

殻の化学：浮遊性有孔虫が記録する環境シグナル

木元克典

(独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域)

キーワード：浮遊性有孔虫、古海洋学、パレオプロキシ、微量元素

浮遊性有孔虫は、約 1 億 7 千万年前のジュラ紀中期頃に地球上に誕生し、現在まで世界の海洋に生息する原生動物プランクトンである。網状の仮足を有し、ケルコゾア、放散虫などと同じ Rhizaria に属するが、炭酸カルシウム（方解石）の外骨格を有することが最大の特徴である。数十ミクロンから 1 ミリメートル程度の大きさのものほとんど、現生種ではその骨格形態の違いによって約 40 種に分けることができる。海洋表層から有光層最下部までにほとんどの種類が分布するが、数百メートルのより深い水深にも生息するものもいる。また平面的な分布は赤道を中心として海洋の表層水温とほぼパラレルな分布を示すことから、その分布は水温がもっとも強く関係していることが明らかになっている。

彼らの作り出す炭酸カルシウムの骨格は、死後沈降し、海底に連続的に堆積する。炭酸塩が化学的に溶解してしまう水深（炭酸塩補償深度 / CCD、太平洋で水深約 4,000m 付近）よりも浅い海底では、浮遊性有孔虫や円石藻など炭酸塩の骨格をもつプランクトンの遺骸からなる軟泥が覆っており、それは全海洋の約 6 割の面積に及ぶ。この軟泥のほとんどは浮遊性有孔虫からなり、炭素を中心とした海洋の物質循環に大きな貢献をしているといえることができる。

この浮遊性有孔虫骨格は、過去の海洋環境を明らかにする学問「古海洋学」(Paleoceanography)において極めて重要な役割を果たす。浮遊性有孔虫が骨格を形成する際、そのもととなる元素はまず海水中から生体内に取り込まれ、細胞内を経て炭酸カルシウムとして最終的に沈着されるが、その化学組成比は周囲の海水の物理化学条件に束縛される。すなわち、浮遊性有孔虫は海洋環境を強く反映した骨格を形成する。それぞれの条件でどのような組成の骨格を形成するかが分かれば、その化学組成から間接的に過去の海水の状態を復元することが可能となる。このような浮遊性有孔虫を用いた過去の海洋環境代替指標（パレオプロキシ、Paleo-proxies）によって、過去数千万年間にわたる地球の表層環境が具体的に明らかにされてきた。

浮遊性有孔虫を用いた古環境復元のメリットは おおきく 2 つある。ひとつは汎世界的に分布するため同じ種を用いた遠隔地同士の対比が可能であること、もうひとつは海洋の表層から中層にかけて深度分布しているため、それぞれの種類を分析することによって海洋表層の三次元構造を復元できる可能性があることである。これまでに多くのパレオプロキシが提案されているが、基本的な物理条件である水温指標の開発が先行している。もっとも代表的なものは骨格中の酸素安定同位体比 (^{18}O) であり、同位体温度計として半

世紀以上にわたって用いられている。浮遊性有孔虫骨格と海水の間では同位体平衡が成立しており、骨格と海水の酸素同位体比の分別係数は水温に依存するため水温計として利用できる。また海水の酸素同位体比は塩分の関数でもあるため、水温情報を独立に与えることによって過去の塩分も復元することが可能となる。

骨格中の微量元素もパレオプロキシとして有効であり、活発な研究が行われている。例えばマグネシウムとカルシウムの濃度比 (Mg/Ca) は、それが形成された水温に依存して変化することが知られ、独立した水温指標として有望視されている。海洋の化学的性質を示すものとしてはリチウム (Li)、ストロンチウム ($^{87}Sr/^{86}Sr$)、ネオジウム同位体比 ($^{143}Nd/^{144}Nd$) などがある。ネオジウム同位体比は海盆スケールでその値がごくわずかに異なるため、海水の起源を示す指標として近年研究が急速に増加している。ボロン同位体比 (^{11}B) は環境中の pH に強く依存するため、過去の海水の pH 計として期待されている。水柱中での滞留時間が短いいくつかの元素（カドミウム (Cd)、バリウム (Ba)、亜鉛 (Zn) など）は海水中のリン酸塩濃度とよく似た挙動を示すため、骨格中にごくわずかに含まれるこれらの元素濃度は海水中のリン酸塩濃度を間接的に示す指標となりうる。

しかしながら、上記のようなパレオプロキシのすべてが盤石ではなく、ときには観測される環境パラメータと必ずしも一致しない結果をもたらすこともある。たとえば近年レーザーアブレーション ICP 質量分析や、二次イオン質量分析計 (SIMS) の発展によって有孔虫骨格の元素の三次元分布が知られるようになったが、これらの研究で明らかにされたことは、骨格中の元素は必ずしも均質に分布している訳ではないということであった。このような元素の不均質性は、浮遊性有孔虫のライフサイクルに起因する生息水深の変化による現象のみならず、代謝あるいはバイオミネラリゼーションに関係した複雑なプロセスを経由することによるものである可能性が高い。パレオプロキシを理解するためには骨格形成過程についての基礎的研究を積極的に推進する必要があるといえるだろう。

講演では、演者がこれまで行ってきたプランクトンネット観測で得られた試料や、ピストンコア（柱状海底堆積物）試料を解析した結果を例に、浮遊性有孔虫の化学分析とその現状、問題点などについて議論したい。