

小椋純一<sup>1</sup>: 微粒炭の母材植物特定に関する研究Jun-ichi Ogura<sup>1</sup>: A study on the identification of original plants of minute charcoal fragments

**要旨** 過去の植生や、それに対する人為などによる火の影響を知る上で、泥炭や土壌に含まれる微粒炭は重要な手がかりになると考えられる。ここでは、はじめに微粒炭の母材植物に関する筆者のこれまでの研究の概要についてまとめた。まず、微粒炭の長軸と短軸の比に着目した先行研究を受け、日本国内に自生する植物20種あまりの微粒炭の長短軸比についての考察を行った。その結果、日本においても微粒炭の長短軸比は、燃えた植生のタイプを考える上で参考になると考えられるが、例外的な値を示す植物がいくつか確認できることから、微粒炭の長短軸比から燃えた植生タイプを推定するには、より慎重である必要があると考えられる。一方、土壌などから見つかる微粒炭の表面形態を観察すると、実験的に燃焼させて生成した微粒炭標本では見られないタイプのものがある一方、標本では時々見られる気孔などの特徴的な組織がほとんど見られないことが多い。数種の草本類と木本植物を対象として、温度条件の違いにより微粒炭の形態がどのように変化するかを調べてみた結果、同じ植物種でも、燃焼温度の違いにより、一般に生成される微粒炭の形態タイプの割合は変化すること、燃焼温度の違いによる微粒炭の形態タイプの割合変化のパターンは、植物種により異なることが確認された。微粒炭分析にはまだ課題も多いが、いくつかの応用的研究例から、出現する微粒炭を総合的に検討することにより、微粒炭の母材植物、またその集合としての植生を、何らかのレベルで明らかにすることができる場合が少なくないものと考えられる。その際、どの程度のレベルで明らかにすることができるかどうかは、元の植生の組成の単純さや複雑さなどによる。また、花粉分析などの古植生に関する成果があれば、それは大いに参考になる。

**キーワード**: 形態, 長短軸比, 燃焼温度, 微粒炭, 母材植物

**Abstract** Here I summarized my researches on the original plants of minute charcoal fragments. The length-width ratio of minute charcoal fragments of more than twenty plant species native in Japan showed that the length-width ratio of charcoal fragments, although useful in several cases should be applied more carefully to identify burnt plants and vegetation types in Japan, because some woody and herbal plants have exceptional length-width ratios of charcoal fragments. Changes in the morphology of minute charcoal fragments by different combustion temperatures were studied on several woody and herbal species. Some types of charcoal fragments generated experimentally were hardly seen in the charcoal fragments extracted from the sediments, while some types that were not in the experimentally generated charcoal fragments were seen in the sediments. The study indicated that the ratio of the types of charcoal fragments in a species changes according to the combustion temperature and that the change in the ratio is different among species. According to some applying studies, original plants of minute charcoal fragments and vegetation as a set of plants can be clarified to a certain degree in many cases, although there are many problems to be dealt with in the minute charcoal analysis. The level to be clarified depends on the simplicity or the complexity of the composition of the original vegetation. If there are other analyses on the past vegetation such as pollen analysis, they serve as good references.

**Key words**: combustion temperature, length-width ratio, minute charcoal fragments, morphology, original plants

## 1. はじめに

過去の植生や、それに対する人為などによる火の影響を知る上で、泥炭や土壌に含まれる微粒炭は重要な手がかりになると考えられる。また、微粒炭をもとにした植生史の研究は、他の研究手法よりも有利な点もある。たとえば大型植物遺体による研究では、その産出層準が限られるのが

一般的で、時間経過の中での変化を追うのが難しい。また、花粉分析では、花粉が泥炭のように水分を多く含んだ堆積物中には残りやすいが、一般の地層中には残りにくいなどの問題がある。その点、微粒炭は、とくに完新世の地層中には普遍的かつ連続的に産出する場合が多く、従来の分析方法では得られない植生情報が得られる可能性がある。

<sup>1</sup> 〒606-8588 京都市左京区岩倉木野町137 京都精華大学人文学部 (e-mail: j-ogura@kyoto-seika.ac.jp)

Faculty of Humanities, Kyoto Seika University, 137 Kino-cho, Iwakura, Sakyo-ku, Kyoto 606-8588, Japan

微粒炭の研究において、その量的変化を把握することは、それぞれの場所や地域の植生に対する過去の火の影響度などを考える上で重要であることはもちろんであるが、その一方で、微粒炭の母材植物が明らかになれば、具体的な過去の植生を明らかにする上で貴重な情報となる。炭の母材植物を明らかにする試みの歴史は古く、粉末状となった炭の母材に関する研究も80年以上前に遡る(Tanner, 1925)。それは活性炭に関する研究であったが、その後の活性炭などについての研究でも、木本微粒炭の母材種を明らかにすることが可能とされ、その考古学的応用が期待されているものもある(Paulssen, 1964)。しかし、微粒炭の母材植物の識別については、その後もそれが容易に行われているという状況ではない。

そのような状況の中、1990年代の中頃から後半にかけて、日本の国内外において、微粒炭の形状と母材植物との相関について述べられた論文で注目されるものがあった(山野井, 1996; Umbanhowar & McGrath, 1998)。そのうち、Umbanhowar と McGrath による研究は、微粒炭の長短軸比に注目したもので、イネ科草本植物と木本植物などではその値が大きく異なり、湖底堆積物などに含まれる微粒炭の長短軸を調べることにより、微粒炭の元となった植生タイプ(たとえば、イネ科草原、森林など)がわかる可能性があるというものである。ただ、その研究では、調査の対象となった植物が日本の自生種ではなく、また対象とされた種数が限られるため、日本国内での微粒炭に関する研究のためには、日本に自生する植物を使った独自の検証研究が必要である。

泥炭などに含まれる微粒炭の母材植物が明らかになれば、その産出量などから過去の植生をより明らかにすることにつながると考えられるため、筆者はその検証研究を手始めに、微粒炭の母材植物に関する基礎的研究や応用研究を細々とではあるが続けてきた。ここでは、関連する国内外の研究についても触れつつ、これまでの微粒炭に関する筆者の研究の概要を述べ、また今後の微粒炭研究の展望について考えてみたい。

なお、国内外の研究において、微粒炭は一般的には長さが1 mmにも満たない微小な炭化片をさし、また近年では、そのサイズによりミクロ(microscopic charcoal)とマクロ(macrosopic charcoal)に分けられることが多い。しかし、仮に堆積物中から長さが1 mmよりも大きな微小炭化片が出てきた場合、それも過去の植生を復元する上で重要な意味を持つ可能性がある。そのため、微粒炭の母材植物の特定から過去の植生復元などを目的とする本研究において、検討した微粒炭は一般的なマクロサイズのものであるが、最大の微粒炭の大きさを必ずしも厳密に定義して進めるものではない。

## 2. 微粒炭の長短軸比と母材植物について

### 1) 日本国内に自生する植物の微粒炭の長短軸比についての予備的考察

微粒炭の形態の中で、長軸と短軸の比に着目した Umbanhowar と McGrath の研究(1998)を受け、小椋(1999)は日本国内に自生する植物の微粒炭の長短軸比について検討した。日本国内に自生する針葉樹5種、広葉樹6種、草本類7種(ササ2種とワラビを含む)を母材植物として選び、針葉樹については枝(先端部付近の太さ12 mmまでのもの)と葉、広葉樹については枝(先端部付近の太さ12 mmまでのもの)、草本類については地上部全体を試料とした。

試料は約20°Cの室内で数週間乾燥させた後、燃焼させ、残った炭と灰を指で軽く圧力を加えて粉状にし、それに10%の塩酸を加え10~15分置いた後、500 μmと250 μmと125 μmのメッシュの篩を重ねて篩い、125 μmのメッシュの篩に残ったもの(125-250 μmクラス)について主に調べた。主に125-250 μmクラスの微粒炭について調べたのは、土壌などのフィールド試料から抽出される長さが100 μmに満たないような小さな微粒炭は、その発生場所(火が燃えた所)が近くか遠くかわからないのに対し、長さが約125 μm以上の微粒炭は、その発生場所が比較的近いところにあると考えられること(Clark, 1988)、また応用研究においても主としてそのクラスの微粒炭を研究することになると予測されるためである。

微粒炭の長軸(長さ)と短軸(幅)の長さをマイクロメーターで測定し、長軸と短軸の比(長短軸比:長軸/短軸)を求めた。微粒炭の長短軸比は、小さいもので1.9、大きいもので8.5と、植物や組織により大きな違いが見られた(表1)。イネ科草本と樹木の微粒炭の長短軸比は、アメリカでの先行研究(Umbanhowar & McGrath, 1998)の結果と比較的近く、イネ科草本の微粒炭の長短軸比は樹木の微粒炭のそれに比べると、概して明らかに大きい。イネ科のススキとシバとネザサの微粒炭の長短軸比が、他の草本類や樹木のものよりも顕著に大きく、中でもシバとススキの微粒炭の長短軸比は、8.5(シバ)と7.4(ススキ)で、樹木の葉や枝の微粒炭の平均値よりも約3倍大きい数字であった。しかし、同じイネ科の草本でも、シバとススキとヨシでは、その値にはつきりとした差があり、特にヨシは他の2種に比べると小さい値となっている。また、同じイネ科の植物であるネザサとチシマザサの2種類のササについても、微粒炭の長短軸比の値が大きく異なり、ネザサの平均値が5.9であるのに対しチシマザサの平均値は2.7であった。なお、草本類全般を見ると、シバやススキのように、微粒炭の長短軸比が顕著に大きいものから、ヨモギやチシマザサのように樹木の葉や枝と変わらないものまで、植物

表1 植物の微粒炭長短軸比 (125–250 μm クラス; 小椋, 1999 を改変)

Table 1 Length-width ratio of minute charcoal fragments (125–250 μm class; modified from Ogura, 1999)

植物	測定数	長軸平均 (μm)	短軸平均 (μm)	長短軸比 (平均)
アカマツ・葉	400	362	161	2.9
スギ・葉	400	277	140	2.4
モミ・葉	200	322	143	3.6
ツガ・葉	200	334	184	2.0
ヒノキ・葉	200	220	130	2.0
針葉樹葉平均		303	152	2.6
アカマツ・枝	200	320	171	2.1
スギ・枝	200	346	149	3.4
モミ・枝	200	220	97	2.9
ツガ・枝	200	355	176	2.3
ヒノキ・枝	200	332	164	2.4
針葉樹枝平均		315	151	2.6
ブナ・枝	200	303	174	1.9
ミズナラ・枝	200	312	175	1.9
アラカシ・枝	200	306	143	2.4
トチノキ・枝	200	311	162	2.2
リョウブ・枝	200	306	124	3.0
コナラ・枝	209	596	194	3.9
広葉樹枝平均		356	162	2.5
シバ	200	323	59	8.5
ススキ	200	360	80	7.4
ヨシ	200	365	125	4.7
ヨモギ	200	243	112	2.5
ワラビ	200	299	105	4.1
ネザサ	200	370	114	5.9
チシマザサ	200	350	151	2.7
チシマザサ・葉	200	254	116	2.6
チシマザサ・幹	200	339	138	3.0

表中の植物の学名 (命名者省略): アカマツ: *Pinus densiflora*, スギ: *Cryptomeria japonica*, モミ: *Abies firma*, ツガ: *Tsuga sieboldii*, ヒノキ: *Chamaecyparis obtusa*, ブナ: *Fagus crenata*, ミズナラ: *Quercus mongolica* var. *grosseserrata*, アラカシ: *Quercus glauca*, トチノキ: *Aesculus turbinata*, リョウブ: *Clethra barbinervis*, コナラ: *Quercus serrata*, シバ: *Zoysia japonica*, ススキ: *Miscanthus sinensis*, ヨシ: *Phragmites communis*, ヨモギ: *Artemisia princeps*, ワラビ: *Pteridium aquilium* var. *latiusculum*, ネザサ: *Pleioblastus argenteostriatus* f. *glaber*, チシマザサ: *Sasa kurilensis*.

によって大きな差があった。

一方, 針葉樹5種の葉と枝, また広葉樹6種の枝を母材とした微粒炭の長短軸比は, 針葉樹と広葉樹の葉や枝ごとにまとめると, その平均値は2.5~2.6であり, 互いにほとんど変わらない結果となった。ただ, コナラの枝 (長短軸比: 3.9) やモミの葉 (長短軸比: 3.6) のように, 樹種の部位によっては一般的な樹木よりも微粒炭の長短軸比がかなり大きいものもあり, 樹種の部位によっては, 最大で約2倍の違いが見られた。

図1は, 125–250 μm クラスの微粒炭について, 針葉樹

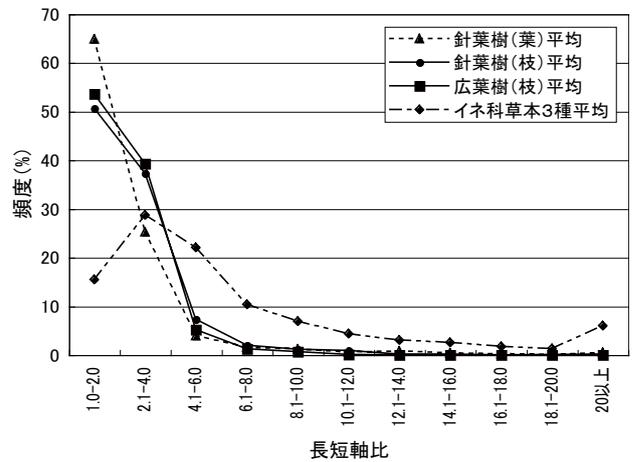


図1 植物の組織ごとにみた平均的微粒炭長短軸比の頻度分布 (125–250 μm クラス; 小椋, 1999 を改変).

Fig. 1 Distribution of length-width ratio of minute charcoal fragments in conifer leaves/needles, conifer twigs, dicot twigs, and Gramineaceous herbs (125–250 μm class; modified from Ogura, 1999)

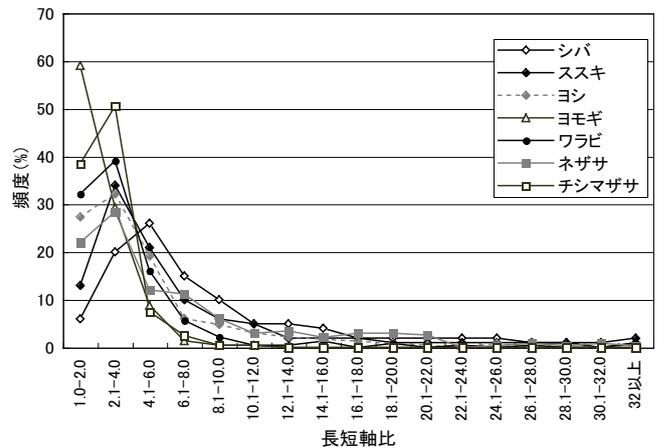


図2 草本7種の微粒炭長短軸比の頻度分布 (125–250 μm クラス; 小椋, 1999 を改変).

Fig. 2 Distribution of length-width ratio of minute charcoal fragments in seven herbal species (125–250 μm class; modified from Ogura, 1999).

の葉と枝, 広葉樹の枝, イネ科草本3種 (ススキ, シバ, ヨシ) について, 微粒炭長短軸比のそれぞれの平均的な頻度分布を示したものである。一方, 観察したすべての植物種ごとに, 微粒炭の長短軸比の頻度分布も見た。そのうち針葉樹の葉については, 微粒炭長短軸比の頻度分布は, すべての種で似た形となったが, 針葉樹と広葉樹の枝では, 種によっていくつかのパターンが見られた。また, 草本類については, 微粒炭の長短軸比の大きなばらつきを反映して, 種によってグラフの形は大きく異なるものとなった (図2)。

なお, 微粒炭の大きさによる長短軸比とその頻度分布

については、ススキとシバの0–125  $\mu\text{m}$  クラス、125–250  $\mu\text{m}$  クラス、250–500  $\mu\text{m}$  クラスの3種類で見た限りでは、微粒炭の大きさの違いによるはっきりとした違いは見られなかった。

以上の結果から、日本においても、微粒炭の長短軸比は燃えた植生のタイプを考える上で参考になる場合が多い可能性はあると考えられる。分類群により微粒炭の長短軸比が異なる傾向があるのは、それぞれの細胞の形状や炭化した際の物理的特性の違いなどによるものであろう。しかし、微粒炭の長短軸比が比較的小さいものが多い樹木でも、コナラの枝やモミの葉のようにやや大きな値を示すものもある。また、その一方でチシマザサのように、草本にも分類されるイネ科植物でも、その値が比較的小さいものもある。あるいは、草本にはヨモギのように、その値が木本植物と同程度のもも見られる。そうしたことから、微粒炭の長短軸比だけで燃えた植生のタイプを常に正しく判断することは難しいと考えられる。今後、調べる植物の種数を増やすなど、さらに検証研究を進めてゆく必要があると考えられる。

## 2) 樹木の幹枝の太さ、組織の相違による微粒炭の長短軸比の違いについて

先の予備的考察に関連して、微粒炭を落射光で観察したところ、樹木の幹枝は材と樹皮ではその組織が大きく異なるため、それらを分けて微粒炭の長短軸比を調べる必要があると思われた。また、幹枝の太さにより、異なる樹皮の組織が現れる例が見られた。そのため、日本国内に自生する木本植物数種の幹枝の太さ、また材と樹皮との組織の相違による微粒炭の長短軸比の違いについて調べてみた(小椋, 2000)。

微粒炭の母材植物として、日本国内に自生する針葉樹として、モミとスギ、広葉樹としてコナラとリョウブを選んだ。モミとスギは、天然林にも存在する日本の代表的な針葉樹の例として、またコナラとリョウブは、古くから人が利用してきた里山の広葉樹の例として選んだ。それぞれの樹木について、太さの異なる幹枝の部分をいくつか円盤状または円柱状に切り、それぞれを樹皮と材に分けて試料とした。ただし、リョウブについては、樹皮が薄く、また樹皮と材をうまく分離することが難しかったために、試料は材の部分のみとした。

試料とした樹木の幹枝の直径は18–2 cmの太さのものである(表2)。また、それぞれの樹種のNo. 1–No. 3の試料の大部分は、樹種ごとに同じ個体から採ったものである。それらの試料は、室内で約2ヶ月乾燥させた後、燃焼させ、残った炭や炭化材を指で適度に圧力を加えてつぶし、125  $\mu\text{m}$  のメッシュの篩に残ったもの(125–250  $\mu\text{m}$

表2 試料とした幹枝の直径と年輪数(小椋, 2000)

Table 2 Diameters and annual ring numbers of sample branches/trunks (Ogura, 2000)

樹種	No.	1	2	3
モミ		18 cm/42	10 cm/21	2 cm/16
スギ		10 cm/15	7 cm/ 9	2 cm/ 3
コナラ (1)		11 cm/34	4 cm/14	2 cm/11
コナラ (2)		13 cm/26	5 cm/18	2 cm/ 8
リョウブ		8 cm/29	4 cm/26	2 cm/24

表3 表2の各試料の微粒炭の長短軸比(125–250  $\mu\text{m}$  クラスの平均値;小椋, 2000を改変)

Table 3 Length-width ratio of minute charcoal fragments of the samples in Table (average values in 125–250  $\mu\text{m}$  class; modified from Ogura, 2000)

樹種	No.	1	2	3
モミ・材		4.3	3.4	4.0
モミ・樹皮		1.9	2.0	1.8
スギ・材		3.3	2.7	3.5
スギ・樹皮		5.9	7.4	3.3
コナラ (1)・材		3.0	2.8	2.1
コナラ (2)・材		2.6	2.6	3.3
コナラ (1)・樹皮		2.2	1.6	2.0
リョウブ・材		4.4	4.2	3.9

クラス)についてプレパラートを作成した。

微粒炭の長短軸比については、透過光による顕微鏡画像を、パソコンの分析ソフト(Scion Image)を用いて測定した。その測定数は、それぞれ200とした。

微粒炭の長短軸比は、樹種の組織にかかわらず、幹枝の太さが変わっても、さほど大きく変わらないものの割合が多かった(表3)。しかし、スギの樹皮(長短軸比:3.3–7.4)は、幹枝の太さによってその比が大きく異なった。その結果から、微粒炭の長短軸比は、もとの樹木の幹枝の太さによって、同じ樹種でも大きく異なる場合があることがわかる。

なお、スギの樹皮の微粒炭長短軸比が幹枝の太さによって異なる原因については、幹枝がやや太くなると、細長い微粒炭ができる樹皮組織の割合が多くなるためと考えられる。このことについては、上記試料とは別の直径32 cm、年輪数44のスギの樹皮を母材とした微粒炭の観察においても、やはり細長いものが多くできることを確認した。なお、同じ針葉樹でスギと対比されることも多いヒノキ(直径28 cm、年輪数41)の樹皮の微粒炭についても同様の観察を行ったが、ヒノキの樹皮の場合には、幹枝の太さにかかわらず細長い微粒炭は見られなかった。

一方、リョウブの材の微粒炭の長短軸比は、3.9–4.4とやや大きな値であった。また、上記の予備的考察では、

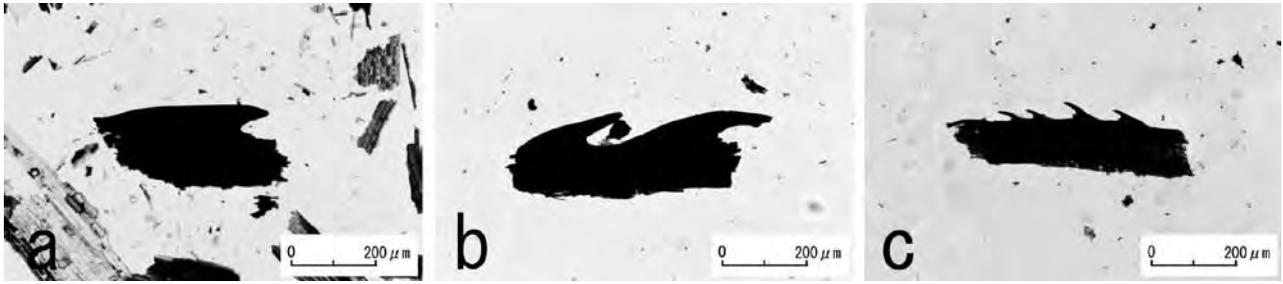


図3 透過光による顕微鏡観察で見える特徴的微粒炭の例 (a: ススキ, b: ヨシ, c: シバ ; 小椋, 1999 を改変). aの微粒炭のトゲ状突起は, 先端部の角度がやや大きく, 短く太い形となっている. それに対し, bとcのトゲ状突起の先端部の角度はaよりも小さくやや長細い形となっているが, bとcの大きさは全く異なり, cに見られるトゲ状突起はbに見られるものの3分の1程度の大きさしかない. また, トゲ状突起の開出角度, またその曲がり方にもそれぞれ特徴が見られる. このように, 種によっては特徴的なトゲの形態を持つ可能性があり, 多くの種についてこのようなデータがそろえば, 種や特定の分類群の同定につながる可能性がある.

Fig. 3 Examples of minute charcoal fragments with characteristic features seen under the transmitting illumination (a: *Miscanthus sinensis*, b: *Phragmites communis*, c: *Zoysia japonica*; modified from Ogura, 1999).

コナラの枝の微粒炭の長短軸比は3.9とやや大きな値であったが, 後の研究では, コナラの材や樹皮の長短軸比はそれほど大きくない結果(2.1~3.3)となっているなど, 微粒炭の長短軸比は何らかの条件によりやや大きな誤差が出る場合があると考えられる。

このように, 木本植物の微粒炭にも, やや大きい長短軸比を示すものがある。また, 微粒炭の生成条件により長短軸比がやや大きく変わる可能性がある。その生成条件は不明であり, 少なくとも日本においては, 微粒炭の長短軸比から燃えた植生タイプを推定するには, より慎重である必要があるものと考えられる。

### 3. 透過光および落射光による微粒炭の形態観察による母材植物識別

微粒炭の長短軸比を調べるために, 微粒炭を一つずつ見ていると, 微粒炭の中にはその母材植物を示す特徴的なものがあることがわかる。はじめにも記したように, それに関する研究は決して新しいものではないが, 微粒炭の母材植物の識別はまだ一般的なものではないため, 微粒炭の形態からどの程度母材植物がわかるものか, 植物を燃焼させて生成した試料や, 実際に泥炭中などに含まれる微粒炭から検討した(小椋, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003a, 2003b, 2004; 小椋ほか, 2002)。

#### 1) 透過光による微粒炭の形態観察による母材植物識別

微粒炭から母材植物を知ることは, 花粉分析のように容易ではない。それは, 微粒炭の形態は花粉のように植物の分類群と基本的に1対1で対応するような関係ではないためである。しかし, 透過光による顕微鏡観察でも, 微粒炭

から母材植物を知る手がかりを見つけることができる場合がある。

そうした手がかりとしては, 微粒炭の輪郭の形や, 微粒炭上のトゲ状突起や毛の形や大きさ, 気孔の形や大きさや配列, 気孔を除く孔の形や大きさ, 微粒炭の厚さなどがあ

る(図3)。  
なお, 透過光で見た場合, 微粒炭上のトゲ状突起や毛は存在していても常にそれが観察できるわけではない。観察できるのは, それが端に横向きに付いているような場合に限られる。また, 微粒炭の厚さも, 透過光ではそれがかなり薄い場合には, そのことがわかるという程度である。あるいは, 気孔などが見えるのも, 透過光では微粒炭が薄い場合に限られる。

#### 2) 落射光による微粒炭の形態等観察による母材植物識別

実験的に野外で植物を燃焼させることにより生成した微粒炭を上方からライトを当ててその表面を顕微鏡で見ると, 光の反射の様子から草本類の微粒炭は樹木のそれに比べて光の反射が少ないものが多いことが比較的倍率でもわかる。微粒炭の反射率は, 炭化時の温度に関係し, 高温で炭化すると反射率が高くなるとする報告(例えば Jones et al., 1991)もあるが, 後述のように草本植物をいくつかの温度設定で燃焼させてみても, 草本植物の場合はススキなどのように, 高温で炭化しても反射率がさほど変化しないものが少なくない。

また, 落射光により微粒炭の表面の形態を観察することにより, その母材植物に関する手掛かりをより多く得ることができる。その場合, 200倍程度よりも400倍程度以上

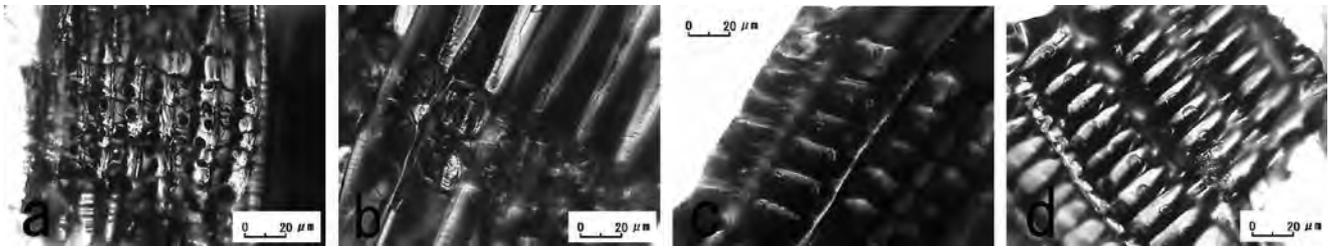


図4 種の特定も可能な微粒炭の例 (a: カヤ, b: アカマツ, c: モミ, d: スギ ; 小椋, 2000 を改変). 針葉樹の分野壁孔が見える微粒炭の例であるが, このような分野壁孔は, 針葉樹起源の微粒炭には割合は小さいもののある程度含まれる. それに基づく種や分類群の特定は, 樹木解剖学の成果を応用することで可能となる.

Fig. 4 Examples of minute charcoal fragments with characteristic features to identify species (a: *Torreyia nucifera*, b: *Pinus densiflora*, c: *Abies firma*, d: *Cryptomeria japonica*; modified from Ogura, 2000).

の高倍率で観察することにより, 微粒炭の表面構造をより明確にとらえることができる。そして, 微粒炭の表面形態の特徴から, 母材植物を特定できる場合もある (図4)。

しかし, 他の植物とよく似た表面形態をもつ微粒炭も少なくないため, 微粒炭の母材植物を識別することは必ずしも容易ではない。微粒炭は1種の植物からもさまざまな形態をもつものが出現することなどから, 数多くの植物種を対象とした場合, 微粒炭の識別は決して容易ではなさそうである。

そのような微粒炭識別の困難さから, 筆者はしばしば出現する微粒炭を便宜的にタイプ分けすることにより, 母材植物・植生を検討してきた (小椋, 2000, 2001, 2002, 2003a, 2003b, 2004; 小椋ほか, 2002)。なお, 微粒炭をタイプ分けすることによる研究例はほかにも見られ, 例えば Enache & Cumming (2006) は, 透過光による微粒炭画像を外形などからタイプ分けしている。それは, 落射光による微粒炭画像を主にその表面形態からタイプ分けする小椋の分類に比べ, 比較的簡単なものとなっている。

標本試料の観察から, 以下のことが明らかとなった。

①植物起源の微粒炭の表面形態は, ふつうそれぞれの母材植物の組織を反映しており, ある母材植物の材や樹皮などの組織ごとにいくつかのタイプに分類することができる。ただ, その分類の難易は, 植物種によって, また樹皮か材かなどの組織によって異なる (表4, 図5)。

②樹木の材の場合, 針葉樹と広葉樹では, その微粒炭の形態は概して大きく異なり, 微粒炭の形態から針葉樹と広葉樹かを容易に識別できるものが多い。ただし, 一部にはその識別が難しいものもある。

③樹木の樹皮を200倍程度の倍率で観察する場合, 針葉樹か広葉樹かを問わず, その微粒炭の形態は材や葉の組織とは全く異なり, 互いに似たものも多く見られる。一方, スギやヤマザクラなどのように, 特徴的な樹皮の微粒炭が多くできるものもある。

④樹木の葉の微粒炭には, 多様な形態のものがある。その中には, 樹皮に多いタイプのものやイネ科草本に見られるタイプのものなども含まれる。

⑤微粒炭の中には, ススキの微粒炭のように, 光の反射が少なく斜め上方からの光では表面形態が観察しにくいものがある。そのような微粒炭の観察には, 垂直落射光源 (ま

表4 組織ごとの微粒炭のタイプ別割合 (%) (200倍での観察による; 小椋, 2000)

Table 4 Ratio (%) of minute charcoal fragment types in different tissues (under × 200 magnification; Ogura, 2000)

樹種・組織	Type	Type 1	Type 1'	Type 2	Type 3	Type 4	その他
モミ・材 No.1		62	30	-	-	-	8
モミ・材 No.2		87	10	-	-	-	3
モミ・材 No.3		67	27	-	-	-	6
モミ・材 No.4		88	8	-	-	-	4
モミ・樹皮 No.1		54	27	-	-	-	19
モミ・樹皮 No.2		81	10	-	-	-	9
モミ・樹皮 No.3		52	32	-	-	-	16
モミ・樹皮 No.4		67	18	-	-	-	15
スギ・材 No.1		61	26	-	-	-	13
スギ・材 No.2		83	7	-	-	-	10
スギ・材 No.3		79	15	-	-	-	6
スギ・樹皮 No.1		52	9	18	12	-	9
スギ・樹皮 No.2		59	-	33	-	-	8
スギ・樹皮 No.3		28	-	61	-	-	11
コナラ (1)・材 No.1		51	8	15	8	8	10
コナラ (1)・材 No.2		61	-	5	30	1	3
コナラ (1)・材 No.3		80	1	5	8	-	9
コナラ (1)・樹皮 No.1		76	-	4	-	-	20
コナラ (1)・樹皮 No.2		84	7	-	-	-	9
コナラ (1)・樹皮 No.3		77	4	7	6	-	6
リョウブ・材 No.1		67	24	-	-	-	9
リョウブ・材 No.2		84	7	-	-	-	9
リョウブ・材 No.3		67	20	-	-	-	13

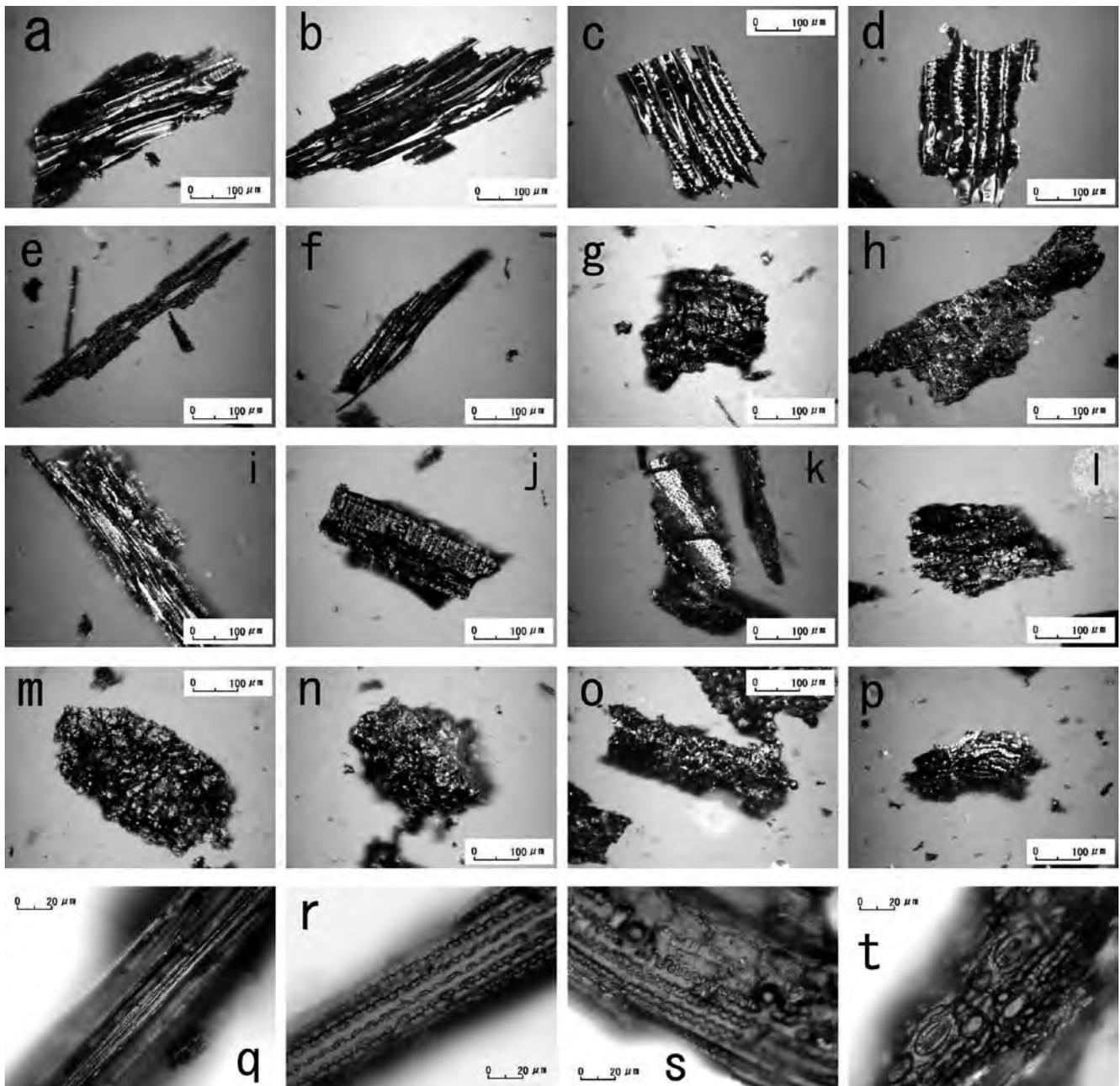


図5 植物起源の微粒炭の表面形態例 (a-d: モミ・材, e-h: スギ・樹皮, i-l: コナラ・材, m-p: コナラ・樹皮, q-t: ススキ; 小椋, 2000, 2001 を改変).

Fig. 5 Examples of surface morphology of minute charcoal fragments from plants (a-d: *Abies firma* (wood), e-h: *Cryptomeria japonica* (bark), i-l: *Quercus serrata* (wood), m-p: *Quercus serrata* (bark), q-t: *Miscanthus sinensis*; modified from Ogura, 2000, 2001).

たはそれに代わるもの) が必要である。

⑥針葉樹の分野壁孔の部分などを400倍以上の倍率で観察することにより、一部の微粒炭からはその母材植物を特定ないし絞ることができる。その際、植物組織に関する既存の文献は大いに参考になる(例えば、島地・伊東,

1982; 佐伯, 1982; Watson & Dallwitz, 1992)。

⑦そのように母材植物を特定ないし絞ることができる鍵となる組織(痕)としては、針葉樹の分野壁孔の他に、針葉樹の仮道管のらせん肥厚、樹脂道、広葉樹の道管側壁の壁孔、気孔などがある。

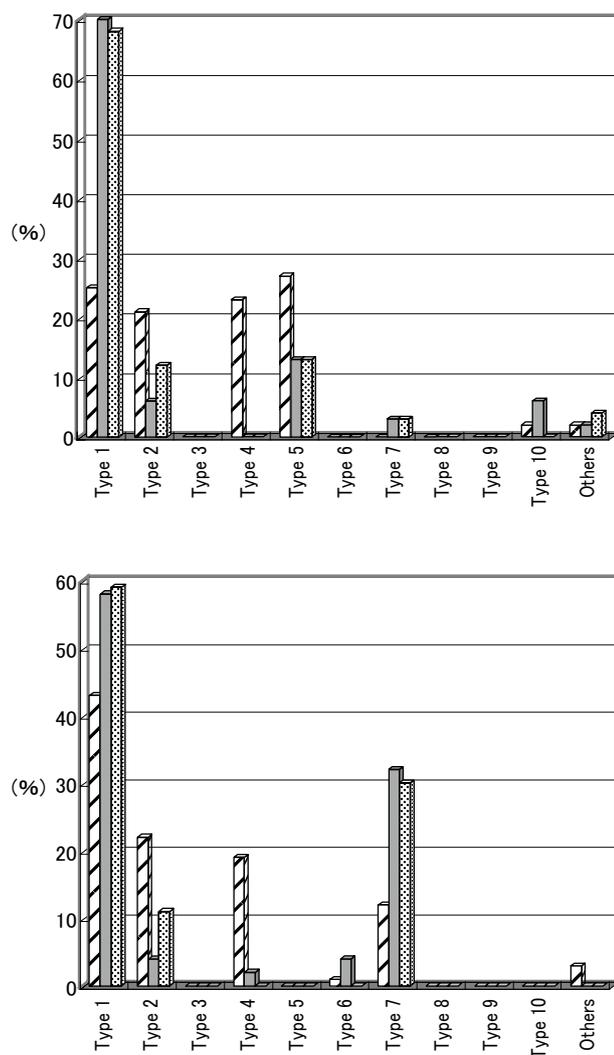
#### 4. 燃焼温度の違いによる微粒炭の形態変化について

以上のように、微粒炭はその母材植物・植生を知る大きな手がかりになる可能性があると考えられる。しかし、実際にどのような微粒炭が泥炭や土壌中から見つかるかを調べてみると、実験的に燃焼させて生成した微粒炭標本では見られないタイプのもがある一方、標本では時々見られる気孔などの特徴的な組織はほとんど見られない(小椋, 2002, 2003a, 2004; 小椋ほか, 2002)。

その原因としては、微粒炭の抽出方法に問題のある可能性や、微粒炭が泥炭や土壌中で変化したり一部消滅したりした可能性も考えられるが、微粒炭が生成される際の温度条件の違いが大きく影響していることも考えられる。そのため、ススキ、ヨシ、ネザサ、イタドリ、ヨモギ、ワラビ、スギ、クリの 8 種の植物を対象として、温度条件の違いにより微粒炭の形態がどのように変化するかを調べた(小椋, 2003b)。

そのうち、草本植物のススキと、ヨシ、ネザサ、イタドリ、ヨモギ、ワラビについては地上部全体を試料とし、またスギとクリについては、葉を含む枝全体を試料とした。それらの植物は、室内で乾燥させた後、各植物種の葉や茎などの組織の割合ごとに試料をつくり、電気炉内で 400°C、600°C、800°C でそれぞれ 2 分間燃焼させ、残った炭化物を指で圧力を加えて粉状にした。それを 500 μm と 125 μm のメッシュの篩により篩分けし、500 μm の篩を通過して 125 μm のメッシュの篩に残ったもの(125–500 μm クラス)について垂直落射光により顕微鏡で観察した。微粒炭の観察は 400 倍の倍率で行い、画像はデジタルカメラで撮影した。

その後、それぞれの試料ごとにプリントした写真を微粒炭の表面形態のパターンで分類し、どのようなパターンが出現するかを見た。それぞれの試料を燃焼させてできた微粒炭は、「その他」を除き 10 のタイプに分類し、その結



**Type 1**: 少し盛り上がった直線的なラインを基調とするタイプ。ただし、そのライン間を仕切るラインの見られるもの (**Type 2**)、気孔の見られるもの (**Type 4**)、突起の見られるもの (**Type 6**) は除く。

**Type 2**: 少し盛り上がった直線的なラインを基調とするものの中で、そのライン間を仕切るラインの見られるもの。

**Type 3**: 通道組織と思われる特徴的な組織が見られるもの。

**Type 4**: 気孔が見られるもの。

**Type 5**: 定形または不定形の窪みがまとまって見られるもの。ただし、ヨモギとワラビで見られるものは別のタイプとした。

**Type 6**: トゲ状などの突起が見られるもの。

**Type 7**: 表面が溶解したように見えるもの。

**Type 8**: 不定形な窪みがまとまって見られるものの中で、今回のサンプルではヨモギ特有のもの。

**Type 9**: 不定形な太いラインと溝が連続して見られるもので、今回のサンプルの中ではワラビ特有のもの。

**Type 10**: スギの木口面。

図 6 3 種類の燃焼温度により出現する微粒炭タイプの割合 (スギとススキ; 小椋, 2003b を改変)。

Fig. 6 Ratio of minute charcoal fragment types derived from three different combustion temperatures (*Cryptomeria japonica* and *Miscanthus sinensis*; modified from Ogura, 2003b).

果を表やグラフにまとめた。なお、微粒炭のタイプ分けは、応用研究に対応したのもでもあり、微粒炭識別の困難さを克服し微粒炭の母材植物を特定する試みとして行うものである。

主な結果は次の通りである。

①同じ植物種でも、燃焼温度の違いにより、一般に生成される微粒炭の形態タイプの割合は変化する。

②燃焼温度の違いによる微粒炭の形態タイプの割合変化のパターンは、植物種により異なる (図 6)。

③一般に比較的低温の 400°C前後までの温度での燃焼では、気孔の見える微粒炭が残りやすい種も少なくないが、600°C以上の高温での燃焼では気孔の見える微粒炭が残る種はかなり少ない (図 6)。

④表面が溶解したように見えるタイプの微粒炭は、一般に 400°Cでの燃焼では全く、あるいはほとんど出現しないが、600°C以上の燃焼になると大幅に増える例が見られる (図 6・ススキ)。確認したもののうち、そうした傾向の見られる植物としては、ススキ、ヨシ、ネザサのイネ科植物 3 種とイタドリがある。

このように、燃焼温度変化に伴う微粒炭の形態変化は、それぞれの種における組織の温度変化に伴う変化特性などにより大きく異なる。ただ、これまでに検討した植物種の数に限られたものであるため、今後さらに多くの植物種についての検討が必要である。また、燃焼温度や燃焼時間の設定を、さらにさまざまに変えることにより、それに伴う植物組織の変化特性は、より明らかになるものと考えられる。

## 5. 微粒炭分析の困難さと展望

本稿でも触れた微粒炭の長短軸比については、米国での先行研究を受けて進めたものであるが、それは燃えた植物や植生のタイプを考える上で参考になる場合も多いと思われるものの、例外的な値を示す木本植物や草本植物がいくつも確認できる。また、樹木の幹枝の太さにより、微粒炭の長短軸比が変わるものもあることなどから、その値から燃えた植生タイプを推定するには慎重である必要があると考えられる。

そのため、微粒炭の母材植物を正しく知るためには、その表面形態観察を行うことが不可欠である。それは、落射光により 400 倍程度以上の高倍率で顕微鏡観察することにより、より明確にとらえることができる。しかし、微粒炭は 1 種の植物でも、組織ごとにそれぞれいくつかの形態のものができる。また、微粒炭が生成される際の温度条件の違いなどにより、微粒炭の形態タイプの割合が変化することも実験的に確認される。これらのことだけからも、微粒炭分析のための標本とする微粒炭は、組織ごとにいくつもの条件で作る必要があると考えられる。

さらに、母材の乾湿度の違いにより炭の収縮率や化学構造が変化すると報告もある (Bryden & Hagge, 2003)。あるいは、速く燃えるかゆっくり燃えるかといった母材の燃え方の違いにより、炭の形態・構造が変化すると報告もある (Kurosaki et al., 2003)。おそらく、それらも植物の種や組織によって変化の程度は異なるものと思われるが、それらの点についても、今後いろいろな植物の種や組織について実験的に確認してゆく必要があるように思われる。

微粒炭の母材植物に関する研究は、生成する微粒炭の形態がすでに述べたようなさまざまな要因に支配されるため、多くの基礎的研究が必要である。そのため、その研究に対して感じられる困難さから、研究を進めることが躊躇されることがあるかもしれない。筆者も、当初は、まだ温度条件の違いなどを考慮しない時でさえ、そうした困難さを強く感じたことがある。しかし、実際に堆積物中からどのような微粒炭が出現するかを見てみると、出現する微粒炭の種類が明らかに単純な場合がいくつもあった。たとえば、三瓶小豆原理没林の埋没土壌の微粒炭分析 (小椋, 2003a) では、出現した微粒炭の大部分はスギ起源と思われるものであった。また、阿蘇外輪山の草原の起源についての研究 (小椋ほか, 2002) でも、出現した微粒炭の主なタイプはわずかしかなかく、古くから比較的単純な組成の草地が維持されていたことが推定された。また、その後の燃焼温度の違いによる微粒炭の形態変化についての研究 (小椋, 2003b) から、阿蘇で出現した微粒炭の大部分はススキが起源である可能性が高いと考えられる。これらの例は、研究対象地に残る大型植物遺体や、現存する主要な植物から、その起源植物が特定されやすかったものである。これらの例から考えると、ほかにも花粉分析や植物珪酸体分析などの古植生についての成果があれば、微粒炭の分析からの考察を加えることによって、より詳細な植生復元が可能となる場合があると考えられる。

一方、深泥池の泥炭に含まれる微粒炭に関する研究 (小椋, 2002) では、より多くのタイプの微粒炭が出現した。その中には起源植物を特定できる特徴的な微粒炭は少なかったが、それでも明らかに木本起源の特徴を持つ微粒炭が見られなかったことなどから、出現した微粒炭の大部分は草本起源のものと推定された。

筆者がこれまで行った応用的研究は限られているが、それでもそれぞれの場所で出現する微粒炭を総合的に見ることにより、以上のようにそれぞれの地であつて燃えた植物、またその集合としての植生を、何らかのレベルで明らかにすることができた。もちろん、木本起源と草本起源の微粒炭が複雑に出現するなどして、そのようにうまくいかないケースも想定されるが、とりあえず微粒炭から何がどの程度わかるかどうかの試みは積極的に行われてもよいのでは

ないだろうか。

その際、微粒炭から、どの程度のレベルで過去に燃えた植物や、その集合としての植生を明らかにすることができるかどうかは、元の植生の組成がどの程度単純あるいは複雑であったかどうか、微粒炭の母材植物を知る手がかりの有無、あるいは微粒炭に関する基礎的研究の深さなど、いくつかの要因に左右されるものと思われる。そのうち、微粒炭に関する基礎的研究の深さは、努力次第でより深いものとなるはずである。現生の植物がどのような形態の微粒炭を生成するかを広く研究することは、針葉樹の分野壁孔や広葉樹の道管側壁における壁孔などのように、種の特定にも結びつく特徴的形態をもつ微粒炭の識別をより多く可能にすることにつながるとと思われる。また、電子顕微鏡を用いた高倍率での観察などによって、分類上の手がかりはまだ多く見つかってゆく可能性があるだろう。

ただし、これまで観察した泥炭などの堆積物中に含まれる微粒炭には、そのような特徴的形態を持つものの割合が小さいため、微粒炭の基礎的研究を深めても、種や分類群の特定ができるのは、やはり一部に留まることが予測される。また、種や分類群の特定については、一般的にはこれまでの樹木や草本に関する解剖学が明らかにしてきた部分(木材組織など)については、微粒炭の基礎的研究がそれを超えることは難しいと思われる。しかし、たとえば樹皮のように、これまで植物に関する解剖学が十分明らかにしていない部分、あるいは温度条件などにより、元の組織が変わる場合については、微粒炭の基礎的研究は新たな手がかりをより多く見いだすことになるであろう。

## 6. タイプ分けなどの客観性について

筆者は微粒炭の基礎的研究および応用的研究において、しばしば微粒炭の表面形態のタイプによる分類を試みてきた。それは、植物を燃やして標本試料となる微粒炭をつくる基礎的研究では、ある母材となる植物や植物組織から、いくつかのタイプの微粒炭が生成されるためである。また泥炭などの堆積物中の微粒炭を調べる応用的研究では、出現する微粒炭を一つ一つ確実に同定することは困難であるが、似たような表面形態をもついくつかの微粒炭のタイプがしばしば出現し、それらをタイプ分けすることにより、微粒炭の母材植物を推定しやすくなる場合があるためである。

ただ、とくに応用的研究においては、タイプ分けによるメリットがある一方で、それが十分客観的なものであるかと問われると、これまでの研究では必ずしも十分客観的であったとは言えない面もあったかもしれない。たとえば、これまで筆者が設定した微粒炭のタイプの中には、植物の構造を知り尽くした人であればもっと別の設定をするも

のがあるかもしれない。あるいは、割合としては小さいが、表面が溶けたような形状が見える一方で、元の組織の状態も残る微粒炭など、中には2つ以上のタイプの表面形態をもつ微粒炭もある。そのような微粒炭をどこに分類するかについては、明確な規定をして分類をしていなかった。そのため、今後はその方法を規定しておく必要があるだろう。ただ、全くどのタイプに分類すればよいかわからないものは、「その他」のタイプを作ることにより、あまりに非客観的な分類が行われることは避けられてきたと思われる。

なお、とくに応用的研究でタイプ分けした微粒炭は、さらにいくつかのタイプに細分化される場合が多い。タイプ分けが複雑になることを避けるために、筆者はこれまであまり多くのタイプを作らないようにしてきたが、微粒炭の母材植物をより詳しく検討するためには、それは細分化してゆく必要があるだろう。ただ、もし検討する試料に多くの母材植物からなる微粒炭が、比較的均等な割合で含まれている場合、その母材植物の特定はより難しいものとなることが予測される。それに対して、タイプ分けをしても、比較的シンプルな形に分けることができれば、燃えた植生の構成は比較的シンプルであった可能性が高く、また、その主な母材植物も明らかにしやすいと考えられる。そのため、たとえば比較的単純な植生であるススキ草原の歴史を考える場合など、微粒炭分析はかなり有効な手段となるものと思われる。

微粒炭の分類をめぐる客観性の問題は、タイプ分けのほかにもいろいろある。たとえば、本稿で先に示した微粒炭上のトゲ状突起についても、そうした問題がある。上記のように、植物の種ごとの写真を見比べると、とりあえず違いは大まかに見られるとはいえ、よく見ると同じ植物のトゲ状突起でも、形がやや異なるものがある。また、組織の違いによって、同じ種でも全く異なるものが存在することもあるため、微粒炭の特徴的形態から種あるいは分類群を特定するためには、ある植物に含まれる特徴的形態を組織ごとに数多く観察し、必要に応じて、どのような割合でどのような形態のものが出現するかを統計的に明らかにしておく必要があると思われる。

ただし、これまでのわずかな応用的研究例では、堆積物中の微粒炭にトゲ状突起があるものの割合は、なぜかきわめて小さい。また、気孔については、燃焼温度の関係で、それが残っている微粒炭の割合が小さいことが多いと考えられる。こうしたことから、あらゆる微粒炭の形態についての基礎的研究は意味があるとはいえ、優先してなされる研究は、応用研究における必要性などを考慮して決定される必要があると思われる。

## 7. おわりに

以上のように、微粒炭をもとにした研究にはまだ困難な課題が多く残されている部分がある。しかし、その一方で、課題を多く残した現状の微粒炭分析の手法によっても、過去の植生やそれに対する人為などによる火の影響を知る上での重要な手がかりが、案外容易に見えてくる場合もある。ともあれ、今後は微粒炭の母材植物に関する基礎的研究、またさまざまな応用的研究がいつそう進むことを期待したい。

なお、本稿の執筆は、2006年9月に総合地球環境学研究所(京都)で開催された日本植生史学会談話会での微粒炭に関する発表を機に執筆したものである。その発表の機会をつくり、この原稿の執筆を勧めていただいた日本植生史学会の関係者の方々に感謝の意を表したい。また、植生史研究編集委員長の能城修一氏とお二人の査読者からは貴重なコメントなどを多くいただくことができ、拙い原稿もより良いものに仕上げることができた。それらの方々にも深くお礼申し上げる。

## 引用文献

- Bryden, M. & Hage, M. G. 2003. Modeling the combined impact of moisture and char shrinkage on the pyrolysis of a biomass particle. *Fuel* 82: 1633–1644.
- Clark, J. S. 1988. Particle motion and the theory of charcoal analysis: source area, transport, deposition and sampling. *Quaternary Research* 30: 67–80.
- Enache, M. D. & Cumming, B. F. 2006. Tracking recorded fires using charcoal morphology from the sedimentary sequence of Prosser Lake, British Columbia, Canada. *Quaternary Research* 65: 282–292.
- Jones, T. P., Scott, A. C. & Cope, M. 1991. Reflectance measurements and the temperature of formation of modern charcoals and their implications for studies of fusain. *Bulletin of the Geological Society of France* 162: 193–200.
- Kurosaki, F., Ishimaru, K., Hata, T., Bronsveld, P., Kobayashi, R. & Imamura, Y. 2003. Microstructure of wood charcoal prepared by flash pyrolysis. *Carbon* 41: 3057–3062.
- 小椋純一. 1999. 微粒炭の形態と母材植生との関係 (1). 京都精華大学紀要 No. 17: 53–69.
- 小椋純一. 2000. 微粒炭の形態と母材植生との関係 (2). 京都精華大学紀要 No. 19: 45–64.
- 小椋純一. 2001. 微粒炭の形態と母材植生との関係 (3). 京都精華大学紀要 No. 20: 31–50.
- 小椋純一. 2002. 深泥池の花分析試料に含まれる微粒炭に関する研究. 京都精華大学紀要 No. 22: 267–288.
- 小椋純一. 2003a. 三瓶小豆原理没林埋没土壌の微粒炭分析. 「三瓶埋没林調査報告書Ⅲ」(鳥根県環境生活部景観自然課編). 90–98. 鳥根県環境生活部景観自然課. 松江(鳥根県).
- 小椋純一. 2003b. 燃焼温度の違いによる微粒炭の形態変化について. 京都精華大学紀要 No. 25: 247–266.
- 小椋純一. 2004. 心御柱発掘坑における微粒炭分析. 「出雲大社境内遺跡」(大社町教育委員会編). 385–389. 大社町教育委員会, 大社町(鳥根県).
- 小椋純一・山本進一・池田晃子. 2002. 微粒炭分析から見た阿蘇外輪山の草原の起源. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書 No. 13: 236–239.
- Paulssen, L. M. 1964. *Identification of Active Charcoals and Wood Charcoals*. Universitetsforlaget. 112 pp. Oslo, Bergen.
- 佐伯 浩. 1982. 木材の構造. 218 pp. 日本林業技術協会, 東京.
- 島地 謙・伊東隆夫. 1982. 図説木材組織. 176 pp. 地球社, 東京.
- Tanner, H. G. 1925. The identification of Norit and other wood charcoals. *Industrial and Engineering Chemistry* 17: 1191–1193.
- Umbanhowar, C. E., Jr. & McGrath, M. J. 1998. Experimental production and analysis of microscopic charcoal from wood, leaves and grasses. *The Holocene* 8: 341–346.
- Watson, L. & Dallwitz, M. J. 1992. *The Grass Genera of the World*. 1038 pp. C. A. B. International, Wallingford (UK).
- 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: 526–543.

(2007年9月4日受理)