

総説

井上 淳¹: 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—Jun Inoue¹: Importance and methods of macro-charcoal study to reconstruct
fire history—its contribution to the study of Holocene fire history in Japan—

要旨 微粒炭は、山火事や火入れなどによって生じる微細な炭である。堆積物中の微粒炭の定量分析に基づいた火災史の復元が行われている。日本での堆積物の微粒炭分析から、後期更新世末から完新世前半に火災が増加したことが明らかになっており、火災により植生が攪乱された可能性が示唆されている。日本での微粒炭研究は主に100 µm以下のmicro-charcoalを用いたものであるが、近年100 µm以上のmacro-charcoalの研究が注目を集めている。macro-charcoalは近隣の火災史を記録していると考えられており、分析の過程で微粒炭の破壊を最小限にできること、微粒炭とその他の粒子の区別が容易であること、短時間で効率よく分析が行えることなどの利点をもつ。本稿では、これらmacro-charcoal研究の重要性とその分析方法について紹介する。

キーワード: 火災史, 完新世, 微粒炭, 篩い分け法, macro-charcoal

Abstract Charcoal fragments are derived from both natural and anthropogenic fires. Fire history has been studied by tracing charcoal abundance in sediments. Charcoal studies in Japan suggested that fires occurred frequently between the terminal Pleistocene and the early Holocene. Frequent fires in this period are considered to have disturbed vegetation. So far charcoal studies in Japan have examined mostly microscopic charcoal less than 100 µm in diameter, but macroscopic charcoal more than 100 µm in diameter has been examined recently. Macroscopic charcoal generally represents the local fire history. The macroscopic charcoal analysis minimizes charcoal breakdown in analytical procedures, facilitates charcoal identification from other fragments, and allows efficient analysis of sediments. This review introduces the methods of the macroscopic charcoal analysis, stressing the above merits of this analysis.

Key words: charcoal fragment, fire history, Holocene, macroscopic charcoal, sieving method

1. はじめに

Iversen (1941)以降、堆積物中の微細な炭、すなわち微粒炭を用いた過去数万年間の火災史の研究が、アメリカ大陸やヨーロッパを中心に世界各地で行われている (Swain, 1973, 1978; Tolonen, 1978 など)。当初、微粒炭分析は花粉分析に付随したものでしかなかったが、近年では火災史の復元を目的とした微粒炭そのものの研究が行われるようになった (例えば, MacDonald et al., 1991; Clark et al., 1998; Long et al., 1998; Millspaugh et al., 2000)。こうした微粒炭研究の中で、macroscopic charcoal (以下 macro-charcoal) と呼ばれる約100 µm以上の粗粒な微粒炭に着目した研究も進められている (例えば Laird & Campbell, 2000; Mohr et al., 2000; Carcaillet et al., 2001a; Brunelle & Anderson, 2003; Umbanhowar, 2004; Daniels et al., 2005; Higuera et al., 2005; Enache

& Cumming, 2006; Froyd, 2006; Lynch et al., 2006; Toney & Anderson, 2006)。また、日本での微粒炭の研究は1980年代に安田 (1980) や杉田・塚田 (1983) など一部の研究者によって行われていたが、近年多くの研究者によって、日本の火災史が解明されつつある (例えば, 井上ほか, 2001; 小椋, 2002; 佐々木, 2003; 三宅・石川, 2004; 富樫ほか, 2004)。

本稿では、微粒炭の特性や日本の微粒炭研究から明らかとなった完新世の火災史とその課題について概説する。さらに火災史を復元する上での macro-charcoal 研究の重要性とその分析・解析方法について解説する。微粒炭から復元された火災史と気候変化や人間活動との関係についての研究のレビュー、および日本の微粒炭研究史については既に井上 (2007) で紹介しているため、ここでは割愛する。なお、微粒炭 (charcoal fragment, charcoal particle),

¹ 〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138 大阪市立大学大学院理学研究科 (e-mail: juni@sci.osaka-cu.ac.jp)

Department of Geoscience, Graduate School of Science, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka, 558-8585, Japan

macro-charcoal, micro-charcoal が意味する炭の粒径は研究者によって若干異なるが、ここでは Bradbury et al. (1997) を参考に、微粒炭は 1 mm 以下を、macro-charcoal は 100 μm ~ 1 mm を、micro-charcoal は 100 μm 以下の炭を意味するものとして使用する。また、「火災」や「火事」は本来災害を表す用語であるが、本稿では山火事などの意味に加えて、人による火入れや山焼きなども含めた、植物の燃焼全般を意味する用語として用いる。

2. 火災と炭化作用について

一般に山火事の形態は、樹皮や幹が燃焼する樹幹火と、樹木の先端部の枝や葉まで燃焼する樹冠火、林床植生やリターが燃焼する地表火、堆積したリターがくすぶる地中火に区分される (例えば、飯泉, 1991; Scott, 2000)。燃焼温度は燃焼物や燃焼形態によって異なり、一般的な樹冠火などの炎の温度は 700 ~ 980°C であるが、リターがくすぶる地中火の多くの場合、その温度は約 300°C 程度である (Scott, 2000)。また、生成される炭の量は燃焼形態や燃焼物によって大きく異なる (Stocks & Kauffman, 1997)。

微粒炭は微細な炭であるため、その化学・物理特性は炭と変わらない。Jones et al. (1997) は、炭 (charcoal) について「火によって熱せられた結果、化学組成や超微細構造が著しく変化しているが、母材植物の構造が維持されている植物由来の黒色物質」と説明している。植物の炭化は 200°C から 250°C で部分的に進行し、約 250°C 以上で炭になるが、酸素の供給が十分で高温な場合には完全燃焼し、灰化または消失してしまう (Jones et al., 1991, 1997)。このように炭の生成は、温度や酸素供給などの条件によって制限される。また炭化の際には、相対的な炭素濃度の増加

など、化学組成に大きな変化が認められる。同一植物の同一部位から生成された炭であっても、その化学組成・物理特性は炭化温度によって異なり、高温で炭化したものの方が炭素濃度は高く、光反射は強くなる (Jones et al., 1991; 1997; Scott, 2000; 図 1)。このため、炭の反射率測定や化学組成分析による燃焼温度測定法が提案されている (Jones et al., 1991; Jones & Lim, 2000; Sawada et al., 2000; Inoue & Yoshikawa, 2003)。炭の化学組成・物理特性が炭化温度や燃焼物によって異なることは、それぞれの微粒炭の空中・水中での挙動や、化学的安定性、物理強度などが異なる可能性を示唆し、分析方法やタフォノミーを考える上で注意しなければならない。これらの特性変化は、植物の細胞壁を構成するセルロース・ヘミセルロースなどの多糖類が、被熱に伴う脱水・脱水素反応によって多環芳香族や無定形炭素へと変化することや、それに伴う細胞壁の均一化や破損 (Scott, 2000) によるものと考えられる。

3. 微粒炭研究に基づいた日本の完新世火災史

日本での完新世を通じた微粒炭研究はまだ少なく、またその多くが日本中部~西部地域の研究である (杉田・塚田, 1983; 塚田, 1986; Tsukada et al., 1986; 井上ほか, 2001, 2005; 中島ほか, 2002; 小椋, 2002; 三宅・石川, 2004; 富樫ほか, 2004; 図 2)。しかし、これらの研究から火災史の一端が垣間見えるようになった。ここでは、個別の研究紹介は省略するが、これまでの多くの研究では、後期更新世末~完新世前期 (1 万数千年前~6000 年前頃) に微粒炭の増加やピークが認められ、この時期に火災が頻発したのと考えられる。火災の増加の原因は明らかではないが、微粒炭の増加期が周辺の遺物・遺構の産出時期と

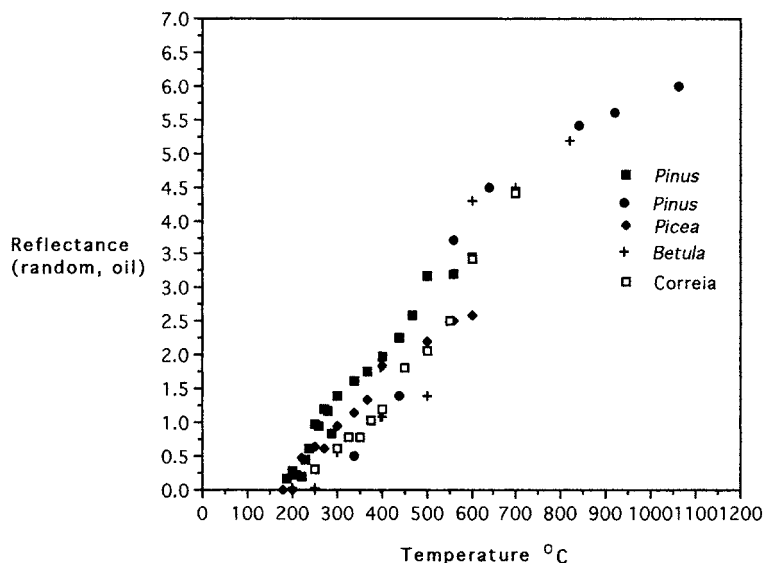


図 1 被熱温度と反射率の関係 (Scott, 2000). 空気を遮断して 1 時間被熱させた後、測定した結果. 基データは, Correia et al. (1974), Scott & Jones (1991), Jones et al. (1991) による. Jones & Lim (2000) は、被熱温度と反射率の関係を基に、被熱温度 (°C) = 184 + 118 × 反射率 (%) の関係式を導いている。

Fig. 1 Correlation between temperature and reflectance (Scott, 2000). Measurement after one-hour heating without air. Original data from Correia et al. (1974), Scott & Jones (1991), and Jones et al. (1991). Jones & Lim (2000) obtained a formula: temperature (°C) = 184 + 118 × reflectance (%).

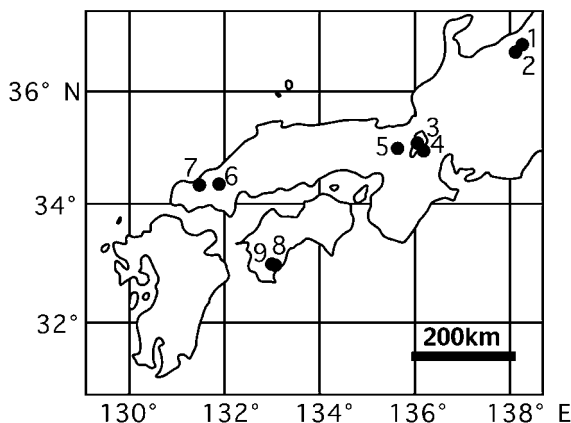


図2 完新世前期以降の微粒炭分析地点。—1: 野尻湖 (塚田, 1986), 2: 逆谷地湿原 (富樫ほか, 2004), 3: 琵琶湖 (井上ほか, 2001), 4: 曾根沼 (井上ほか, 2005), 5: 深泥池 (小椋, 2002), 6: 沼原湿原 (杉田・塚田, 1983), 7: 宇生賀湿原 (Tsukada et al., 1986), 8: 具同低湿地 (三宅・石川, 2004), 9: 中筋川後背湿地 (中島ほか, 2002)。

Fig. 2 Study sites of charcoal analysis in early Holocene. — 1: Lake Nojiri (Tsukada, 1986), 2: Sakasa-yachi marsh (Togashi et al., 2004), 3: Lake Biwa (Inoue et al., 2001), 4: Sone marsh (Inoue et al., 2005), 5: Mizoro-ga-ike pond (Ogura, 2002), 6: Nonbara marsh (Sugita & Tsukada, 1983), 7: Ubusaka marsh (Tsukada et al., 1986), 8: Gudo lowland (Miyake & Ishikawa, 2004), 9: Nakasuji river back-marsh (Nakajima et al., 2002)。

一致することなどの理由により、人為の影響がしばしば想定されている (井上ほか, 2001; 中島ほか, 2002; 小椋, 2002; 三宅・石川, 2004)。しかしながら、微粒炭の増加が認められる後期更新世末期～完新世前期は、温暖化が進行し、現在よりも温暖な時期も含まれることから、温暖化による森林のバイオマス量の増加に伴うリター量の増加、または落雷の増加等の原因により、火災が頻発しやすい状況であったとも考えられる。

一方、火事の増加に伴い、疎林化など植生が大きく攪乱された可能性も唆されている (例えば、杉田・塚田, 1983; 井上ほか, 2005)。滋賀県曾根沼堆積物では、完新世初期の微粒炭の増加期には、木本花粉の相対含有量が著しく少なくなることから、火事による攪乱と疎林化の可能性が指摘されている (井上ほか, 2005)。また、完新世前期の微粒炭の増加に伴い、コナラ亜属花粉の増加が琵琶湖 (樋口・井内, 1991; 井上ほか, 2001) や、具同低湿地 (三宅・石川, 2004)、曾根沼 (井上ほか, 2005) などと広域で報告されている。完新世前期の火災の増加と植生変化との関係は明らかではないが、日本の広い範囲での火災の増加とコナラ亜属の増加などの植生の種構成の変化と

が対応していることから、火災が日本の完新世の植生遷移に重要な役割を果たした可能性がある。

以上のように完新世における日本の火災史が次第に明らかになり、植生史との関連が指摘されているが、まだ日本全体では研究数が少なく、日本における火災史の全体像は見えていない。特に完新世前期の微粒炭の増加要因を考える上でも、微粒炭増加がどの程度広い地域で認められるのか、今後更に様々な地域で分析を行い、明らかにしていく必要がある。また、各地点、各地域の分析結果を比較する上では、放射性炭素年代などに基づく堆積物の推定年代の誤差が問題となる。微粒炭の増加は完新世前半に日本各地で認められるものの、各堆積物の年代測定値は少なく、微粒炭の増加年代が各地域によってどの程度異なるかについては明確ではない。今後、詳細な火災史を編む上で、微粒炭の増加層準に含まれる微粒炭自体の年代測定を行うなどの工夫が必要である。微粒炭の放射性炭素年代測定は、後述する macro-charcoal を拾い集めて AMS 法を適用すれば比較的容易に行える。また、各地点の微粒炭分析結果を比較する上で、各堆積物に含まれる微粒炭の供給域すなわち火災の場所を検討することが重要である。日本での微粒炭研究の多くは花粉分析の際に検出される主に 100 μm 以下の micro-charcoal に着目したもので、供給域が不明瞭である。今後は、100 μm 以上の macro-charcoal 分析も併せて行うことが必要であると考えられる。

4. macro-charcoal の特性と火事の歴史を復元する上での利点

山火事などによって生成される炭は、その粒径によって挙動が異なり、粒子径の大きな約 100 μm 以上の macro-charcoal の多くは、ほとんど飛散せずに近場に落下するのに対し、粒子径の小さな 100 μm 以下の micro-charcoal は、遠方にまで飛散することがあると考えられている (例えば、Whitlock & Larsen, 2001)。一般に、こうした macro-charcoal が飛散しないという見解は、Clark et al. (1998) や Ohlson & Tryterud (2000) の森林燃焼実験による微粒炭の分布調査や、Whitlock & Millspaugh (1996) や Gardner & Whitlock (2001) の火災後の湖底表層堆積物における微粒炭の分布調査などの研究に基づいている。そして macro-charcoal が飛散しないことから、堆積物中の macro-charcoal の給源は主に集水域内など近隣の火事であると考えられている (Whitlock & Larsen, 2001; 図3)。

火災史を復元するには、堆積物中の微粒炭の含有量を測定し、単位面積当たりの年間微粒炭堆積量 (charcoal accumulation rate: CHAR と略される) を算出する方法が広く用いられているが、micro-charcoal と macro-charcoal の含有量測定法は大きく異なる。micro-charcoal

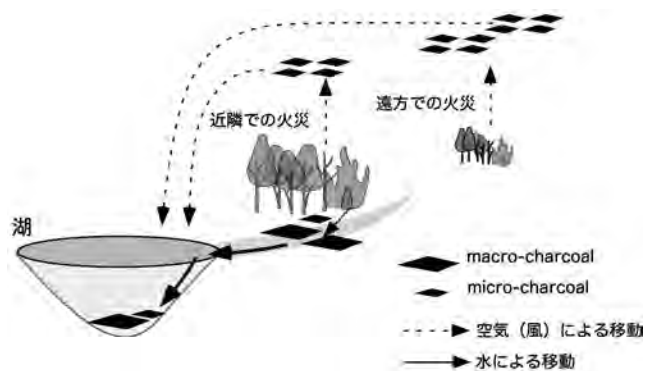


図3 macro-charcoalとmicro-charcoalの堆積物までの移送の概念図 (Bradbury et al. (1997), Whitlock & Larsen (2001)を改変)。

Fig. 3 Transportation of macro- and micro-charcoal to sediments (Modified from Bradbury et al., 1997; Whitlock & Larsen, 2001).

の分析方法は、花粉分析の際に検出される微粒炭を測定する花粉スライド法 (pollen slide method; Swain, 1973, 1978) が一般的である。花粉スライド法では、花粉の抽出を目的にスライドが作成されるため、試料の攪拌や遠心分離、化学的処理の過程で微粒炭の破壊が起きる (Clark, 1984)。このため、花粉スライド法は微粒炭の分析方法としては理想的なものではないとされる (Rhodes, 1998)。また、検鏡に際しても、一般的には生物顕微鏡で透過光を用いて行われ、形状が鋭角的で不透明な黒色のものを微粒炭とみなして測定が行われる (例えば Swain, 1978; Edney et al., 1990; Tinner et al., 1998, 2005; Tinner & Hu, 2003; Stähli et al., 2006)。しかし、この方法では微粒炭とそれ以外のもの、例えば一部の重鉱物などとの区別が付きにくい (Rhodes, 1998)。一方、macro-charcoalの分析法には、後述の篩分け法 (sieving method; Long et al., 1998) が用いられている。篩分け法では、堆積物を水溶液中に分散させた後、篩い分けを行い、約 100 μm 以上の残査物について検鏡を行う。検鏡は実体顕微鏡で落射光を用いて行うため、それぞれの微粒粒子について光沢や植物構造の有無を観察でき、微粒炭とそれ以外のものを区別しやすい。また、篩分け法は、多くの処理過程を必要とする花粉スライド法と比べて分析方法が単純なため、短時間に効率よく行うことができる。篩分け法では多くの場合、堆積物試料を 1 cm 程度 (0.5 ~ 2 cm) の層厚で分割し、連続的に分析する。微粒炭は、花粉のように定期的かつ継続的に産出するのではなく、一般的には不規則な間隔で起こる火事により短期間に大量に産出される (Birks, 1997)。このため、連続的な分析は微粒炭の一時的な増加を検出する上で有効であり、堆積物中の微粒炭の増加から過去の火

表1 micro-charcoalとmacro-charcoalのサイズ、供給源、分析方法などの比較

Table 1 Comparison of the size, origin, and analysis method of micro-charcoal and macro-charcoal

	Micro-charcoal	Macro-charcoal
サイズ	約 1–100 μm	約 100 μm –1 mm
移動	近場に沈積 ～遠方まで飛散	近場に沈積
給源	近隣～広域の火災	主に集水域など 近隣の火災
分析方法	花粉スライド法	篩分け法
処理時間	時間がかかる	短時間で行えるため、 連続的に分析できる
検鏡	生物顕微鏡を用いる 他の物と見分けにくい	実体顕微鏡を用いる 厳密に微粒炭を認定できる
炭の破壊・消失	多い	少ない

事の歴史を復元する上で大きな利点である。

以上のように、macro-charcoalはmicro-charcoalと比較して、1) 堆積物への供給域が限定されるため、火災が起きた場所を限定できる、2) 分析の過程で消失する微粒炭が少ない、3) 短時間で連続的に堆積物を分析できる、4) 実体顕微鏡を用いることで微粒炭の認定が厳密に行えるなど、堆積物中の微粒炭から火事の歴史を考える上で重要な利点をもつ (表1)。

5. macro-charcoal 分析方法 (篩い分け法) について

macro-charcoal 分析法で最も広く行われているのは、篩分け法である。篩分け法とは、分散剤などを用いて堆積物中の微粒子を分散させた後、篩別し、篩上に残った微粒炭について実体顕微鏡を用いて測定する手法である。篩分け法には、一般にピロリン酸ナトリウム (MacDonald et al., 1991; Carcaillet et al., 2001a, b) やヘキサメタリン酸ナトリウム (Long et al., 1998; Laird & Campbell, 2000; Mohr et al., 2000; Gardner & Whitlock, 2001; Brunelle & Anderson, 2003; Hallet et al., 2003; Froyd, 2006; Toney & Anderson, 2006) などの分散剤が用いられる。例えば、Long et al. (1998) は、5% ヘキサメタリン酸ナトリウム水溶液を用いて 24 時間放置処理後、篩別している。また、過酸化水素水 (Lynch et al., 2006) や水酸化カリウム水溶液が用いられることもある (Huber & Markgraf, 2003; Enache & Cumming, 2006)。一般に、微粒炭は化

学的に安定であると考えられるが、その化学的特性は炭化温度などによって異なるため、分析には化学反応性が低い薬品を用いるべきである。こうした理由から、分散剤が広く用いられていると考えられる。しかし、泥炭など有機物・植物遺体を多く含む堆積物の場合には、過酸化水素水やアルカリ溶液等を用いて有機物・植物遺体を分解・分散させる必要がある。ただし、井上・吉川(2005)や井上ほか(2005)が用いた高い濃度(6%)の過酸化水素水は微粒炭を消失させることがあるので、過酸化水素水を用いる場合には数%以下で用いることが望ましい。著者は現在、通常5%ヘキサメタリン酸ナトリウム水溶液と数%の過酸化水素水処理を用いて分析している。

篩い分け法を行う上で考慮すべき点は、分析試料量である。堆積物中に含まれる macro-charcoal 量はそれほど多くないため、少量の試料では分析精度が悪くなる一方、多量の分析試料では検鏡の際に時間を浪費してしまう(Carcalliet et al., 2001b)。Whitlock & Larsen (2001)は、篩い分け法に用いる湿潤試料量を1~5 ccとしている。一般に篩い分け法を行う際には、花粉スライド法よりも多くの分析試料が用いられる。例えば、Laird & Campbell (2000)では2 cc, Long et al. (1998)では2.5 cc, Higuera et al. (2005)では3 cc, Millspaugh et al. (2000), Mohr et al. (2000), Gardner & Whitlock (2001), Brunelle & Anderson (2003), Toney & Anderson (2006)では5 ccの試料が用いられている。しかし、Carcalliet et al. (2001b)は、同一層準から採取した試料1 ccの微粒炭量が大きく相違しないことから、試料1 ccがその層準の微粒炭量を反映するものだと考えている。分析にあたってどの程度の試料量が適当かは、堆積物の状態や堆積物に含まれる微粒炭の量による。このため、いくつかの同一層準の試料を用いて複数回測定を行い、微粒炭量の誤差を把握した上で、全体的な分析を行うことが重要であると考えられる。

6. 微粒炭堆積量の解析による火災イベント史の復元

近年、篩い分け法によって連続的に測定された微粒炭量(堆積量)から火事の歴史を復元する上で、微粒炭量のバックグラウンド要素とピーク要素の概念を取り入れた解析が広く行われている(Long et al., 1998; Millspaugh et al., 2000; Brunelle & Anderson, 2003; Danniell et al., 2005; Lynch et al., 2006; Toney & Anderson, 2006など)。ここでいうバックグラウンド要素とは微粒炭量の緩やかな変化傾向のことで、ピーク要素とは微粒炭量の急激な増加のことである。この解析法では、連続して測定された微粒炭含有量と堆積速度を基に CHAR (年間微粒炭堆積量)を算出し、CHARの層位変化からバックグラウンド要素とピーク要素をそれぞれ抽出する。緩やかに変化するバックグラ

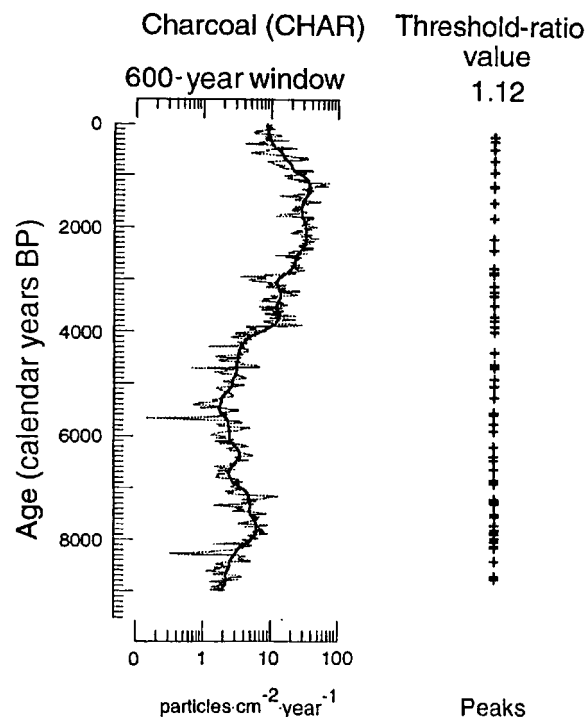


図4 CHAR (年間微粒炭堆積量:左図の細い線)から導き出されたバックグラウンド要素(左図の太い線)とピーク要素(右図の+)の例(Long et al., 1998).バックグラウンド要素から CHAR が一定値以上を超えるものをピーク要素として火災イベントの時期・頻度を推察する。

Fig. 4 Example of background (thick line in the left figure) and peak elements (+ in the right figure) deduced from CHAR (charcoal accumulation rate; thin line in the left figure)(Long et al., 1998). Fire events are deduced from peak elements that deviate from background.

ウンド要素は、日常的に起こる小規模な火災や以前に起こった大規模な火災による微粒炭の堆積物への流入量の変化であると解釈される。一方、急激な増加を示すピーク要素は近隣で起こった火災イベント(大規模な火災)によるものと考えられ、これを基に火災イベントの発生時期や火災イベントの発生間隔が考察される(例えば、Long et al., 1998; Whitlock & Larsen, 2001)。Long et al. (1998)では、連続的に測定された CHAR を加重平均法によってスムージングしたものをバックグラウンド要素とし、バックグラウンドを一定値以上を超えるものをピーク要素としている(図4)。また、Carcalliet et al. (2001a)は測定された CHAR について逆フーリエ変換を行い、バックグラウンド要素とピーク要素を抽出している。こうしたピーク要素に基づいた火災史の復元は現在広く行われており、火災頻度を考える上で有効な手法と考えられている。

この解析方法で個々の火災イベントを検出するためには、

分析に用いる堆積物試料の層厚を火災イベントの平均発生間隔に相当する層厚よりも薄くし、連続して分析を行う必要がある。Whitlock & Larsen (2001)によると、理想的な分析層厚は想定される火災イベントの平均発生間隔の約8分の1に相当する層厚である。さらに、歴史文書や樹木年輪中の火痕 (fire scar) の研究によって明らかになっている既知の火災と堆積物最上部に含まれる微粒炭の記録を比較した上で、バックグラウンド要素とピーク要素を抽出することが望ましいとされる。これは、既知の火災イベントが堆積物中の微粒炭量に反映されているかを確認し、ピーク要素を火災イベントに対応するように解析時の数値を設定するためである (Whitlock & Larsen, 2001)。

しかしながら、日本では数百年間の火事の歴史が明確であり、かつ長期間にわたる連続的な堆積物が得られる調査地域を見つけることは困難である。また、日本の多くの地域では旧石器時代もしくは縄文時代以降、人の痕跡が認められている。自然状態と人為的な火入れなどがある状態とでは、火災頻度が著しく異なる可能性がある。海外で行われているこうした解析方法は主に自然状態での火災頻度を研究対象としており、こうした手法がそのまま日本に適用できるかは、今後詳細な macro-charcoal 分析を行った上での検討が必要だろう。

7. おわりに

本稿では、火災史を解明する上での macro-charcoal 研究の利点や方法を中心に解説した。日本での macro-charcoal 研究は三宅・石川 (2004)、井上・吉川 (2005)、井上ほか (2005) とごくわずかである。井上・吉川 (2005) では、黒色土中に macro-charcoal が含まれることから、黒色土分布域で火災が起こったことを明らかにしている。今後、日本の火災史を考える上でも macro-charcoal の分析が重要であると考えられる。また、先に述べたように日本では micro-charcoal も含めた微粒炭の研究が少なく、研究された地域が限られている。花粉分析を行っている方々には、できれば花粉スライドに含まれる微粒炭を測定して頂ければと思う。また測定しないまでも、どの層準や時代に微粒炭が多く含まれたかなどを報告して頂ければ、今後、日本の火災史を明らかにしていく上で大いに役立つものと考えられる。

謝 辞

本稿は 2006 年 9 月 9、10 日に行われた日本植生史学会第 25 回談話会「植生史解明のための室内実験法 1. 微粒炭分析の基礎と方法」の講演内容を基にしたものである。談話会の開催にあたって終始ご指導頂いた、談話会講師の京都精華大学小椋純一氏、世話人である地球環境学

研究所湯本貴和氏、ONP 研究所大井信夫氏、スタッフとしてご協力頂いた地球環境学研究所佐々木尚子氏、京都府立大学大学院河野樹一郎氏、談話会の準備にあたり便宜を計って頂いた京都府立大学大学院高原光氏、また談話会に参加して頂いた諸氏に、この場を借りて改めてお礼を申し上げます。

本稿の作成にあたっては大阪市立大学大学院吉川周作氏に粗稿を読んで頂き、有益なご助言を頂いた。また、匿名査読者と編集委員のご指摘・助言により本稿は大幅に改善された。以上の方々に心からのお礼を申し上げます。

引用文献

- Birks, H. J. B. 1997. Reconstructing environmental impacts of fire from the Holocene sedimentary record. "Sediment Records of Biomass Burning and Global Change" (Clark, J. S., Cachier, H., Goldammer, J. G. & Stocks, B., eds.), 295–311. Springer-Verlag, Berlin.
- Bradbury, J. P., Dubay, G., Goldammer, J. G. & Patterson III, W. A. 1997. Report of the working discussion groups. "Sediment Records of Biomass Burning and Global Change" (Clark, J. S., Cachier, H., Goldammer, J. G. & Stocks, B., eds.), 463–481. Springer-Verlag, Berlin.
- Brunelle, A. & Anderson, R. S. 2003. Sedimentary charcoal as an indicator of late-Holocene drought in the Sierra Nevada, California, and its relevance to the future. *The Holocene* 13: 21–28.
- Carcaillet, C., Bergeron, Y., Richard, P. J. H., Fréchette, B., Gauthier, S. & Prairie, Y. T. 2001a. Change of fire frequency in the eastern Canadian boreal forests during the Holocene: does vegetation composition or climate trigger the fire regime? *Journal of Ecology* 89: 930–946.
- Carcaillet, C., Bouvier, M., Fréchette, B., Larouche, A. C. & Richard, P. J. H. 2001b. Comparison of pollen-slide and sieving methods in lacustrine charcoal analyses for local and regional fire history. *The Holocene* 11: 467–476.
- Clark, J. S., Lynch, J., Stocks, B. J. & Goldammer, J. G. 1998. Relationships between charcoal particles in air and sediments in west-central Siberia. *The Holocene* 8: 19–29.
- Clark, R. L. 1984. Effects on charcoal of pollen preparation procedures. *Pollen et Spores* 26: 559–576.
- Correia, M., Maury, R. & Arai, F. 1974. Mesure par leur pouvoir réflecteur, des températures de carbonisation des bois fossilisés dans les formations volcanique. *Bulletin du Centre de Recherches de Pau SNPA* 8: 527–536.
- Daniels, M. L., Anderson S. & Whitlock, C. 2005. Vegetation and fire history since the Late Pleistocene from the Trinity Mountains, northwestern California, USA. *The Holocene* 15: 1062–1071.
- Edney, P. A., Kershaw, A. P. & De Deckker, P. 1990. A late Pleistocene and Holocene vegetation and environmental record from Lake Wangoom, Western Plains of Victoria, Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeo-*

- ecology* 80: 325–343.
- 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.
- Froyd, C. A. 2006. Holocene fire in the Scottish Highlands: evidence from macroscopic charcoal records. *The Holocene* 16: 235–249.
- Gardner, J. J. & Whitlock, C. 2001. Charcoal accumulation following a recent fire in the Cascade Range, northwestern USA, and its relevance for fire-history studies. *The Holocene* 11: 541–549.
- Hallet, D. J., Lepofsky, D. S., Mathewes, R. W. & Lertzman, K. P. 2003. 11,000 years of fire history and climate in the mountain hemlock rain forests of southwestern British Columbia based on sedimentary charcoal. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 292–312.
- 樋口佐紀子・井内美郎. 1991. 琵琶湖底堆積物の花粉分析による最終氷期最盛期以降の古環境変遷. 日本第四紀学会講演要旨集 No. 21: 78–79.
- Higuera, P. E., Sprugel, D. G. & Brubaker, L. B. 2005. Reconstructing fire regimes with charcoal from small-hollow sediments: a calibration with tree-ring records of fire. *The Holocene* 15: 238–251.
- Huber, U. M. & Markgraf, V. 2003. European impact on fire regimes and vegetation dynamics at the steppe-forest ecotone of southern Patagonia. *The Holocene* 13: 567–579.
- 飯泉 茂, 編. 1991. ファイアーエコロジー—火の生態学. 200 pp. 東海大学出版会, 秦野.
- 井上 淳. 2007. 過去の植物燃焼を示す堆積物中の微粒炭. 「人類紀自然学」(人類紀自然学編集委員会編), 126–136, 共立出版, 東京.
- 井上 淳・高原 光・千々和一豊・吉川周作. 2005. 滋賀県曾根沼堆積物の微粒炭分析による約 17,000 年前以降の火事の歴史. 植生史研究 13: 47–54.
- 井上 淳・高原 光・吉川周作・井内美郎. 2001. 琵琶湖湖底堆積物の微粒炭分析による過去約 13 万年間の植物燃焼史. 第四紀研究 40: 97–104.
- Inoue, J. & Yoshikawa, S. 2003. Identification of charcoal in Quaternary sediments and estimation of the charred temperature by reflectance measurements and H/C ratio analysis and observation by reflectance and scanning electron microscopy. *Journal of Geosciences, Osaka City University* 46: 127–134.
- 井上 淳・吉川周作. 2005. 琵琶湖周辺に分布する黒色土中の黒色植物片について—黒色土中の微粒炭研究の新たな取り組み—. 第四紀研究 44: 289–296.
- Iversen, J. 1941. Land occupation in Denmark's Stone Age. *Danmarks Geologiske Undersogelse II* 66: 1–68.
- Jones, T. P., Scott, A. C. & Cope, M. 1991. Reflectance measurements and the temperature of formation of modern charcoals and implications for studies of fusain. *Bulletin of the Geological Society of France* 162: 193–200.
- Jones, T. P., Chaloner, W. G. & Kuhlbusch, T. A. J. 1997. Proposed bio-geological and chemical based terminology for fire-altered plant matter. “*Sediment Records of Biomass Burning and Global Change*” (Clark, J.S., Cachier, H., Goldammer, J.G. & Stocks, B., eds.), 9–22. Springer-Verlag, Berlin.
- Jones, T. P. & Lim, B. 2000. Extraterrestrial impacts and wildfires. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 164: 57–66.
- Laird, L. D. & Campbell, I. D. 2000. High resolution palaeo-fire signals from Christina Lake, Alberta: a comparison of the charcoal signals extracted by two different methods. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 164: 111–123.
- Long, C. J., Whitlock, C., Bartlein, P. J. & Millsbaugh, S. H. 1998. A 9000-year fire history from the Oregon Coast Range, based on a high-resolution charcoal study. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 774–787.
- Lynch, E. A., Calcote, R. & Hotchkiss, S. 2006. Late-Holocene vegetation and fire history from Ferry Lake, northwestern Wisconsin, USA. *The Holocene* 16: 495–504.
- MacDonald, G. M., Larsen, C. P. S., Szeicz, J. M. & Moser, K. A. 1991. The reconstruction of boreal forest fire history from lake sediments: a comparison of charcoal, pollen, sedimentological and geochemical indices. *Quaternary Science Reviews* 10: 53–71.
- Millsbaugh, S. H., Whitlock, C. & Bartlein, P. J. 2000. Variations in fire frequency and climate over the past 17000 yr in central Yellowstone National Park. *Geology* 28: 211–214.
- 三宅 尚・石川慎吾. 2004. 高知県中村市具同低湿地周辺における完新世の植生変遷. 日本花粉学会誌 50: 83–94.
- Mohr, J. A., Whitlock, C. & Skinner, C. J. 2000. Postglacial vegetation and fire history, eastern Klamath Mountains, California. *The Holocene* 10: 587–601.
- 中島安季子・三宅 尚・石川慎吾. 2002. 高知県中村市江ノ村における後氷期中期以降の植生変遷史. *Hikobia* 13: 713–724.
- 小椋純一. 2002. 深泥池の花粉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 22: 268–288.
- Ohlson, M. & Tryterud, E. 2000. Interpretation of the charcoal record in forest soils: forest fires and their production and deposition of macroscopic charcoal. *The Holocene* 10: 519–525.
- Rhodes, A. N. 1998. A method for the preparation and quantification of microscopic charcoal from terrestrial and lacustrine sediment cores. *The Holocene* 8: 113–117.
- 佐々木尚子. 2003. 瓶ヶ森氷見二千石原における過去 700 年間の植生景観と人間活動. 日本生態学会誌 53: 219–232.
- Sawada, Y., Sampei, Y., Hyodo, M., Yagami, T. & Fukue, M. 2000. Estimation of emplacement temperatures of pyroclastic flows using H/C ratios of carbonized wood. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 104: 1–20.

- Scott, A. C. 2000. The Pre-Quaternary history of Fire. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **164**: 281–329.
- Scott, A. C. & Jones, T. P. 1991. Microscopical observations of recent and fossil charcoal. *Microscopy and Analysis* **24**: 13–15.
- 杉田真哉・塚田松雄. 1983. 山陰地方・沼原湿原周辺における過去1.7万年間の植生変遷史. *日本生態学会誌* **33**: 225–230.
- Stähli, M., Finsinger, W., Tinner, W. & Allgöwer, B. 2006. Wildfire history and fire ecology of the Swiss National Park (Central Alps): new evidence from charcoal, pollen and plant macrofossils. *The Holocene* **16**: 805–817.
- Stocks, B. J. & Kauffman, J. B. 1997. Biomass consumption and behavior of wildland fires in boreal, temperate and tropical ecosystems: parameters necessary to interpret historic fire regimes and future fire scenarios. “*Sediment Records of Biomass Burning and Global Change*” (Clark, J. S., Cachier, H., Goldammer, J. G. & Stocks, B., eds.), 169–188. Springer-Verlag, Berlin.
- Swain, A. M. 1973. A history of fire and vegetation in north-eastern Minnesota as recorded in lake sediments. *Quaternary Research* **3**: 383–390.
- Swain, A. M. 1978. Environmental changes during the past 2000 years in north-central Wisconsin: analysis of pollen, charcoal, and seeds from varved lake sediments. *Quaternary Research* **10**: 55–68.
- Tinner, W., Conedera, M., Ammann, B., Gaggeler, H. W., Gedye, S., Jones, R. & Sagesser, B. 1998. Pollen and charcoal in lake sediments compared with historically documented forest fires in southern Switzerland since AD 1920. *The Holocene* **8**: 31–42.
- Tinner, W., Conedera, M., Ammann, B. & Lotter, A. C. 2005. Fire ecology north and south of the Alps since the last ice age. *The Holocene* **15**: 1214–1226.
- Tinner, W. & Hu, F. S. 2003. Size parameters, size-class distribution and area-number relationship of microscopic charcoal: relevance for fire reconstruction. *The Holocene* **13**: 291–296.
- 富樫 均・田中義文・興津昌宏. 2004. 長野市飯綱高原の人間活動が自然環境に与えた影響とその変遷. *長野県自然保護研究所紀要* **7**: 1–16.
- Tolonen, M. 1978. Palaeoecology of annually laminated sediments in Lake Ahvenainen, S. Finland. I. Pollen and charcoal analyses and their relation to human impact. *Annales Botanici Fennici* **15**: 177–208.
- Toney, J. L. & Anderson, R. S. 2006. A postglacial palaeoecological record from the San Juan Mountains of Colorado USA: fire, climate and vegetation history. *The Holocene* **16**: 505–517.
- 塚田松雄. 1986. 関東地方における第四紀後期の植生史. 「日本植生誌 7. 関東」(宮脇昭編), 78–103. 至文堂, 東京.
- Tsukada, M., Sugita, S. & Tsukada, Y. 1986. Oldest primitive agriculture and vegetational environments in Japan. *Nature* **322**: 632–634.
- Umbanhowar, Jr., C. E. 2004. Interaction of fire, climate and vegetation change at a large landscape scale in the Big Woods of Minnesota, USA. *The Holocene* **14**: 661–676.
- 安田喜憲. 1980. 恩智遺跡周辺の古環境の復元. 「恩智遺跡」(瓜生堂遺跡調査会編), 227–252. 瓜生堂遺跡調査会, 東大阪.
- Whitlock, C. & Larsen, C. 2001. Charcoal as a fire proxy. “*Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Vol. 3, Terrestrial, algal, and Siliceous Indicators*” (Smol, J. P., Birks, H. J. B. & Last, W. M., eds.), 75–97. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- Whitlock, C. & Millspaugh, S. H. 1996. Testing the assumptions of fire-history studies: an examination of modern charcoal accumulation in Yellowstone National Park, USA. *The Holocene* **6**: 7–15.

(2007年6月22日受理)