

さんご礁の砂を造る 単細胞生物、有孔虫

Foraminifers as living sands in coral reefs

藤田和彦
琉球大学理学部
物質地球科学科

K. Fujita

●はじめに

みなさんは、さんご礁の砂を手に取って観察されたことがあるだろうか。例えば、沖縄のさんご礁の砂は本土でみられる砂と異なり、白色の粒子が目立ち、様々な形や模様をしている。何よりも本土の砂との一番の違いは、さんご礁の砂は生物起源であることだろう。さんご礁の砂は、さんご礁に棲むサンゴ、石灰藻、貝殻などの生物が造る炭酸カルシウムの骨格や殻を起源とする。死んだサンゴの骨格などが波の力や骨格に穴を開ける穿孔生物の働きによって細かく砕けて砂ができる。また、小さな貝殻などは死後直接砂となる。

それらの生物起源の砂の中でも、肌色の粒子に注目していただきたい。星形の粒、絵に描く太陽の形をした粒、コインの形をしたやや大きめの粒などを発見できるかもしれない。これらの粒子はそれぞれ星砂、太陽の砂、ゼニイシと呼ばれる。これらは、小さな貝殻のようにみえるが、実は有孔虫という単細胞生物の殻なのである。星砂たちは小さいけれども、沖縄の砂浜や南の島の砂の中に多く含まれる。また最近は、砂浜や南の島の環境保全を考える上で重要な生物として注目されている。本稿では、さんご礁域の砂となる有孔虫の生態とその貢献度を紹介するとともに、有孔虫の砂を利用したさんご礁域の島や砂浜の保全について触れてみたい。

●砂を造る単細胞生物

有孔虫とは原生生物の顆粒根足虫に属し、網目状に仮足を伸ばす単細胞生物である。多くの種類は炭酸カルシウムからなる殻をつくり、“室”という部

屋を付加させて成長する。有孔虫は地質時代のカンブリア紀以前に出現し、現在の低緯度から高緯度まで、浅海域から深海底までのあらゆる海洋環境に棲息するが、さんご礁海域には地質時代を通じてサイズが大きい（直径数mm一数cmの）有孔虫が分布する。これらのさんご礁域に分布する大型の有孔虫は微細藻類（渦鞭毛藻・緑藻・珪藻・紅藻）と細胞内共生しており、有孔虫は共生藻の光合成由來の有機物を受け取り、自らも餌を探る混合栄養生物である。

太平洋海域のさんご礁の砂には、ホシズナ (*Baculogypsina*)、タイヨウノスナ (*Calcarina*)、アンフィステジナ (*Amphistegina*)、ゼニイシ (*Marginopora*) などの有孔虫殻が多く含まれる（図1）。これらの有孔虫は主にさんご礁の水深の浅い場所（礁嶺や礁池）に分布する。特にホシズナとタイヨウノスナは沖の白波が立つ礁嶺付近で棲息密度が高い（1m²あたり10万個体）。主に海藻類やサンゴ

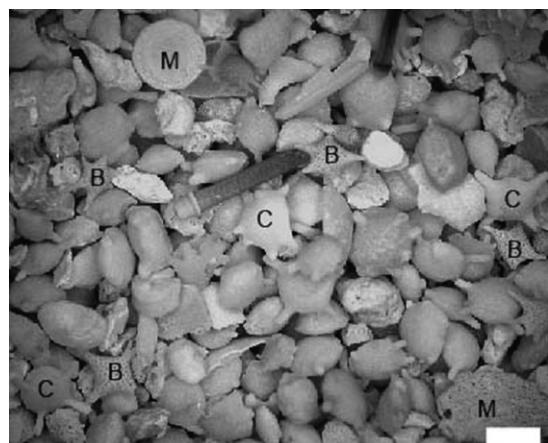


図1 阿嘉島のさんご礁の砂に含まれる有孔虫
B:ホシズナ (*Baculogypsina*)、C:タイヨウノスナ (*Calcarina*)、M:ゼニイシ (*Marginopora*)。スケールは1mm。

礁の表面に付着して棲息する。

有孔虫は一般に無性生殖と有性生殖を繰り返す世代交代を行う。特に無性生殖（多分裂）によって1個の親個体から数百個体ものクローンが産まれる。また、無性生殖を繰り返す世代をもつ種も知られている。こうして世代交代を繰り返して、有孔虫は個体数を増加させる。

これらの有孔虫の寿命は種や棲息環境によって異なるが、さんご礁に棲息する有孔虫についてはおおよそ数ヶ月～1年半程度と推定される。同じ種でも緯度によって異なり、アンフィステジナの寿命は、熱帯のパラオでは約4ヶ月であるのに対して、亜熱帯のハワイでは約1年である。

有孔虫の死後、その遺骸として残る砂礫サイズの殻（主に0.5～2mm径）はさんご礁の海底に堆積する。また、一般に有孔虫の殻は他の生物の骨格や殻に比べて頑丈で磨耗に強いため残りやすい。特に木シズナやタイヨウノスナではとげの部分はなくなってしまうが、中心の球状の部分が残る。

以上のような高い棲息密度、高い増殖能力、短い寿命、頑丈な殻といった特徴から、有孔虫が生死を繰り返すことで、殻という砂粒がさんご礁でどんどん生産されていく。

●有孔虫砂が地形をつくる

有孔虫の殻はさんご礁域の砂に多く含まれる。そのため、特にさんご礁の砂で造られた島、沖縄やハワイなどのさんご礁海岸の砂浜や、久米島のハテノ浜にみられる砂州などの地形の形成や維持に重要な貢献をしている。ここでは沖縄の砂浜と太平洋に点在する環礁の島の形成と維持に有孔虫の砂が貢献していることを示す具体的な研究例を紹介したい。

1. 沖縄の砂浜における有孔虫砂の貢献：Hohenegger (2006) の紹介

共生藻をもつ有孔虫の殻は、西太平洋のさんご礁域の砂浜に堆積する石灰質粒子の主な成分である。特に中粒砂～粗粒砂（0.25～2mm径）に含まれる有孔虫殻の比率は20～95%に達する。砂浜の砂に有孔虫殻が多く含まれる理由としては、一つに有孔虫の生産力が大きいことが挙げられる。沖縄島の北西部に位置する瀬底島のさんご礁では、有孔虫殻はさんご礁の礁嶺で主に生産され（年間1m²あたり0.6kg）、また礁嶺と礁池の間の地域でも多く生産されている（年間1m²あたり1.3kg）。

有孔虫殻が砂浜の砂に多いもう一つの理由は、水流による有孔虫殻の運搬である。有孔虫は砂浜近くの砂底には棲息しておらず、沖の波浪が強い環境の岩盤や海藻に付着する。沖の棲息場所で有孔虫が死亡すると、強い波浪によって殻が運ばれ、さらに潮流などによって沿岸へ運搬される。このように、砂浜が形成されるには、砂の供給源（礁嶺）と堆積地域（礁池、砂浜）とをつなぐ適当な方向と強さの水流が必要である。

また、自然のシステムでは有孔虫砂が砂浜に一方的に堆積するだけでなく、浸食も起きている。しかし、絶えず有孔虫殻が供給されるお陰で、堆積と浸食のバランスが保たれ、砂浜が後退することなく、維持されている。例えば、夏季の台風の襲来によって砂浜の砂は失われるが、夏は有孔虫砂の生産量も大きいため、砂の損失量と供給量のバランスが保たれ、砂浜が維持される。

さらにHohenegger教授は、今日様々な人間活動がこれらの自然の砂浜形成システムを阻害し、自然の砂浜が失われつつあることを警告している。特に人間活動による棲息場所の破壊やさんご礁内の水流循環の変化によって、有孔虫殻が砂浜に集まりにくくなっている。そのため、(1)汚染や埋め立てによって有孔虫砂の生産地域（つまり、有孔虫の棲息場所）を壊さないこと、(2)砂礫の採取や、水路を造

るための浚渫などで、さんご礁内の水流循環を変えないこと、(3) 有孔虫砂の生産地域（礁嶺）と砂浜との間に防波堤や護岸を造らないことの3つの点に注意すべきであると述べている。そして、砂の運搬作用と有孔虫の生態を理解することが、人間の営みとさんご礁域の砂の堆積・浸食とを調和させるために必要であると述べている。

2. 環礁の島の形成と維持に対する有孔虫の貢献： Fujita et al. (2008) の紹介

人工衛星画像からみると、赤道付近のさんご礁は輪状の形をしている。いわゆる環礁というさんご礁地形である。これは、沈降した円錐形の火山島の上にさんご礁の石灰岩が積み重なっており、その淵の部分が高まっているためである。高まりの部分には、さんご礁が海面ぎりぎりまで発達している。

その環礁の平らな頂上には、細長くて、平たい島が存在する。ほとんどの島は標高が低く、満潮時の海面の高さよりも少し高い程度である。みんなの中にも、満潮時に家屋が浸水する環礁の島の映像や写真をテレビや新聞等でご覧になった方もおられるだろう。日本に住んでいる我々にとっては想像できない程低い島が環礁には存在する。

それらの環礁の上の島（環礁州島）は主に砂で造られている。特に太平洋の環礁州島を造る砂は、50%以上有孔虫の殻で構成される。したがって環礁の島周辺における有孔虫の分布と生産量を明らかにすることは、州島周辺の有孔虫砂の供給源と供給量を明らかにすることになる。ひいては、州島の形成・維持過程や将来の環境変化に対する州島の

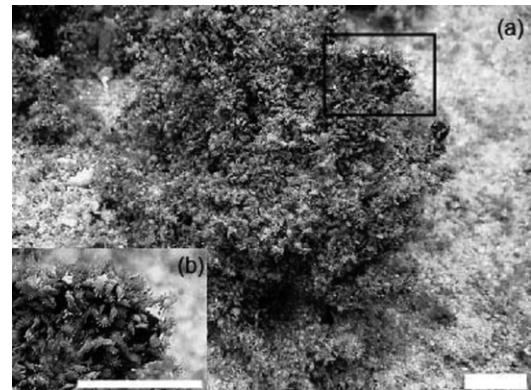


図2 海藻に密集した有孔虫（マーシャル諸島マジュロ環礁の浅い水路の海底にて撮影）

(a) 緑藻サボテングサの表面に密集して付着するタイヨウノスナ (*Calcarina*)。 (b) (a) の黒枠部分の拡大写真。放射状に生えるとて海藻の表面に付着する。スケールは (a), (b) ともに1cm。

変化を予測することにつながる。

筆者らがマーシャル諸島のマジュロ環礁で調べた有孔虫の分布調査の結果によると、(1) 礁原に多い有孔虫（カルカリナとアンフィステジナ）は、卓越風（北東貿易風）の風上側に位置する礁原の外洋側や州島間の浅い水路で最も棲息密度が高いこと (1 m^2 あたり 100 万個体；図2)、(2) 種により分布の傾向が異なり、外洋側の礁原でもカルカリナの棲息密度は風下側と比べて風上側で有意に高いが、アンフィステジナはどちら側でも棲息密度に違いはみられないこと、(3) 2種の有孔虫は、同じ風上側の礁原でも外洋側では多いが、島影となる礁湖側ではほ

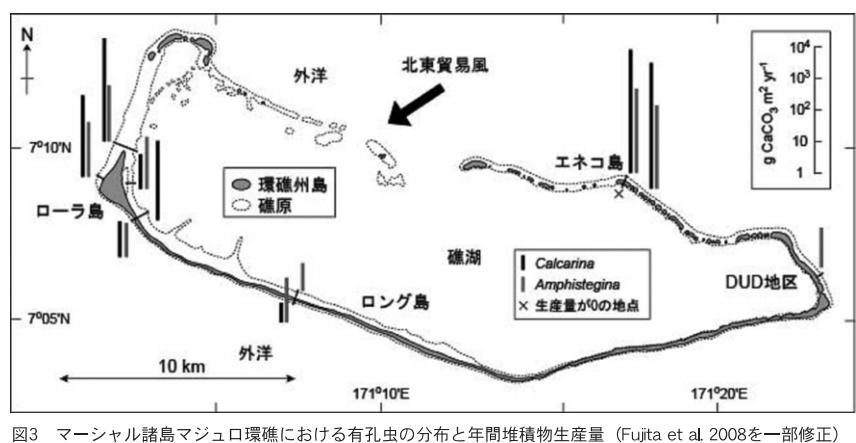


図3 マーシャル諸島マジュロ環礁における有孔虫の分布と年間堆積物生産量 (Fujita et al 2008を一部修正)
一般に有孔虫は風上側の外洋礁原で生産量が多いが、同じ風上側でも人口密集域（DUD地区）付近の外洋礁原では人為的影響のためか生産量が少ない。

とんどいないこと、(4) 州島の沿岸付近や人口が密集した州島付近の外洋礁原にも少ないことが明らかとなった。また、有孔虫砂の生産量に関しては、(1) 生産量が高い地点は、風上側に位置する外洋礁原と州島間の水路、州島のない礁原の外洋側であり、年間生産量は 1m^2 あたり 1kg 以上であること、(2) 生産量が低い地域は、州島の沿岸付近、風下側の外洋礁原、人口密集域付近の礁原であり、年間生産量は 1m^2 あたり 10g 以下であることが明らかとなった(図3)。以上の結果から、(1) 有孔虫の分布と生産量は主に水流、水深、底質の種類など複合的な自然要因によって規定されること、(2) 州島の存在が沿岸付近の水流循環を変えることで、有孔虫の分布や生産に影響を与えること、(3) 人為的影響(特に水質悪化)が有孔虫の分布と生産に負の影響を与えることが示唆された。

● 地球環境問題と有孔虫砂を利用した砂浜や州島の保全

IPCC 第四次報告書によると、地球温暖化に伴って今世紀中に海面が約 40cm 上昇すると予測されている。そうなると日本では沿岸の砂浜が後退したり、消滅したりすることになる。このことは砂浜(ビーチ)が観光資源の一つである沖縄では大きな問題である。また、標高の低い環礁の州島は海面上昇によって水没する危機に瀕する。実際に水没とまではいかないにせよ、浸水、海岸浸食など水災害の危険性が高まると予測される。このことは環礁州島に暮らす人々にとって住む場所の危険性が増すことを意味するため、早めに対策をとらなければならない。また、日本でも海面上昇により水没の危機に瀕している島がある。日本最南端の沖ノ鳥島である。沖ノ鳥島は、日本の国土と同じ程度の面積の排他的経済水域をもつため、沖ノ鳥島の水没は日本の経済にも影響を及ぼす可能性がある。

このようなさんご礁域の砂浜や州島が海面上昇に對して維持されつづけるためには、これらの地形を造る砂の供給が維持・増加されなければならない。砂浜や州島の砂は有孔虫殻が多く含まれることから、具体的には有孔虫の生産量と供給量を維持・増加させる必要がある。

それでは有孔虫の生産量を維持する、あるいは今以上に高めるためにはどうすればいいだろうか? 有孔虫殻の生産量は主に有孔虫の棲息密度と生活史によって決定される。したがって、有孔虫殻の生産量を高めるには、まず有孔虫の棲息及び成育に適した環境条件を整えることが大切である。適した環境条件とは、具体的には水温・光量および波長分布・水流などの物理環境条件や塩分・pH・栄養塩濃度などの化学環境条件を指す。餌や天敵等の生物環境条件については不明な点が多いが、重要な要素である。また、人為的影響についても因果関係が不明な点が多いが、その影響を少なくするに越したことではない。これらの環境条件を整えることにより芝状海藻などの有孔虫の棲息場所が増加し、一方で有孔虫が安定した一生を送り、継続した世代交代を行うことができる。これらの結果、有孔虫殻の生産量は自然に増えることが予想される。

しかし、この考えを実行段階に移す前に、解決しなければならない課題が残されている。それは、Hohenegger (2006) でも述べられているように、有孔虫の生物学的及び生態学的理解である。有孔虫の生態、特に生殖や生活史については詳しくわかっていない種がほとんどであり、それが有孔虫の生産量を推定する上で大きな問題となっている。有孔虫と海洋環境因子との関係についての基礎研究や、有孔虫の生物学に関する研究は、きっと砂浜や州島の保全につながる成果になる。

有孔虫の生物学的理解が深まり、有孔虫が棲みやすい環境を整え、砂を効率よく集める技術が合わさ

れば、将来の環境変化に対して州島や砂浜を維持することは可能だろう。むしろ問題はどれくらいの先を目指して保全するのかという点である。数年という短期間で結果を期待するのはやや難しいだろう。その間の有孔虫の生産量は砂浜や州島を造るには微々たるものであるし、台風のような突発的事象が起きたら、逆に州島や砂浜の砂が減ってしまう。もっと長期的な視点で、短くとも海面が40 cm上昇するかもしれない2100年にも州島や砂浜が現在と同じくらい維持され続けることを目標にするべきであろう。現在からの数十年間における有孔虫砂の生産量は莫大なものになるし、その砂が効率よく集まれば州島や砂浜が維持されるのに十分な量となるであろう。

最後に、州島や砂浜は数千年前に地球の海面が安定した後の過去数百年－数千年間の歴史的産物であることを忘れてはいけない。州島や砂浜の保全については、来世紀にも州島や砂浜を残そうというくらいの目標で考えてはどうだろうか。そのためには砂となる有孔虫という生物をもっと理解する必要がある。

●謝辞

阿嘉島臨海研究所の保坂三郎理事長（財団法人熱帯海洋生態研究振興財団）ならびに大森 信所長には、筆者が同研究所の常駐研究員として在籍していた時に、有孔虫の生態学的研究の意義を認めていただき、研究を支援して頂いた。在籍時の同僚であった岩尾研二研究員、谷口洋基研究員、下池和幸元研究員、上林利寛シェフには、大変お世話になった。海洋政策研究財団沖ノ鳥島研究会と環礁州島研究会のメンバーの方々には、異分野の視点から有孔虫の研究について議論して頂き、有孔虫の生産力の研究意義を再認識することができた。以上の方々に感謝いたします。

●引用文献

- Fujita K, Osawa Y, Kayanne H, Ide Y, Yamano H (2008) Distribution and sediment production of large benthic foraminifers on reef flats of the Majuro Atoll, Marshall Islands. *Coral Reefs*, doi: 10.1007/s00338-008-0441-0
Hohenegger J (2006) The importance of symbiont-bearing benthic foraminifera for West Pacific carbonate beach environments. *Marine Micropaleontology* 61: 4-39