microscope" Oxford University Press 85p
- Delcourt, H. R. and Delcourt, P. A. 1988 "Quaternary landscape ecology; Relevant scales in space and time"

- Landscape Ecology 2 pp.23-44
- Gotanda, K. and Yasuda, Y. 2008 "Spatial biome changes in southwestern Japan since the Last Glacial Maximum" *Quaternary International* 184 pp.84-93
- Hutson, W.H. 1979 "The Agulhas Current during the Late Pleistocene: Analysis of modern faunal analogs" *Science* 207 pp.64-66
- Jacobson, G. L., Jr. and Bradshaw, R. H. W. 1981 "The selection of sites for palaeovegetational studies" *Quaternary Research* 16 pp.80-96
- Janssen, C.R. 1981 "On the reconstruction of past vegetation by pollen analysis: a review." IV International Palynological Conference, Lucknow (1976-77) 3 pp.163-172
- Kitagawa, J., Morita, Y., Makohonienko, M., Gotanda, K., Yamada, K., Yonenobu, H., Kitaba, I. and Yasuda, Y. 2016 "Understanding the human impact on Akita-sugi cedar (*Cryptomeria japonica*) forest in the late Holocene through pollen analysis of annually laminated sediments from Ichi-no-Megata, Akita, Japan" *Veget Hist Archaeobot* DOI 10.1007/s00334-016-0570-2
- Nakagawa, T., Tarasov, P.E., Nishida, K., Gotanda, K. and Yasuda, Y. 2002 "Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Japan : Application to surface and Late Quaternary spectra" *Quaternary Science Reviews* 21 pp.2099-2113
- Nakagawa, T., Okuda, M., Yonenobu, H., Miyoshi, N., Fujiki, T., Gotanda, K., Tarasov, P. E., Morita, Y., Takemura, K. and Horie, S. 2008 "Regulation of the monsoon climate by two different orbital rhythms and forcing mechanisms" *Geology* 36 pp.491-494
- Overpeck, J.T., Webb, T., III and Prentice, I.C. 1985 "Quantitative interpretation of fossil pollen spectra: Dissimilarity Coefficients and the method of modern analogs" *Quaternary Research* 23 pp.87-108
- Prentice, I. C. 1985 "Pollen representation, source area, and basin size: Toward a unified theory of pollen analysis" *Quaternary Research* 23 pp.76-86
- Prentice, I. C. 1988 "Records of vegetation in time and space: the principles of pollen analysis" In: Huntley, B. and Webb, T., III (eds.) "Vegetation history" Kluwer Academic Publishers pp.17-42
- Prentice, I.C., W. Cramer, S.P. Harrison, R. Leemans, R.A. Monserud, and A.M. Solomon 1992 "A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate" *Journal of Biogeography*, 19 pp.117-134
- Prentice, I.C., Guiot, J., Huntley, B., Jolly, D. and Cheddadi, R. 1996 "Reconstructing biomes from palaeoecological data: A general method and its application to European pollen data at 0 and 6 ka" *Climate Dynamics* 12 pp.185-194
- Marcos, J. V., Nava, R., Cristóbal, G., Redondo, R., Escalante-Ramírez, B., Bueno, G., Déniz, Ó., González-Porto, A., Pardo, C., Chung, F. and Rodríguez, T. 2015 "Automated pollen identification using microscopic imaging and texture analysis" *Micron* 68 pp.36-46
- Saito, T. and Tsuchida, K. 1992 "Pollen morphology of the genus *Abies* in Japan" *Japanese Journal of Palynology* 38 pp.158-171
- Sasaki, N., Kawano, T., Takahara, H. and Sugita S. 2004 "Phytolith evidence for the 700-year history of a dwarf-bamboo community in the sub-alpine zone of Mt. Kamegamori, Shikoku Island, Japan" *Japanese Journal of historical Botany* 13 pp.35-40

- Sugita, S. 1993 "A model of pollen source area for an entire lake surface" *Quaternary Research* 39 pp.239-244
- Sugita, S. 1994 "Pollen representation of vegetation in Quaternary sediments: Theory and method in patchy vegetation" *Journal of Ecology* 82 pp.881-897
- Sugita, S. 2007a "Theory of quantitative reconstruction of vegetation I: pollen from large sites REVEALS regional vegetation composition" *Holocene* 17 pp.229-242
- Sugita, S. 2007b "Theory of quantitative reconstruction of vegetation II: all you need is LOVE" *Holocene* 17 pp.243-258
- Takahara, H., Sugita, S., Harrison, S. P., Miyoshi, N., Morita, Y. and Uchiyama, T. 2000 "Pollen-based reconstructions of Japanese biomes at 0, 6000 and 18000 yr BP" *Journal of Biogeography* 27 pp.665-683
(2016年7月25日受付, 2017年3月31日受理)

Recent progress in environmental archaeology through microfossil-based paleoenvironmental reconstruction and pollen analysis

Yoshimune MORITA¹⁾

¹⁾ Okayama University of Science, 1-1 Ridai-cho, Kita Ward, Okayama 700-0005, Japan

This article reviews recent methodological advances in pollen analysis when reconstructing paleoenvironmental variation. Natural phenomena have distinct temporal and spatial scales, which exhibit close inter-connections revealed through environmental change research. Recently, theoretical and empirical research on these respective scales has been greatly facilitated by simulations and multivariate analyses. The numerical model proposed by Sugita can estimate the spatial area of vegetation associated with pollen record data. The biomization method developed by Prentice et al. reconstructs biomes according to plant functional types and their characteristic roles from the pollen record. Nakagawa's modern analog technique is a computer procedure that reconstructs past climate patterns based on the similarity between past pollen data and current climate-pollen analyses. Other microfossil analyses such as those using phytoliths and charcoal are now important methods for reconstructing paleoenvironmental change from high-resolution pollen records. With these more detailed analytical methods, basic morphological and taphonomic characteristics such as production, transport, and deposition are becoming increasingly important.