堆積環境指標としての有機質微化石 (パリノモルフ)

栗田 裕司^{*1}・松岡 数充^{*2}・小布施明子^{*1}

Application of organic-walled microfossils (palynomorphs) to sedimentary environmental analyses

Hiroshi Kurita^{*1}, Kazumi Matsuoka^{*2} and Akiko Obuse^{*1}

Acid-resistant, organic-walled microfossils, or palynomorphs, are common in most fine-grained sediments since early Paleozoic. They can be extremely useful in solving geological problems both biostratigraphically and paleoenvironmentally. This article provides a review on two major groups of palynomorphs, dinoflagellate cysts and pollen/spores, and their application to sedimentary environmental analyses. Palynofacies is also discussed.

key words : palynomorphs, organic microfossils, dinoflagellate cysts, pollen and spores, sedimentary environment, Cenozoic, Mesozoic

1. はじめに一有機質微化石(パリノモルフ)の定義

微化石は、化石化して地層中に保存される部分の構成物質に基づいて、大きく二分することができる。すなわち、有機質のものと鉱物質（石灰質、珪質、リン酸質など）のものとである。有機物で構成されている微化石を有機質微化石 (organic-walled microfossils) またはパリノモルフ (palynomorphs) と総称する。

有機質微化石は、その抽出方法（次項）に基づいて、「堆積物中に含まれる、酸・アルカリ等に不溶な微化石」と定義される。また有機質微化石は、堆積物中の有機物を全体として解析する立場からは、ケロジェン (kerogen = 堆積物中の酸・アルカリ等に不溶な有機物) のうち、無定形ケロジェン (amorphous kerogen) や植物の表皮・葉組織細胞 (palynodebris) などを除いた、“単体で起源生物の同定が可能なもの”と規定することもできる。

有機質微化石の起源となる生物群の種類は、原生生物界・菌界・植物界・動物界の4界にわたり、それらの生息環境も海域・汽水域・淡水域ときわめて多様である（松岡, 1994a ; 第1表）。有機質微化石の地質学的応用、とくに堆積環境復元のツールとして見た場合、そのように多様な生息環境のものを包括している点こそが重要と云える。すなわち、高等植物の花粉・胞子はデボン紀以降の地質時代でもほぼ例外なく産出する陸上植物の器官であり、また多くの原生生物は水中生活者であって、その分類群ごとに海生であるか淡水生であるかを特定しうる場合が多い。堆積物・岩石試料を前処理して調製されたプレパラート上には、これら多様な起源の有機質微化石が混在しており、その化石相（群集組成）は堆積環境をさまざまな程度に反映するものとなる。

小論では、代表的な有機質微化石である渦鞭毛藻化石（主に三疊紀～現世の堆積物に出現）および花粉・胞子化石（デボン紀～現世の堆積物に出現）の持つ古生物学的背景と、それらに基づく実際の堆積環境推定の手法と問題点について解説する。

2. 有機質微化石の抽出法

有機質微化石を得るには、通常は極細粒砂サイズ

受理 1996年10月8日

^{*1} 石油資源開発株式会社技術研究所 JAPEX Research Center
1-2-1, Hamada, Mihama-ku, Chiba 261, Japan

^{*2} 長崎大学教養部地学教室 Department of Geology, Faculty of Liberal Arts, Nagasaki University, Nagasaki 852, Japan

第1表 現世堆積物に含まれているパリノモルフ一覧 (松岡, 1994a を一部改変)

分 類 群	化石 (遺骸) として産出する部分	備 考
菌界 (FUNGI)		
菌類 (Fungi)	キチン質の菌体 (fungal body) ・ 胞子 (fungal spore)	
原生生物界 (PROTOCTISTA)		
アクリターク (Acritarch)	主に所属不明の藻類 (藍藻類も含む) の胞子	無脊椎動物の耐久卵が含まれている可能性もある
渦鞭毛藻類 (Dinophyceae)	休眠性接合子 (hypnozygote) = シスト (cyst)	
黄緑色鞭毛藻類 (Xanthophyceae)	浮遊性群体	Botryococcus 属など
緑藻類 (Chlorophyceae)	浮遊性群体	Pediastrum 属, Staurastrum 属など
ブラシノ藻類 (Plasinophyceae)	遊走子嚢	Tasmanites 属, Pterospermella 属など
車軸藻類 (Charophyceae)	卵胞子 (oospore)	
有鐘類 (Tintinnids)	殻, ロリカ	
有孔虫類 (Foraminifers)	キチン質の細胞膜 (lining)	microforaminifera と呼ばれる
植物界 (PLANTA)		
蘚苔類 (Bryophyta)	胞子	
シダ類 (Pteridophyta)	胞子・胞子嚢	
裸子植物 (Gymnospermae)	花粉, 樹皮その他	
被子植物 (Angiospermae)	花粉, 樹皮その他	
動物界 (ANIMALIA)		
扁形動物類 (Platyhelminthes)	吸虫類 (Trematoda) の卵 (キチン質?)	
線形動物類 (Nematoda)	回虫類 (Ascaridida), 鞭虫類 (Aoylamida) の卵 (キチン質?)	
環形動物類 (Annelida)	キチン質の口器	
節足動物類 (Crustacea)	鱗翅類 (Lepidoptera) の鱗片や鞘翅類 (Coleoptera) のキチン質の外骨格	
半索動物類 (Hemicordate)	偽キチン質の骨格	化石にのみ知られる筆石

以下の粒度の泥質岩あるいは石炭層などを対象として分析を行なう。泥質岩中の団塊では特に保存の良い有機質微化石が期待できる。岩石試料の最低必要量は10~20gである。

有機質微化石を固結した岩石から取り出す方法は、第四紀の半固結もしくは未固結堆積物を対象とした処理方法とは異なっている。それは大まかに、(1)無機物 (鉱物) の除去のための化学的処理 [塩酸, フッ酸など] ; (2)無機物 (鉱物) の除去のための物

理的処理 [重液分離など] ; (3)有機質微化石以外の有機物を除去するための酸化・アルカリ処理 [アセトリシス^{注1}, KOH, シュルツ氏液^{注2}など] ; (4)微化石の濃縮度向上のための機械的処理 [篩い分けなど] ; (5)その他副次的な処理 [分散剤など], などの工程から構成される。試料の性質や分析の目的に応じて、これらの工程を適宜組み合わせて最も適切な手法を用いる (島倉, 1971; 嶋崎, 1979)。石油資源開発(株)においては、有機質微化石分析にはお

おむね次のような工程を標準的に採用している。

[試料の乾燥・粉碎] → [塩酸] → [フッ酸] → [分散剤] → [重液分離 (ZnBr_2 ; 比重2.0)] → [シュルツ氏液] → [アンモニア] → [篩い分け ($12\ \mu\text{m}$)] → [プレパラート作成] → [篩い分け ($20\ \mu\text{m}$)] → [プレパラート作成]

なお、この工程は有機質微化石の濃縮度向上を前提としているので、ケロジェン全体の組成を検討する際には、重液分離の次の段階で(シュルツ氏液・アンモニア・篩い分け処理をしないで)プレパラートを作成する。

注1 $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{SO}_4 (9:1)$

注2 $\text{KClO}_3 (30\text{g}) + \text{HNO}_3 (600\text{ml}) + \text{H}_2\text{O} (300\text{ml})$

3. 渦鞭毛藻化石と堆積環境

3. 1. 渦鞭毛藻化石の概要

渦鞭毛藻化石(うずべんもうそう; fossil dinoflagellate cysts あるいは dinocysts, 単に dinoflagellates と呼ばれる)は、有機質微化石のなかでは花粉・孢子化石と並んで、分類・化石層序・古生態が最も良く研究されている化石群である。渦鞭毛藻化石は、最古の記録がシルル系から知られているものの、古生代の記録は断片的である。渦鞭毛藻化石が普遍的

に見られるのは三畳紀中期以降現世までの海成～汽水成堆積物中であり、淡水産の化石種もわずかに知られている。渦鞭毛藻の化石層序の研究は、特に1960年代から北海やオーストラリア周辺地域などにおける石油産業の拡大に伴って大きく進展し、おむね1970年代末までに、とりわけジュラ系・白亜系・古第三系における標準的な化石層序ツールとしての役割が確立された。近年では、日本国内においても主に古第三系～上部白亜系における化石層序の利用が進みつつあるほか、世界各地で漸新統上部～新第三系・第四系についての詳しい渦鞭毛藻化石層序や古環境解析手法が確立されつつある(栗田, 投稿中, 参照)。

現生の渦鞭毛藻は、多様な生態を示すことが知られている。現生渦鞭毛藻は、光合成バクテリアや珪藻に次ぐ海洋の一次生産者であり、食物連鎖の重要な担い手である。また渦鞭毛藻は、夜光虫と称される種を含むほか、沿岸域で発生する有害な赤潮の主要原因生物の一員でもあり、さらにサンゴ虫と共生する褐虫藻など他の生物の共生・寄生生物として生活するものも多く知られている。

渦鞭毛藻化石はほぼ例外なく、浮遊性の渦鞭毛藻がその生活環中に形成する休眠性接合子

第1図 シストを形成する現生渦鞭毛藻における生活環モデル (Evitt, 1985を改変)

(hypnozygote) = シスト (resting cyst または単に cyst ; 休眠胞子) が化石化したものである (第 1 図). 現生渦鞭毛藻にはシストを形成しない種も数多く存在するので, 渦鞭毛藻の化石記録はこの生物群の一部のみを代表していることに留意しなければならない.

3. 2. 渦鞭毛藻化石の分布

現在の海洋堆積物の研究によれば, 渦鞭毛藻シストは沿岸域から外洋底まで, あるいは極域から赤道域まで, ほとんどすべての海域から産出が記録されている (Wall et al., 1977; Harland, 1983). 従来の解釈では, 現生の渦鞭毛藻シストは外側陸棚から斜面上部の環境に最も卓越しており, 基本的に渦鞭毛藻化石は, 陸棚域に卓越する化石群であると考えられてきた.

一方最近の生態学的研究では, シストが最も多く生産される場合は沿岸域であることが明らかにされており, 例えば温帯の内湾では表層堆積物 1 g あたり 10^4 個オーダーのシストが観察される (松岡・竹内, 1995 など). シストの生活環上の位置づけ, あるいはシストを形成する多くの渦鞭毛藻が光合成をすることから見れば, 主なシストの形成場を有光帯が海底と接する沿岸域と考えることは自然である. また渦鞭毛藻シストのサイズや質量を考慮すれば, ごく表層に分布するシストは底層流やストームによって容易に移動するであろうことが推察される. したがって, 比較的深い環境の堆積物に含まれる多くの渦鞭毛藻シストの分布は, 二次的な移動や分級の効果を強く受けている可能性が高い. 現生の渦鞭毛藻シストの分布には, 他の多くの生物 (化石) 群と同様, 基本的に沿岸-外洋方向と緯度方向との, 2 つの群集変化傾向があるとされており, 最近では, 現生渦鞭毛藻の種レベルの生態情報を基礎にした完新世の海洋底堆積物の群集解析に基づく古環境復元の試みもなされるようになった. しかし上述のように, 堆積物中に記録されたシストの分布は, 他の微化石と同様に必ずしも本来の生息域を忠実に反映していないことが予想されるため, この化石群集に基づく古環境解析手法にも一層の検討が必要であろう.

このように, 渦鞭毛藻シストの分布に関してはいまだ検討すべき問題点が多いのが現状で, 特にこれまで厳密に考察されてこなかったシストの生産域と堆積域との区別が課題となっている. 今後は表層堆

積物の解析だけでなくセディメントトラップの解析 (松岡, 1989; Dale, 1992) なども含め, タフォノミーの視点からの研究の進展が望まれる.

また, 先第四系に産する渦鞭毛藻化石の大多数は絶滅種であり, その古生態学的なアプローチは, 二次的移動効果の復元の困難さも加え, 現段階では一層の困難を伴う. 実際のところ, 後述するような, 群集のおおまかな組成に基づく比較的単純な古生態・古環境モデルがいくつか提示されているに過ぎない.

3. 3. 渦鞭毛藻化石の応用例 (1) : 海成環境の指標としての渦鞭毛藻化石

渦鞭毛藻化石を堆積環境の解析に応用するうえで最も単純な利用法は, 渦鞭毛藻化石の大多数が海生であり, 淡水生のものは区別が可能である, という性質を利用して, 地層が海成層であるかどうかを確認するための指標として用いることである. Sweet and McIntyre (1988) は, カナダ Western Interior の大規模な石油貯留層として知られる沿岸-海浜成の上部白亜系 Cardium 層を対象に, 渦鞭毛藻化石の産状に基づいて, 同層の堆積にどの程度海成環境が関与しているのかを明らかにした. 栗田・小布施 (1994) は北海道北部の古第三系羽幌層からの渦鞭毛藻化石の産状を記載し, 夾炭層である同層の少なからぬ部分が海成層であることを示した.

3. 4. 渦鞭毛藻化石の応用例 (2) : 海進-海退サイクルと渦鞭毛藻化石群集

渦鞭毛藻化石群集の層位的な変化が, 海進-海退サイクルと呼応して記録される場合がある.

松岡 (1992b; Matsuoka, 1994b) は対馬・三根湾の湾奥部で採取された過去約 1 万年間の堆積物の連続コアについて渦鞭毛藻化石群集を検討し, 海水の侵入とともに渦鞭毛藻化石の種数・個体数がともに増加し, 約 6,000~5,000 年前にピークに達してその後減少すること, そのピークが完新世の climatic optimum = 縄文海進のピークに対応すること, 種数・個体数以外に, 群集組成も海洋環境の変化に対応すると思われる層位変化を示すこと, などを示した (第 2 図).

さらに古い時代の群集変化を堆積環境の変化と関連づけ, ある程度のモデル化をはかった例として, 次の研究例がある. 北米 Western Interior 西縁部の上部白亜系では, 海進-海退サイクルに伴って非海

第2図 対馬・三根湾湾奥部における渦鞭毛藻シストの種数および産出個体数の層位的変化
(松岡, 1992b; Matsuoka, 1994b を一部改変)

成層と海成層が大規模な指交関係で発達しているが、Harland (1973) はそのなかでシャンパーニュ期の高相対海水準期堆積物であり主に単調な海成泥岩から成る Bearpaw 層の渦鞭毛藻化石群集を検討し、同層基底部では海進に対応して群集の多様度が上方へ急増すること、最も多様度の高い群集が同層の下部にあっておそらく最大海進を示すこと、同層上部では多様度や産出頻度が多少の変動を伴いつつ漸減し、ゆるやかな海退を示すこと、などを示した。さらに、渦鞭毛藻化石のなかで、より内湾性のグループとより外洋性のグループが識別でき、その比率が古水深のおおまかな指標として利用できるとした。Kurita and McIntyre (1994) は同じ Bearpaw 層を異なるセクションで分析し、Harland (1973) の結論を追認している。一方 Goodman (1979) は、北米東海岸の始新統の渦鞭毛藻化石群集を検討し、群集の多様度を表す簡単なパラメータが堆積サイクルを良く反映すると報告した。以上の研究例では、いずれも海進初期および海退期の海洋環境の不安定さ

が、渦鞭毛藻化石記録によく反映されていると云える。

4. 花粉・孢子化石と堆積環境

4. 1. 花粉・孢子化石群集を規定する古環境要因

花粉・孢子化石は、大部分が陸上ないしは河川・海岸付近に生息する高等植物の一生殖器官であり、その群集は多かれ少なかれ本質的に異地性が強い。その群集内容を規定する古環境要因は大きく見て2つあり、ひとつは後背地の森林植生（間接的に古気候を示す）、他のひとつは花粉・孢子のタフオノミーすなわち飛散・運搬・沈積様式（狭義の堆積環境と関連する）である。花粉・孢子化石群集の形成には、その両者が複雑に関与している。

花粉化石組成を後背地の森林植生と関連づけて考えることは、いわゆる「花粉分析」（主に第四系を対象とする花粉化石に基づく古植生・古環境解析および地層対比）の基本原理である。例えば現在の日本周辺では、森林植生として亜寒帯林・冷温帯林・

中間温帯林・暖温帯林などが区分されている。このような現在の生態学的な区分をひとつの目安とし、現世堆積物中の花粉組成と後背地の森林植生の比較、および各森林帯における代表的な花粉の産状パターンとの関係を基礎に、花粉化石群集から後背地の森林植生を復元・推定する。

非海成層中での花粉・孢子化石のタフオノミーは、個々の植物の花粉生産量・飛散力と、主に大気（風）および河川水による運搬作用に規定される。ある群集は比較的現地性の強い局地要素と、比較的異地性の強い広域要素とがさまざまに混交していると考えられる。特定の堆積環境を示す局地要素が検知されれば、局地的な環境復元の手掛かりとすることができる。

海成層中の花粉・孢子化石のタフオノミーは、運搬や沈積過程の影響を一層強く受ける。例えば、海岸から最も遠い山地域の植物の花粉が、飛散距離が大きいかつ海水中で浮遊しやすい形態を持っている場合、その花粉の海成層中での相対的産出頻度は沖合いで最も高くなる。このような現象は“Neves effect”と呼ばれている（第3図）。Kuroda et al.

（1988）は、相模湾の海底表層堆積物中の花粉・孢子化石の群集組成を調査し、そのような現象を、化石粒子の運搬様式・浮力・海流・離岸距離等と群集変化との関連において考察している。それによれば、(1)主に河川水で運搬され、木本（樹木）花粉一般に比べて生産量が少ない草本植物（例えばイネ科・キ

ク科など）やある種のシダ植物などの花粉・孢子化石は、河口付近など流入河川の影響が強い場所に多く堆積し、岸から離れるに従って著しく減少する。

(2)相対的に高い浮游力を有するような花粉・孢子化石（例えばマツ属・ウラジロシダ属など）は、風や河川水で運搬された後に沈積に時間を要するため、広い範囲に運搬され、岸から遠いところで相対的に産出比率が高くなる場合がある。(3)相対的に浮游力が小さいもの（例えばカシ属・ハンノキ属など）は、沈積に要する時間が短く、それを反映した分布を示す。

4. 2. 花粉・孢子化石群集に基づく古植生／古気候の復元

花粉化石組成の層位変化から後背地の古植生変化を推定し、さらに古気候変化に結びつける研究は、特に第四紀の陸上の古環境復元に有力な手法として広く行われている。このような研究には、新しい時代の連続的な堆積記録が得やすい湖沼堆積物がしばしば対象となる。対象とする湖沼の水系の面積などにもよるが、湖沼堆積物の場合は海成堆積物に比べて局地要素化石が比較的多く含まれるため、細かな局地的植生変動が捉えやすい。そのような研究例は数多くある。これに対し、Heusser（1990）は鹿島沖・九州沖それぞれ約1,000km 沖合いの太平洋底で採取された過去約15万年間の堆積物のコアの花

第3図 “Neves effect”を概念的に示すダイアグラム（Traverse, 1988を改変）

本の植生がおおむね温帯的であるとともに、氷期一週氷期サイクルに従った大局的な植生変化が存在したと述べた。この議論は、花粉化石の異地性を逆に利用し、海洋底堆積物の花粉化石群集は陸域の非常に広範な森林植生を反映している、という前提に立っている。

第四系を対象とした花粉分析と同様な古気候解釈を目指す手法は、鮮新—中新統についても行なわれるが、扱う地質学的時間の長さが第四紀に比べて極めて長いこと、特に日本の場合は化石の保存程度が劣る場合が多いこと、現生花粉との生物学的関係が確実に判明するタクサが減少すること、他の年代キャリブレーションが得にくいこと、などの理由により、第四系を対象にする場合よりも困難が増す。特に海成相の場合は Neves effect の見積もりが難しく、解釈の不確実性が増す。しかしながらこの分野での研究も少なからぬ実績があり、例えば、現在の熱帯から亜熱帯地域に生育するマングローブ植物の花粉化石群の検出によって中新世の古気候解明に寄与した例（山野井ほか，1980；Itoigawa and Yamanoi, 1990）は良く知られているほか、藤（Fuji, 1969；藤・堀，1989など）は花粉化石組成に基づいて北陸地域の新第三紀古気候・古地理を論じており、佐藤（1992）は花粉化石に基づいて“中新世最温暖期”を検討している。また、花粉化石のみではなく、他の大型植物遺体群集とを合わせた総合的な化石相に基づいて中新世の古気候を論じた研究もあり、先第四紀における花粉化石の利用のひとつの方向を示している（Matsuoka, 1990）。なお古第三紀以前の年代においては、現生タクサと化石タクサの関連が一層希薄になるため、現生植生とのアナロジーを基礎とする方法は適用が非常に困難となる。

5. 有機質微化石相 (palynofacies)

5. 1. 有機質微化石相とは

前項までに、渦鞭毛藻化石と花粉・孢子化石という個々の分類群の解釈に基づく堆積環境の推定について述べたが、最初に記したように、我々が用いている分析手法では、これらの有機質微化石はすべて同じプレパラート上に混在した状態で観察される。個々の分類群の枠を超えた、有機質微化石全体としての相を有機質微化石相 (palynofacies) と呼ぶ。

有機質微化石相の意味するものは、試料の前処理段階における有機物濃縮の手法によって多少異なる。すなわち、有機物濃縮の手段として酸化（アセ

トリシスやシュルツ氏液など）・アルカリ（KOH など）処理を施している場合は、無定形有機物、フミン質や樹脂、あるいは脆弱な有機質微化石などが溶解除去されており、その残渣の示す相は、堆積物中の有機物質のうちからかなりの程度選択的に濃縮された有機質微化石の相対的産出頻度を反映している。一方、酸化・アルカリ処理を経ない有機質残渣の示す相は、堆積物中に本来存在した有機物全体の組成に、より近いものとなる。この残渣は、有機地球化学的に定義された“ケロジェン”（に可溶性ピチュメンなどを加えたもの）とほぼ一致する。有機質微化石相全般に関しては、最近相次いで大部の教科書が出版されている（Traverse, 1994；Tyson, 1995）。

5. 2. 有機質微化石相に基づく堆積環境の推定

有機質微化石相に基づく堆積環境の推定は、個々の分類群内での組成の検討はさておき、海生生物起源物 [海生藻類・環形動物器官・有孔虫ライニングス（キチン質内膜）など]、淡水生生物起源物 [淡水生藻類など]、陸上高等植物起源物 [花粉・孢子・表皮／葉組織細胞・炭化有機物など] など、高次の分類群間での組成の検討を基礎とする。それぞれ起源が明らかな粒子の産出比率は、堆積環境を間接的に反映していると考え（もちろん無定形有機物などの起源不明物も含まれている）。松岡（1992a）が示した、西九州・平戸島における完新世堆積物の有機質微化石相において、現在の地表に向かって海生の要素（渦鞭毛藻化石や有孔虫ライニングスなど）が消滅する層位変化は、有機質微化石相に現れた海退現象のわかりやすい例である（第4図）。

非海成相・沿岸相・陸棚相が繰り返し互層するような地質断面では、微化石相のコントラストが捉え易いため、有機質微化石相に基づく堆積環境解析は特に有効である。石油産業界ではそのような利用が広く行われており、微化石相のサイクル性（これを Powell, 1992, は biofacies cycle と呼んでいる）に基づく地層対比も広く用いられている。この手段は、より限定的な堆積環境を指示する微化石が含まれるような場所・層準ではさらに有効であり、その典型的な例は、熱帯～亜熱帯地域の低塩分沿岸域に生育するマングローブ植物の花粉化石の利用に見られる。すなわち、マングローブ植物花粉は形態的に他の種類から識別可能であり、その多産は河口～潮間帯環境の良い指標となる。これを鍵相（key

第4図 西九州・平戸島の完新世堆積物の有機質微化石相に記録された海退 (松岡, 1992a)

biofacies) として、その上下の有機質微化石相変化を解釈すれば、海進-海退サイクルの認定をより確実に行うことができる。例えば、タイ湾からマレー半島沖の大陸棚などに広がる新生代の非海成相卓越堆積盆での石油探鉱においては、有機質微化石相の検討が必須の分析項目となっており、マングローブ植物の花粉化石の検出が大きな役割を果たしている。石油産業での応用例が公表される例はきわめて稀であるが、ここでは、カリマンタン東岸のマハカム三角州上で掘削された学術ボーリングの有機質微化石相分析に基づき、鮮新統上部から完新統に至る堆積記録中にいくつかの海進イベントを見いだした例を挙げる (Caratini and Tissot, 1988)。このセクションの有機質微化石相には、日本の縄文海進にあたる完新世海進のピーク (約5,000年前) が明瞭に認められる (第5図)。

第5図 カリマンタン島東岸・マハカム三角州における鮮新統上部-完新統の有機質微化石相に見られる堆積サイクル (Caratini and Tissot, 1988)

5. 3. 有機地球化学との接点

上述したように、適当な前処理法を選択すれば、有機質微化石相の解析は、地球化学的手法で検討されうる堆積性有機物 (ケロジェン) を、視覚的・形態的に検討するという意味も持つ。形態的な情報を用いることにより、有機質堆積粒子の起源とその存在比率をある程度まで推定することができるため、堆積性有機物を単にバルクで扱うよりも、地球化学的パラメータの地質学的なあるいは古環境解析上の意義を、一層詳細なスケールで論じることができ

る。そのようなアプローチは国内でも既にいくつか公表されている（沢田・秋山，1994など）。

顕微鏡を用いて堆積性有機物の構成粒子ごとの起源を推定するという研究は、古植物学の観点を出発点とし、石炭の研磨面の反射光観察を中心とした石炭組織学（coal petrology）として早くから発展してきた。石炭組織学は石炭化作用に伴って変質した有機物を扱うため、マセラル（maceral）と呼ばれる単位を基礎に置く独特な有機物分類法を用いてきたが、近年、有機質微化石相分析のように石炭以外の dispersed organic matter（あるいはケロジェン）を透過光で観察する手法が普及してからは、石炭組織学・古生物学・有機地球化学それぞれの手法の相互交流が進み、石炭組織学は有機組織学（organic petrology）としてより広範な対象を扱う分野に変化している。また、有機質微化石相の解析は、有機物の石油根源物質としての特性に基づく特殊な分類手法を用いて、直接に石油根源岩能力を評価するための地球化学的パラメータとしても用いられている（ビジュアルケロジェン法，ケロジェンタイピングなどと呼ばれる；嶋崎，1986）。このような意味で、有機質微化石相は、有機地球化学・古生物学・堆積相解析などの諸分野をリンクする学際的なツールであるともいえる。

6. 有機質微化石の利点・弱点

6. 1. 有機質微化石の利点

地質学的応用を考えた場合の、有機質微化石の特有の利点は以下のようにまとめられる。

- 陸生生物や海生生物由来の有機質微化石が示す広範な古環境情報を、ひとつの分析手法で同時に得ることができる。したがって堆積環境解析の対象レンジが広い。
- 対象としうる試料の地質時代レンジが長い（古生代から現世まで）。
※藻類起源と思われる有機質微化石（アクリタルクス）は先カンブリア系からも産するので、その適用範囲は先カンブリア紀までさかのぼりうる可能性がある。
- 河口～沿岸成の地層も解析できる。
- 少量の試料でも分析可能である。
- 試料の風化の影響を比較的受けにくい
- 珪質岩など堅硬な岩石も処理できる

6. 2. 有機質微化石の弱点

一方、有機質微化石の弱点は以下のようにまとめられるが、これらは多かれ少なかれ微化石全般に共通することであり、必ずしも有機質微化石に固有の弱点ではない。

- 有機質微化石の示す情報は、堆積環境と一対一には対応しない（一対多である）。
- タフオノミーが複雑で、理解が充分には進んでいない。
- 特に先第四系試料では、データの定量化が難しい。
- 前処理がややコスト高である（劇薬を多く使用する、高度な熟練を要する、工程が多い、時間がかかる）。

7. 今後の課題

前項に述べたように、有機質微化石（相）から推定される堆積環境は、必ずしも一義的には決まらない。むしろほとんどの場合、他の多くの古環境パラメータの利用と同様に、全体の様子を考慮して複数の可能性のなかから解釈しなければならない。個々の事例に対する解釈の精度を上げるためには、いうまでもなく複数の独立なパラメータの併用が有用であり、有機質微化石も、総合的な検討のなかでひとつの制約を与えるためのツールとして利用するのが最も効果的であろう。

また、有機質微化石じたいの解釈のノウハウを蓄積するためにも、他の古環境パラメータ（他の微化石・堆積相解析・有機地球化学など）との比較によるキャリブレーションを、積極的に推進する必要がある。例えば、先第四紀の河口システムや潟など汽水域での有機質微化石相の特質は、充分明らかにされているとはいいがたく、海進サクセッション中でどの層準から海水が侵入したか、というような課題の考察のためにはそのような基礎資料の蓄積が望まれる。また、第三紀以前の絶滅渦鞭毛藻化石の古生態は、他の環境パラメータとの比較対照なしには推定が難しい。

先第四紀の有機質微化石の研究者は国内には少なく、堆積環境解析への応用は緒についたばかりである。有機質微化石の利用が70～80年代にブームだった欧米と比べると、日本の状況の立ち遅れは大きい。他の分野との協同作業を通じて、地質学的応用を一層進めていきたい。

謝 辞 石油資源開発株式会社には、本稿の公表を

許可していただいた。秋葉文雄氏には原稿を読んでいただき有益なご指摘をいただいた。記して感謝する。

文 献

- Caratini, C. and Tissot, C., 1988: Paleogeographical evolution of the Mahakam Delta in Kalimantan, Indonesia during the Quaternary and Late Pliocene. *Rev. Palaeobot. Palynol.*, **55**, 217-228.
- Dale, B., 1992: Dinoflagellate contributions to the open ocean sediment flux. In Honjo, S., ed., *Ocean biocoenosis*, **5**, 1-32, Woods Hole Oceanogr. Inst. Press.
- Evitt, W. R., 1985: *Sporopollenin dinoflagellate cysts: their morphology and interpretation*. 333p., American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation, Dallas.
- Fuji, N., 1969: Fossil spores and pollen grains from the Neogene deposits in Noto Peninsula, central Japan-I; A palynological study of the Late Miocene Wakura Member. *Trans. Proc. Palaeont. Soc. Japan, N. S.*, **73**, 1-25.
- 藤 則雄・堀 みより, 1989: 富山県福光地域の新第三系の花粉学的研究—北陸新第三系の花粉学的研究(6)—. 金沢大学教育学部紀要, 自然科学, **38**, 79-91.
- Goodman, D. K., 1979: Dinoflagellate 'communities' from the Lower Eocene Nanjemoy Formation of Maryland, USA. *Palynology*, **3**, 169-190.
- Harland, R., 1973: Dinoflagellate cysts and acritarchs from the Bearpaw Formation (Upper Campanian) of southern Alberta, Canada. *Palaeontology*, **16**, 665-706.
- Harland, R., 1983: Distribution maps of Recent dinoflagellate cysts in bottom sediments from the North Atlantic Ocean and adjacent seas. *Palaeontology*, **26**, 321-387.
- Heusser, L. E., 1990: Northeast Asian pollen records for the last 150,000 years from deep-sea cores V28-304 and RC14-99 taken off the Pacific coast of Japan. *Review Palaeobot. Palynol.*, **65**, 1-8.
- Itoigawa, J. and Yamanoi, T., 1990: Climatic optimum in the Mid-Neogene of the Japanese Islands. In Tsuchi, R., ed., *Pacific Neogene Events*. 3-14, Univ. Tokyo Press, Tokyo.
- 栗田裕司, 投稿中: 渦鞭毛藻化石の石油探鉱への利用. 石油技協誌.
- Kurita, H. and McIntyre, D. J., 1994: Dinoflagellate assemblages and depositional environments of the Campanian Bearpaw Formation, Alberta. *Geol. Surv. Can. Bull.*, **479**, 67-83.
- 栗田裕司・小布施明子, 1994: 北海道北部, 羽幌層の古第三紀渦鞭毛藻化石・花粉化石とその地質年代および堆積環境. 地質雑, **100**, 292-301.
- Kuroda, T., Arita, M. and Furukawa, H., 1988: Palynological study of the surface sediments of Sagami Bay, with special reference to the dispersal pattern of pollen and spores and their transportation mechanism. *Bull. Coll. Sci., Univ. Ryukyus*, **46**, 77-121.
- 松岡數充, 1989: 日本海溝セジメント・トラップ JT-02試料中のパリノモルフ群集. 月刊海洋, **21**, 232-238.
- Matsuoka, K., 1990: The early Middle Miocene inland paleoclimate around the central Kinki, southwest Japan. In Tsuchi, R., ed., *Pacific Neogene Events*, 15-22, Univ. Tokyo Press, Tokyo.
- 松岡數充, 1992a: 西九州・平戸島における約6,000年前以降の古環境変遷. 日本花粉学会誌, **38**, 1-11.
- 松岡數充, 1992b: 海産パリノモルフ化石群集からみた対馬・三根湾における完新世の沿岸海洋環境の変遷. 第四紀研究, **31**, 147-157.
- 松岡數充, 1994a: 海産パリノモルフ化石とその研究の現状. 第四紀研究, **33**, 189-203.
- Matsuoka, K., 1994b: Holocene dinoflagellate cyst assemblages in shallow water sediments of the Tsushima Islands, west Japan. *Rev. Palaeobot. Palynol.*, **84**, 155-168.
- 松岡數充・竹内照文, 1995: 野外観察結果に基づく *Alexandrium catenelle* (Whedon et Kofoid) Balech の栄養細胞, 運動性接合子と休眠性接合子の生産量. 化石, **59**, 32-46.
- Powell, A. J., 1992: Making the most of microfossils. *Geoscientist*, **2**, 12-16.
- 佐藤誠司, 1992: 日本における"Mid Neogene climatic optimum"について. 化石, **53**, 7-19.
- 沢田 健・秋山雅彦, 1994: ケロジェンのマセラル

- 分離と炭素同位体組成. 石油技協誌, 59, 244-255.
- 島倉巳三郎, 1971: 花粉分析法に関する2・3の問題. 奈良教育大紀要, 20, 55-61.
- 嶋崎統五, 1979: 花粉分析処理法(篩使用)の紹介. 日本花粉学会誌, 23, 33-45.
- 嶋崎統五, 1986: 石油探鉱におけるビジュアルケロジェン分析法とその応用. 田口一雄教授退官記念論文集, 269-302.
- Sweet, A. R. and McIntyre, D.J., 1988: Late Turonian marine and nonmarine palynomorphs from the Cardium Formation, north-central Alberta Foothills, Canada. In James, D.P. and Leckie, D.A., eds., *Sequences, stratigraphy, sedimentology: surface and subsurface*. Can. Soc. Petrol. Geol., Mem., 15, 499-516.
- Traverse, A., 1988: *Palaeopalynology*. Unwyn Hyman, Boston, 600p.
- Traverse, A., 1994, ed.: *Sedimentation of organic particles*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 544p.
- Tyson, R. V., 1995: *Sedimentary organic matter: organic facies and palynofacies*. Chapman & Hall, London, 615p.
- Wall, D., Dale, B., Lohmann, G.P. and Smith, W.K., 1977: The environmental and climatic distribution of dinoflagellate cysts in modern marine sediments from regions in the North and South Atlantic Oceans and adjacent seas. *Marine Microbial.*, 2, 121-200.
- 山野井 徹・津田禾粒・糸魚川淳二・岡本和夫・田口栄次, 1980: 西南日本の中新統中部から発見されたマングローブ林植物について. 地質雑, 86, 635-638.

堆積環境指標としての有機質微化石 (パリノモルフ)

栗田 裕司・松岡 数充・小布施明子

酸に不溶な有機質膜を持つ微化石, すなわち有機質微化石は, パリノモルフとも呼ばれ, 顕生代のほぼすべての層準の泥質岩中に普遍的に産する. 有機質微化石の利用は, 化石層序・古環境解析の双方の面において地質学的な問題の解決に大きく貢献しうる能力を持つ. 本論は, 有機質微化石の主要な2グループである渦鞭毛藻化石と花粉・孢子化石について, 堆積環境指標としての利用の現状を総説する. また, 有機質微化石相の利用についても触れる.