石灰泥の成因, 特に生物骨格の離解と微生物による穿孔作用の重要性

The origins of lime mud, with special notes on the significance of maceration of organic skeletons and boring by endolithic micro-organisms

Abstract

沖村雄二* 藤澤昭子*
狩野彰宏*

Yuji Okimura, Akiko Fujisawa*
and Akihiro Kano**

1995年9月7日受付.
1995年10月2日受理.

* 広島大学理学部地球惑星システム学科.
Department of Earth and Planetary Systems
Sciences, Faculty of Science, Hiroshima
University, Higashi-hiroshima 739, Japan

The paper reviews the origins of lime mud and discusses the role of maceration of calcitic skeletons and biochemical erosion by endolithic micro-organisms in the production of lime mud, with an emphasis upon several examples of boring of modern ooids and skeletal particles. We also discuss favorable environments for the production of lime mud by these mechanisms.

The maceration of calcitic skeletons results in their disintegration into minute crystal particles, best exemplified by the degradation of green algal thalli into aragonite needles, and is most prominent in tropical to subtropical shallow-marine environments. The endolithic micro-organisms, including algae, fungi, and bacteria, biochemically bore surfaces of calcitic particles and substrates. The in-site precipitation of micrite cements in the boreholes results in the micritization of bored surfaces in places where seawaters are oversaturated with respect to calcium carbonate. The mechanical exfoliation of severely bored and micritized surface layers produces lime mud. The micro-borings by endolithic organisms prevail in a wide range of marine environments from a shallow, photic zone to a great water-depth. The boring effect by the endoliths enhances the degradation of calcitic particles and substrates through the maceration and mechanical abrasion.

The maceration is a predominant and effective disintegration mechanism where green algae flourish. The eutrophic condition and low sedimentation rate are favored by the prevalence of boring by endoliths and associated micritization.

Key words : lime mud, maceration, bioerosion, micritization, endolithic organisms, Persian Gulf, Bahama Bank, Hamelin Pool

は じ め に

石灰岩の主要な構成要素である石灰泥 (lime mud) はさまざまな環境で, さまざまなメカニズムにより生成する. 石灰泥の成因を探ることは, 炭酸塩堆積学における大きな課題のひとつである. これまで多くの研究者が石灰泥の成因について研究し言及してきた. しかし, 多彩な環境での多様な石灰泥の形成メカニズムのすべてが十分なデータとともに研究され, 解明されているわけではない. 石灰泥の成因を研究する際の困難さの原因はさまざまであるが, 簡単にいうと, 粒径が小さいことに加えて, 異なる成因を持つ石灰泥の粒径, 形態, 組織などの特徴が互いに類似しているため, 起源を特定するのが極めて難しいという点に集約されると考えられる. 例えば, この困難さはバハマバンクという現在みられる浅海炭酸塩堆積場での石灰泥の場合についてみてもらうことができる. バハマ泥 (Bahamian mud) と呼ばれる石

灰泥を構成する針状のアラゴナイト結晶の成因については, これまで針状アラゴナイトを, 海水からの沈殿物とみなす考えと細粒化した緑藻類骨格に由来するとみなす考えの2つの立場での論争が続いており, いまだに決着をみていない. それは形態的には針状のアラゴナイトが緑藻類骨格を構成する結晶とみることができるし, 一方で海水から無機的に沈殿するアラゴナイトセメントとも類似していることによる. また, バハマ泥の微量元素含有量や炭素安定同位体を扱った研究も, 結局はその成因を明らかにすることはできなかった.

石灰泥の成因およびその地質学的・堆積学的意義を理解するためには, 石灰泥の生成環境・メカニズムと形態的特徴, 粒径, 組織, 産状などの関連づけを正確に行うことが必要である. 本論ではまず, 石灰泥の成因に関する従来の研究をレビューする. 次に石灰泥の多様な成因のなかで, 特に離解作用および微生物の穿孔作用による生物骨格の細粒化に注目し, 筆者らの観察結果の紹介を交えて, 石灰泥生成の環境と

Table 1. Divisions of different origins of lime mud (modified after Flügel, 1982).

Origins	Divisions
1) Purely chemical precipitation	Automicrite
2) Assimilation by plants	(Formed by change
3) Bacterial action	in water chemistry)
4) Tests of micro-organisms	
5) Detritus from mechanical erosion	Allomicrite
6) Maceration of organic skeletons	(Originated from
7) Bioerosion by macro-organisms	organic skeletons)
8) Borings by endolithic micro-organisms	
9) Cryptocrystalline cement	Pseudomicrite
10) Compaction of peloids	(Formed after
11) Calcretes and vadose silt	carbonate deposition)

メカニズムについて議論する。

石灰泥の分類と成因

石灰泥 (lime mud) は粘土—シルト径 (径 $62\mu\text{m}$ 以下) の炭酸塩粒子であり, その成因については現在までにさまざまなものが挙げられ, 炭酸塩堆積学が解決すべき重要な課題のひとつである。Flügel (1982) はそれまでの石灰泥の成因論的研究の成果に立って, 石灰泥を主構成要素とするミクライト質石灰岩を 1) automicrite, 2) allomicrite, 3) pseudomicrite に大きく区分した (Table 1)。このうち pseudomicrite は再結晶作用, 隠微晶質セメント化作用, 土壌生成物および淡水性続成作用によって形成された, いわば二次的な微粒炭酸塩である (成因 9–11)。この点で pseudomicrite は初生的な石灰泥堆積物である automicrite, allomicrite とは成因的に明瞭に異なっている。Automicrite は海水自体からの無機沈殿あるいはバクテリアや藻類の生化学的反応で引き起こされる海水からの沈殿による炭酸カルシウムで構成される (成因 1–3)。これに対して allomicrite は浮遊性生物などの微小な石灰質殻の堆積, 生物骨格・硬組織の機械的・生化学的細粒化 (degradation) などで形成された石灰泥からなる (成因 4–8)。Allomicrite と automicrite を構成する石灰泥はともに初生的な生成物であるが, 前者の石灰泥はどれも石灰質の生物骨格に由来する点で共通しており, 後者の石灰泥とは成因上, 明確に区別できる。

1. 海水からの沈殿物 (automicrite)

Folk (1959) は, 石灰泥を炭酸カルシウムについて過飽和な海水から無機的に沈殿したものと考えた (成因 1)。それは, 彼の観察した石灰泥試料の粒径が径 $4\mu\text{m}$ 以下の部分に量的最頻値を示し, きわめて均質であることによっている。彼はその後 (Folk, 1974), 粒径が小さく均一な炭酸カルシウムの生成は, 海水から炭酸カルシウムが沈殿する際に, 海水中に多く含まれているマグネシウムイオンが炭酸塩結晶格子に吸着し, 結晶成長が阻害されるためであると説明した。しかし, 石灰泥が生物が関与することなく無機的に海水から沈殿する (成因 1) という現象は周期的に高い塩分濃度および

高い海水温度になる紅海などの閉鎖的海域, あるいは蒸発量の大きいアルカリ湖などで, 実際に観察されているが, 通常の海洋環境では観察されていない (Blatt, 1992)。

光合成などの生物活動に誘導された海水からの石灰泥の沈殿 (成因 2 と 3) はより一般的な条件下で起こりうる現象であろう。Wells and Illing (1964) はペルシア湾において周期的に起こる海水の白濁化 (whittings) の際に, 石灰泥が海面直下に濃集して懸濁することを観察し, 炭酸カルシウムの沈殿が藻類の光合成による海水からの二酸化炭素の除去と関係していると示唆した (成因 2)。また, Shinn et al. (1989) も海水の白濁化について同様の考察をバハマバンクで行っている。ただし, 白濁化現象は, 海底にすでに沈積していた未固結の石灰泥が魚の群れの求餌活動により巻き上げられたために起こるという見解もある (Garrett, 1977)。

バクテリアや細菌などの微生物に関係した炭酸カルシウムの沈殿 (成因 3) は多くの研究者により報告されている。嫌気性環境下で窒素固定細菌・硫酸還元細菌・メタン生成菌が代謝作用を通して分泌する物質は, 炭酸カルシウムに対する過飽和度を増加させ, その結果, 炭酸カルシウムの沈殿を引き起こすことが知られている (Roberts and Whelan, 1975; Suess, 1979; Gaffey, 1983)。また, いくつかのバクテリアは細胞表面が陰イオンの性質を持つためにカルシウムイオンなどの陽イオンを吸着し, 炭酸塩鉱物の結晶成長時の核形成の場となることが知られている (Krumbein, 1979)。しかし, こうしたバクテリアの活動によって形成される石灰泥はバハマバンク周辺海域での例では 5% 未満にすぎないと推定されている (Cloud, 1962)。

2. 生物骨格を起源とするもの (allomicrite)

海水から無機あるいは光合成などの生物活動に誘導されて沈殿する石灰泥に対して, 生物骨格が細粒化したものや浮遊性生物の微小な石灰質殻など, 生物の骨格・殻を起源とする石灰泥が知られている。この種の石灰泥には本来微粒である石灰質殻が堆積する場合 (成因 4) と大小の生物骨格が機械的に細粒化する, あるいは生化学的作用によって細粒化を促進して石灰泥を生産する場合 (成因 5–8) とに成因的に大別できる。

石灰質ナノプランクトン・浮遊性有孔虫・翼足類などの石灰質浮遊性生物の微小な石灰質殻とその破片の集積物に由来する石灰泥(成因4)はHonjo (1969) などにより研究がなされている。この成因による石灰泥は各種の石灰質軟泥として堆積し、遠洋性炭酸塩岩の重要な岩相のひとつを構成する(Milliman, 1974)。

石灰質生物骨格を細粒化し、石灰泥を生産するプロセスには機械的侵食(mechanical erosion; 成因5)、離解(maceration; 成因6)および生物侵食(bioerosion; 成因7と8)がある。これらの3つの作用が複合して石灰泥が生産されるのが一般的である。

機械的侵食は、水流や波浪のエネルギーの高い環境において重要に作用し、炭酸塩粒子がぶつかりあうことにより破壊する際に、その一部が摩耗・細粒化し石灰泥となる。また、石化した既存の石灰岩が河川や風の営力により侵食を受け石灰泥となったものも、このカテゴリー(成因5)に含める。

離解(Alexandersson, 1979)とは次のような現象である。生物の骨格は一般に微小な結晶の集合体であり、結晶の間には有機物が充填されている。生体の死後、この有機物が骨格から溶脱する際に、骨格が微粒な結晶に分解するのである。この現象は緑藻類骨格について最も一般的に知られているが、軟体動物やサンゴ類の骨格にも認められている(Lewy, 1981)。

生物侵食作用による石灰泥の生産は、生物の穿孔や摂食活動により生物骨格などの炭酸塩底質が侵食されて生じる。海綿動物・軟体動物・棘皮動物・甲殻類・魚類などの大型生物とともに藻類・バクテリアなどの微生物が重要な生物侵食者(bioeroders)となっている。このうち、大型生物による生物侵食は生化学的な溶解や機械的な破壊により行われる。大型生物の生物侵食による石灰泥の生産(成因7)は、多くのサンゴ礁地域で報告されている(Hutchings, 1986)。サンゴ礁地域では、サンゴなどの生物骨格破片が底質を構成しており、穿孔性の大型生物(二枚貝・巻貝・多毛類・海綿動物)に対して生息の場を与える。この底質がこれらの生物による機械的な穿孔をうける際に、もしくは生化学的な溶解による穿孔をうけて機械的侵食が促進されることにより、石灰泥が生産される。また、現在のサンゴ礁地域にみられるように、ある種の魚類や棘皮動物はサンゴの軟体部を補食する際に、石灰泥を含む堆積物を生産する。

また、サンゴ礁地域での生物侵食作用は海底面から深さ10 m程度の部分にまで及んでいることがバハマバンクで研究を行った Ginsburg and Schroeder (1973) により報告されている。彼らの観察によると、サンゴ骨格による枠組み構造(frameworks)が海綿動物や軟体動物などの生化学的穿孔作用で機械的破壊が促進され、生成した石灰泥を含む堆積物が枠組み構造の間隙を埋めている。

藻類・菌類などの穿孔性微生物による生物侵食(成因8)は、サンゴ骨格から炭酸塩砂までの幅広いサイズの炭酸塩の底質を対象とし、大型生物による生物侵食に比べてより幅広い環境で働く。ここで注意すべきは、微生物による穿孔は生化学的な溶解により進行し、穿孔作用だけでは石灰泥の生産には直接にはつながらないという点である。そのため石灰泥の成因としては軽視されがちであった。しかし、微生物による穿孔は、生物骨格や炭酸塩粒子の構造的耐性を低下させ、機械的侵食や離解効果と複合して石灰泥の生産に貢献していると考えられる。

上述のように、石灰泥はさまざまな成因を持っている。堆積物として生成される石灰泥(成因1-8)の中で、生物骨格を起源とした allomicrite は多彩な環境から報告されているのに対し、海水からの沈殿を成因とした automicrite (特に成因1と2)はごく限られた環境でしか生成されない。そこで、James (1983) など多くの研究者は、少なくとも通常の海洋環境において石灰泥は生物骨格の細粒化したものが主体であると述べている。この考えを裏づけるデータはまだ十分に蓄積されているとはいえないものの、海洋環境下において生成する炭酸塩の大半が生物骨格であることを考えると、James (1983) たちの考察は合理的であろう。

生物骨格の離解

現世の多様な海洋環境において、生物骨格の離解により石灰泥が生成していることが報告されている。例えば、バハマバンクにおいて石灰泥(バハマ泥)の成因を考察した Neumann and Land (1975) は、急速に成長する(年間30-40 g/m²) 緑藻類骨格の離解により大量の石灰泥の生産が十分説明できることを示した。彼らによると緑藻類骨格の離解により生じた微粒のアラゴナイトは針状の形態を示し、バハマバンクの海底に堆積している石灰泥と鈎物・形態的特徴が類似しているとしている。

Fig. 1. Boring fabrics by endolithic micro-organisms found in ooid grains from Persian Gulf (a-d) and Bahama Bank (e-h). a) An ooid showing traces of endolithic organisms boring parallel and perpendicular to the grain surface. Portions of the surface of a high density of borings have been exfoliated (pointed by the arrow). b) The pockmarked surface of an ooid grain due to severe endolithic boring. The original smooth surface of an ooid grain has been almost entirely lost by dense boring. c) An ooid having a partly exfoliated surface. Boreholes by endolithic micro-organisms, denoted by arrows, are seen in the depressed parts created by exfoliation of the bored surface. d) Dense-distributed boreholes in the exfoliated parts of an ooid grain. e) Thin-section photomicrograph of an ooid of which has been micritized. The distinct concentric-laminated fabric has been obliterated by the peripheral micritization. The concavity on the surface (pointed by the arrow) was probably formed during the preparation of thin-section. f) The X-shaped extinction seen in the cortex indicates the preferred orientation of minute crystals, of which c-axes are parallel to the grain surface. This extinction pattern is not extended to the micritized periphery. The polarized view of Fig. 1e. g) Endolithic-bored holes filled with carbonate (probably aragonite) cements in the micritized periphery of an ooid. The bored part in the center of the view is 40 μ m thick. The arrow indicates the portion of the enlarged view in Fig. 1h. h) The enlarged view of Fig. 1g showing the boundary between the boreholes filled with needle- to blade-shaped cementing crystals and the laminated cortex. The size of the cementing crystals increases from the wall to the center of the void.

Molnia and Pilkey (1972) は北米東海岸の温帯域での研究で、石灰泥やそれに付随する砂サイズの粒子の形態と鉱物組成から、それらが有孔虫殻、軟体動物・棘皮動物骨格およびその破片の離解により生成したと考察している。Alexandersson (1979) は北海の水深 100–150 m のところに堆積している石灰泥を観察し、軟体動物の骨格片を認識するとともに、石灰泥の多くが軟体動物の骨格を構成する結晶の特徴を持つことから、そこで堆積している石灰泥の大部分が、浅海域で離解された軟体動物の骨格が運搬されたものであることを報告している。彼によると、中—高緯度地域の浅海域では炭酸カルシウムに対する海水の過飽和度が小さいので、化学的・生化学的な沈殿(成因 1–3) で石灰泥が生成することは少ないとしている。

Lewy (1981) は、生物骨格の離解が生体の死後、海底面から 3 m 程度の深さに埋没するまで進行し続けると報告している。したがって、堆積時当初には粗粒な生物骨格を主体とした堆積物が、埋没後の離解により石灰泥主体の細粒堆積物になりうるということが考えられる。

生物の分類群によって離解のしやすさが異なるということも、離解作用による石灰泥の生産を考察する上で重要である。一般に、*Halimeda* のような緑藻類は石サンゴ類の骨格に比べて離解されやすい。Chave et al. (1972) は緑藻類に卓越した生物相を示す堆積物は、離解により石灰泥になりやすいと考察している。

穿孔性微生物による生物侵食

炭酸塩粒子の表面に生化学的な溶解作用で微小な穿孔を形成する穿孔性微生物 (endolithic micro-organisms もしくは microbial endoliths) は分類学上、藻類 (algae)、菌類 (fungi)、バクテリア (bacteria) など多岐の生物群にわたっている (Golubic and Schneider, 1979)。また時代的にみると、穿孔性微生物はすでに原生代に出現しており (Green et al., 1988)、カンブリア紀には頻度が急激に増大し、顕生代を通して炭酸塩粒子の生物侵食に大きく関わってきたと考えられている (Kobluk and James, 1979)。

本章では石灰泥の生産における穿孔性微生物による生物侵食作用(成因 8)の効果について詳しく議論する。まず著者らが走査型電子顕微鏡などを用いて観察した微生物による穿孔構造の実例 (Figs. 1, 2) を紹介し、微生物による穿孔作用と石灰泥の生産の関連性について議論する。つぎに微生物による穿孔作用を支配する環境要因について考察する。

1. 穿孔性微生物に関連した石灰泥の生産

穿孔性微生物は生化学的溶解により炭酸塩粒子や炭酸塩質の底質にさまざまな形状・大きさの穿孔を形成する。穿孔の大きさも微生物の種類により異なる。藻類や菌類の多くは径 1–30 μm の管状の穿孔を形成するが、穿孔性珪藻 (epipsammic diatoms) による穿孔は径 10–20 μm の楕円状のくぼみである (Fig. 2f)。

微生物の穿孔作用の速度についてはいくつかの研究がある。まず、Golubic et al. (1975) は穿孔性微小藻類が軟体動物骨格を 4 週間で 50 μm の深さまで穿孔することを観察し

ている。また Tudhope and Risk (1985) の実験では、穿孔性微生物による炭酸塩堆積物の溶解量が 1 m^2 当り年間 350 g (炭酸カルシウム換算) に達し、堆積物の 3% が失われることが明かにされている。

このようにして形成された穿孔は、その形成者である微生物の死後、細長い空洞部(穿孔痕)として炭酸塩粒子表面に残る (Fig. 1c)。その後、その穿孔痕には微粒の炭酸カルシウムによるセメント (micrite cement) が充填していく (Fig. 1g–h)。著者らの観察した試料の場合では、穿孔痕を高倍率で観察すると、穿孔痕を埋める結晶(おそらくアラゴナイト)が穿孔痕の壁に対して垂直に定向配列し (Fig. 1h)、穿孔痕の内壁から中心へ向かって、結晶径が増大している (Figs. 1h, 2d)。これらの特徴は穿孔痕を充填する結晶粒子が外来の物質ではなく、穿孔痕内で形成されたセメントであることを示している。ただし、この穿孔痕内での炭酸カルシウムの沈殿は、海水の炭酸カルシウムの過飽和度が大きい熱帯—亜熱帯地域で顕著であり、炭酸カルシウムに関して不飽和である高緯度地域においては、炭酸カルシウムの沈殿が起こりにくいため、穿孔痕が空洞のまま残される傾向がある (Young and Nelson, 1988)。また、穿孔痕をつくった藻類が外来の石灰泥を膠着することにより穿孔痕に細粒の炭酸塩物質が充填する例も報告されている (Gaffey, 1983)。

この微生物による穿孔作用と穿孔痕への微粒な炭酸塩結晶の沈殿が繰り返されることにより炭酸塩粒子の表面全体が次第に微粒の炭酸塩結晶から構成されるようになる (Figs. 1e, 1f, 3)。この過程を Bathurst (1966) はミクライト化 (micritization) と定義している。

ミクライト化に関連した微生物の穿孔作用により石灰泥の生産を伴う粒子表面の剥落が促進されることがさまざまな研究者により報告されている。Bathurst (1975) はバハマバンクのオーイド以外の炭酸塩粒子の円磨度を調査し、最も円磨度がよい粒子は表面が微生物による穿孔を受けミクライト化したものであり、ミクライト化した後で機械的に剥落されたものであると述べている。また、このことを最もよく示しているのは Young and Nelson (1988) の行った実験である。彼らは穿孔作用を受けた軟体動物骨格と受けていないものを人工的に攪拌し、機械的侵食に対する耐性を比較した。その結果、炭酸塩粒子が微生物などの侵食を受けた場合、粒子の破壊が起こりやすくなるとともに、機械的な侵食が表面の穿孔作用を受けた部分に選択的に働き、表層部が石灰泥として剥落することを観察している。さらに、このような過程により表面が剥落した炭酸塩粒子は多くの研究で報告されており (例えば、Molnia and Pilkey, 1972), Fig. 1b で示した粒子もこの種の機械的侵食を受けたものと考えられる。この粒子表面に選択的に働く機械的剥落は、ミクライト化された表面が元々の炭酸塩粒子表面の結晶組織に比べて、機械的剝削に対して耐性が小さいことに関係していると思われる。したがって、微生物による穿孔作用は大型生物による生物侵食と同様に、生物骨格などの炭酸塩粒子の力学的強度を低下させ、機械的な侵食作用と複合して石灰泥の生産を促進すると考えられる (Fig. 3c)。また、Alexandersson (1979) は高緯

Fig. 2. Vertical sections etched by HCl (a-d) and a natural surface (e and f) of foraminiferal individuals collected from Hamelin Pool, Western Australia. a) Vertical sections of the foraminifers (center of view). The arrow 1 points the location of the enlarged view of Fig. 2b. The arrow 2 indicates an ooid. b) Boreholes by the endolithic micro-organisms on the surface of the foraminifer shown in Fig. 2a. Depression of the boreholes means that the crystals filling the bores are more soluble than the crystals consisting the foraminifer shell. c) The vertical section of the borings seen in a foraminifer shell. The arrow indicates the location of the enlarged part of Fig. 2d. d) A borehole produced by endolithic micro-organisms filled by acicular crystals. The cement crystals are oriented centripetally and perpendicular to the wall of the bore. The size of the crystals increases from the wall to the center of the bore. e) Destruction of the original surface ornamentation of a foraminiferal shell by dense endolithic borings. The arrow points the location of the enlarged part of Fig. 2f. f) The enlarged view of boreholes perpendicular to the surface of a foraminifer shell. The arrow indicates epipsammic diatoms.

度地域の炭酸カルシウムに不飽和な海域において、微生物による穿孔作用が生物骨格の表面積を増大させ、その離解を促進すると議論している。つまり、これは微生物による穿孔作用と離解とが複合して石灰泥を生産していることにほかならない。

バハマバンクにおいて穿孔性微生物を研究した Radtke (1993) が述べているように、穿孔性微生物による石灰泥の生産量を見積もることは困難とされている。それは前述のように、微生物による穿孔作用は機械的侵食や離解の効果と複合して石灰泥を生産するので、穿孔作用単独の生産量は評価し

Fig. 3. Process of the formation of lime mud related to the boring by endolithic micro-organisms. a) A skeletal grain bored by endolithic micro-organisms. b) The skeletal grain with micritized periphery due to dense borings and cementing of aragonite. c) Later mechanical abrasion resulting in exfoliation of the micritized periphery and formation of lime mud.

づらいことによる。しかし、微生物による生化学的穿孔作用が石灰泥の生産に深くかかわっていることが十分に認識されていたとは言い難い。他のさまざまな石灰泥の成因と比べて、より広範な環境において認められるという点で、微生物による穿孔作用は石灰泥の成因の重要なもののひとつとして注目に値する。

2. 微生物による穿孔作用を支配する環境要因

穿孔性微生物の多くは、藻類（例えば Fig. 2f）や光合成細菌など光に依存する生物であることから、穿孔は浅海域の海底で最も活発に起こると考えられている（Farrow and Fyfe, 1988）。例えば、Swinchatt (1969) は穿孔性藻類により穿孔された炭酸塩粒子の堆積物中における頻度についての調査をグレートバリアリーフおよびバハマからフロリダ沖のプラットフォームで行った。その結果グレートバリアリーフでは、穿孔性藻類を伴う粒子は水深 40 m 以浅ではほとんどの場合において存在し、特に水深 15–18 m で最も頻度が多く、またバハマからフロリダにかけてのプラットフォームでは、水深約 12 m 以浅で卓越していることが明らかになった。このように光合成をする穿孔性の藻類や細菌の生息は浅海域に制限されるのに対して、従属栄養（heterotrophic）の穿孔性微生物（例えば菌類）は、浅海・深海域を問わず分布している（Zeff and Perkins, 1979）。Golubic et al. (1984) によれば、炭酸カルシウム補償深度以浅では海底に炭酸塩の粒子が存在していれば穿孔性微生物の生息は可能であり、水深や光の強さは微生物による穿孔作用を本質的には支配していないとしている。水深の増加（すなわち光強度の減少）に伴い炭酸塩粒子を穿孔する生物種の構成は、光合成を行う穿孔性藻類が主体をなすものから、次第に光を必要としないバクテリア、菌類などが主要な構成員になるものへと変化するにすぎない。深度の増加にしたがい、炭酸塩粒子の微生物による穿孔がなくなるというわけではない。

微生物による穿孔の速度を支配する条件として、海水中の栄養塩濃度も挙げられている。Hallock (1988) は熱帯—亜熱帯域の海水の栄養状態の異なる場所で、炭酸塩堆積物の性質について研究を行った。その結果によると、海水の栄養塩（リン酸塩、硝酸塩など）濃度の増加に伴い、光合成を行う微生物や独立栄養の細菌が増加し、炭酸塩の底質上で繁殖す

る。これらの微生物の多くは穿孔性の生態を持つため、炭酸塩底質は密に穿孔され、顕著な生物侵食をこうむる。さらに、この微生物の増加は、それを補食する大型生物の増加にもつながり、大型生物による生物侵食も著しいものとなる。彼女の考察によると、富栄養の状態では、顕著な生物侵食の効果により生物骨格の構造的耐性が失われ、機械的侵食による破壊速度が潜在的に生物骨格の生産速度を上回る。そこで、微生物の穿孔が困難になる粒径にまで生物骨格は細粒化され、最終的には石灰泥が卓越する堆積物が形成される。

Golubic et al. (1984) は堆積速度も微生物による穿孔作用の程度を支配する要因として重要であるとの見解を述べている。それによると微生物にとっては浮遊している炭酸塩粒子よりも着底した粒子の方が穿孔しやすく、また微生物による穿孔作用は一般に海底面付近で最も活発であり、粒子が埋没すると停止すると思われる。したがって、堆積速度が小さいほど堆積粒子は海底でより長期間海水に接し、より強く微生物による穿孔を受けることになる。深海域における炭酸塩粒子のミクライト化を研究した Hook et al. (1984) も同様の結論を述べている。

石灰泥の生成条件についての考察

現在の海洋環境では炭酸塩のほとんどが生物骨格として生産される。これまで述べてきたように、生物骨格を細粒の石灰泥に変えるメカニズムは機械的侵食、離解、生物侵食の3つの作用が複合したもので、これらの作用は、多岐にわたる石灰泥の成因の中で決して無視できない。とりわけ生物侵食のうち微生物による生化学的穿孔作用は幅広い環境下で認められるにもかかわらず、石灰泥の成因としてこれまであまり重要視されていなかったという点で、今後はより詳細な研究が必要であろう。

これらの石灰泥の成因に関するこれまでの議論を要約すると、次に述べるような3つの点から石灰泥の生成条件を考察する必要があるといえる。

1) 生物骨格の離解による石灰泥の生産量は、離解されやすい骨格を分泌する生物の分布密度に関係している。すなわち Neumann and Land (1975) が述べたように、バハマバンクのような低緯度地域の浅海域には離解されやすいといわれ

ている石灰藻（特に緑藻類）が多く繁茂し、それらの骨格の離解により大量の石灰泥が生産される結果となる。これと比較して高緯度地域では、軟体動物の骨格などが離解されるものの、相対的に石灰藻類よりも離解されにくく、離解による石灰泥の生産量はあまり大きくない。

離解されやすい生物が卓越する例として、古生代（特にオルドビス紀-石炭紀）に大繁栄した海綿動物の例を挙げることができる。海綿動物は stromatactis mounds と呼ばれる炭酸塩の構造物をつくるものと考えられているが、埋積後に離解して石灰泥となりやすく、堆積物中にはその骨格構造がほとんど残されていない (Bourque and Boulvain, 1993)。このように、離解されやすい生物がある時代に卓越して繁栄すれば、その時代の炭酸塩堆積物は石灰泥に富む傾向を持つことになる。

2) Hallock (1988) は富栄養の条件で穿孔性微生物などによる生物侵食の効果が増大すれば、生物骨格はほとんど細粒化し、石灰泥に卓越する堆積物が生成すると考えている。彼女の結論は石灰泥の生産に関して生物侵食の重要性を最も強調したもので、多くの研究者により支持されている。この考え方を地質時代の例にもあてはめてみた場合、海水の富栄養化のイベントが汎地球的規模で起こると、生物侵食の効果が高められ、その時代の炭酸塩堆積物は石灰泥に富むものと考えもある (Wood, 1993)。

3) 堆積速度は石灰泥の生産速度を支配する要因とは考えられないが、生成する堆積物の性質に関わっている。すなわち、堆積速度が小さいと、穿孔性微生物や大型生物による生物侵食や生物骨格の離解が長期間をかけて進行するので、(Golubic et al., 1984; Hook et al., 1984)、生物骨格の大部分が石灰泥に分解され、生成する堆積物は石灰泥に富むものになる。

ま と め

炭酸塩堆積学の重要な課題のひとつである石灰泥の成因についてのこれまでの研究例をレビューした。石灰泥の成因は多岐に及ぶが、そのなかで生物骨格の離解と生物侵食が石灰泥の生産に果たす役割に注目し、著者ら自身による最近の研究成果の紹介を交えて、これら2つの作用について議論した。

多くの石灰泥の成因の中で、生物骨格の細粒化、特に離解と生物侵食のメカニズムによるものは幅広い環境から報告されている。これらの成因を持つ石灰泥の生産量の問題はいまだに解決されていない。しかし、離解や生物侵食が他の石灰泥の成因に比べてより幅広い環境下でみられることを考慮したとき、石灰泥の重要な成因のひとつとして今後おいに注目する必要がある。

著者らは、生物骨格の離解と微生物による侵食という2つの成因に注目した結果、1) 離解を受けやすい骨格を持つ生物種の卓越している環境、2) 生物侵食の効果を促進する富栄養な環境では石灰泥の生産量が大きくなり、3) 堆積速度の小さい環境では、離解や生物侵食が進行する期間が長いので、そこで生成する堆積物が石灰泥に富むことを指摘した。しか

し、他の成因についてさらに考察を進めることにより、石灰泥の生成に関係したより多くの環境条件が考察されるであろう。

謝 辞

ベルシア湾の堆積物試料の一部は群馬大学の相沢省一博士から提供していただいたものを使用した。ハメルンプールでの調査は西オーストラリア州土地管理局の許可のもと、広島大学の藤代典子氏・川崎 正氏とともにいった。また、広島大学の次重克敏氏・奥平敬元博士には粗稿を読んでいただくとともに貴重な議論をいただいた。これらの方々に深く感謝する。

文 献

- Alexandersson, E. T., 1979, Marine maceration of skeletal carbonates in the Skagerrak, North Sea. *Sedimentology*, **26**, 845-852.
- Bathurst, R. G. C., 1966, Boring algae, micrite envelopes and lithification of molluscan biosparites. *Geol. Jour.*, **5**, 15-32.
- Bathurst, R. G. C., 1975, *Carbonate sediments and their diagenesis*. 2nd edition. Devel. Sediment., no. 12, Elsevier Sci. Publ., Amsterdam, 658 p.
- Blatt, H., 1992, *Sedimentary petrology*. 2nd edition W. H. Freeman and Co., New York, 514 p.
- Bourque, P.-A. and Boulvain, F., 1993, A model for the origin and petrogenesis of the red stromatactis limestone of Paleozoic carbonate mounds. *Jour. Sediment. Petrol.*, **63**, 607-619.
- Chave, K. E., Smith, S. V. and Roy, K. J., 1972, Carbonate production by coral reefs. *Mar. Geol.*, **12**, 123-140.
- Cloud, P. E., 1962, Environment of calcium carbonate deposition west of Andros Island, Bahamas. *U. S. Geol. Serv. Prof. Pap.*, **350**, 138 p., Washington.
- Farrow, G. E. and Fyfe, J. A., 1988, Bioerosion and carbonate mud production on high-latitude shelves. *Sediment. Geol.*, **60**, 281-297.
- Flügel, E., 1982, *Microfacies analysis of limestones*. Springer-Verlag, Berlin, 633 p.
- Folk, R. L., 1959, Practical petrographic classification of limestones. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, **43**, 1-38.
- Folk, R. L., 1974, The natural history of crystalline calcium carbonate: Effect of magnesium content and salinity. *Jour. Sediment. Petrol.*, **44**, 40-53.
- Gaffey, S. J., 1983, Formation and infilling of pits in marine ooid surfaces. *Jour. Sediment. Petrol.*, **53**, 193-208.
- Garrett, P., 1977, Biological communities and their sedimentation record. In Hardie, L. A., ed., *Sedimentation on the modern carbonate tidal flats of northwest Andros Island, Bahamas*. John Hopkins Univ. Studies Geol., No. 22, John Hopkins Univ. Press, Baltimore, 124-158.
- Ginsburg, R. N. and Schroeder, J. H., 1973, Growth and submarine fossilization of algal cup reefs, Bermuda. *Sedimentology*, **20**, 575-614.
- Golubic, S., Campbell, S. E., Drobne, K., Cameron, B., Balsam, W. L., Cimerman, F. and Dubois, L., 1984, Microbial endoliths: A benthic overprint in the sedimentary record, and a paleobathymetric cross-reference with foraminifera. *Jour. Paleontol.*, **58**, 351-361.
- Golubic, S., Perkins, R. D. and Lukas, K. J., 1975, Borings microorganisms and microborings in carbonate substrates. In Frey, R. W., ed., *The study of trace fossils*. Springer-Verlag, Berlin, 229-259.
- Golubic, S. and Schneider, J., 1979, Carbonate dissolution. In Trudinger, P. A. and Swaine, D. J., eds., *Biogeochemical cycling of mineral-forming elements*. Elsevier Sci. Publ., Amsterdam, 107-129.

- Green, J., Knoll, A. and Swett, K., 1988, Microfossils from oolites and pisolites of the upper Proterozoic Slemonore Bay Group, central-east Greenland. *Jour. Paleontol.*, **62**, 835-852.
- Hallock, P., 1988, The role of nutrient availability in bioerosion : Consequences to carbonate buildups. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.*, **63**, 275-291.
- Hook, J.E., Golubic, S. and Milliman, J.D., 1984, Micritic cement in microborings is not necessarily a shallow-water indicator. *Jour. Sediment. Petrol.*, **54**, 425-431.
- Honjo, S., 1969, Study of fine grained carbonate matrix : Sedimentation and diagenesis of "micrite". *Paleont. Soc. Japan, Spec. Pap.*, no. 14, 67-82.
- Hutchings, P.A., 1986, Biological destruction of coral reefs—a review. *Coral Reefs*, **4**, 239-252.
- Imbrie, J. and Purdy, E.G., 1962, Classification of modern Bahamian carbonate. In Ham, W.E., ed., *Classification of carbonate rocks*. Mem. Amer. Assoc. Petrol. Geol., no. 1, 253-272.
- James, N.P., 1983, Depositional models for carbonate rocks. In Parker, A. and Shellwood, B.W., eds., *Sediment diagenesis*. Reidel Publ. Co., Dordrecht, 289-348.
- Kobluk, D.R. and James, N.P., 1979, Cavity-dwelling organisms in Lower Cambrian patch reefs from southern Labrador. *Lethaia*, **12**, 193-218.
- Krumbein, W.E., 1979, Photolithotrophic and chemoorganotrophic activity of bacteria and algae as related to beachrock formation and degradation (Gulf of Aqaba, Sinai). *Geomicrobiol. Jour.*, **1**, 139-203.
- Lewy, Z., 1981, Maceration of calcareous skeletons. *Sedimentology*, **28**, 893-895.
- Milliman, J.D., 1974, *Marine carbonates, recent sedimentary carbonates, part 1*. Springer-Verlag, Berlin, 375p.
- Molnia, B.F. and Pilkey, O.H., 1972, Origin and distribution of calcareous fines on the Carolina continental shelf. *Sedimentology*, **18**, 293-310.
- Neumann, A.C. and Land, L.S., 1975, Lime mud deposition and calcareous algae in the Bight of Abaco Bahamas : A budget. *Jour. Sediment. Petrol.*, **45**, 763-786.
- Radtke, G., 1993, The distribution of microborings in molluscan shells from recent reef environments at Lee Stocking Island, Bahama. *Facies*, **29**, 81-92.
- Roberts, H.H. and Whelan, T. III., 1975, Methane derived carbonate cements in barrier and beach sands of a subtropical delta complex. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **39**, 1085-1089.
- Shinn, E.A., Steinen, R.P., Lidz, B.H. and Swart, P.K., 1989, Whittings, a sedimentologic dilemma. *Jour. Sediment. Petrol.*, **59**, 147-161.
- Suess, E., 1979, Mineral phases formed in anoxic sediments by microbial decomposition of organic matter. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **43**, 339-352.
- Swinchatt, J.P., 1969, Algal boring : A possible depth indicator in carbonate rocks and sediments. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **80**, 1391-1396.
- Tudhope, A.W. and Risk, M.J., 1985, Rate of dissolution of carbonate sediments by microboring organisms, Davies Reef, Australia. *Jour. Sediment. Petrol.*, **55**, 440-447.
- Wells, A.J. and Illing, L.V., 1964, Present-day precipitation of calcium carbonate in the Persian Gulf. In van Straaten, L.M. J.U., ed., *Deltaic and shallow marine deposits*. Devel. Sediment., no. 1, Elsevier Sci. Publ., Amsterdam, 429-435.
- Wood, R., 1993, Nutrients, predation and the history of reef-building. *Palaios*, **8**, 526-543.
- Young, H.R. and Nelson, C.S., 1988, Endolithic biodegradation of cool-water skeletal carbonates on Scott shelf, northwestern Vancouver Island, Canada. *Sediment. Geol.*, **60**, 251-268.
- Zeff, M.L. and Perkins, R.D., 1979, Microbial alteration of Bahamian deep-sea carbonates. *Sedimentology*, **26**, 175-201.

(要 旨)

沖村雄二・藤澤昭子・狩野彰宏, 1995, 石灰泥の成因, 特に生物骨格の離解と微生物による穿孔作用の重要性. 地質雑, **101**, 848-856. (Okimura, Y., Fujisawa, A. and Kano, A., 1995, The origins of lime mud, with special notes on the significance of maceration of organic skeletons and boring by endolithic micro-organisms. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **101**, 848-856.)

本論では, 石灰泥に関する研究のレビューを行い, ペルシア湾・バハマバンク・ハメルンブールの炭酸塩粒子についての観察結果を交えて, 特に生物骨格の離解と微生物による穿孔作用に焦点をあて, 石灰泥の生成メカニズム・生成環境についての議論を試みた. 石灰泥の成因はさまざまであるが, 通常の海洋環境下で生成される石灰泥は生物骨格を起源とするものが主体をなしていると考えられる. 広範囲の海洋環境下で, 生物骨格は物理的侵食・離解・生物侵食の3つのメカニズムで細粒化され, 石灰泥となる. 離解を受けやすい骨格を持つ生物種の卓越している環境と, 生物侵食の効果を促進する富栄養な環境では, 石灰泥の生産速度が大きいと考えられる. また, 堆積速度の小さい環境では石灰泥が卓越する堆積物が生産されることが考察される.