

有孔虫も白化するのか?

藤田和彦

琉球大学理学部
物質地球科学科

Does algal symbiont-bearing Foraminifera show bleaching like reef corals?

K. Fujita

はじめに

今年の夏も造礁サンゴの白化現象が沖縄の各地で認められ、同じ時期に起きた沖縄本島地方の異常潮位とともに関心を集めた。この白化現象はサンゴ組織内の共生藻の密度が減少すること、もしくは共生藻のクロロフィル含量が低下することによって起こる。その原因としては、高水温や低水温、強光、紫外線の照射、淡水の流入による塩分低下などの環境ストレスが単一あるいは複合に起きたことによると考えられている(日高 2000)。このような白化を起こす生物は造礁サンゴだけでなく、同じ刺胞動物で共生藻をもつイソギンチャクやソフトコーラルでも観察される。サンゴ礁に棲息する有孔虫類にも渦鞭毛藻のほか、珪藻、紅藻、緑藻などさまざまな微細藻類と共生している種類が知られている(弥益 1986)。筆者はこの有孔虫類の生態について研究しており、来所される研究者の方などに「有孔虫を研究しています」と言うことで「有孔虫も白化するのか?」という質問を受けるが、いつもお茶を濁した答えしかできないでいる。何故あいまいな返事しかできないのか、今年も造礁サンゴの白化現象が起きたこの機会にこれまでの研究結果や筆者の観察結果を整理して、有孔虫が白化するのについて論じてみたい。有孔虫といっても多種多様な種類があるので、ここではサンゴ礁に棲息する共生藻類をもつ底生有孔虫に限定して話を進めることにする。

有孔虫の白化は確認できるか?

まず有孔虫の白化について議論する前に、有孔虫が白化するのを確認できるかという問題がある。造礁サンゴの場合、共生藻は骨格の外側を覆っている軟体組織の中に入っている(日高 1986)。したがって、造礁サンゴの白化は、詳細には軟体部の組織を骨格から分離させ、組織内の共生藻密度や共生藻の変性度などを観察する必要

がある(Hidaka and Miyagi 1999; Kuroki and van Woesik 1999)が、肉眼でも共生藻の色が抜けることで通常の色より薄く見えたり、白い骨格が透けて白く見えたり、組織特有のピンク色や黄色を呈したりすることで確認できる。一方、有孔虫の場合、共生藻類は石灰質の殻に囲まれた原形質内に入っている。そのため、有孔虫の原形質とその中の共生藻を観察するには、顕微鏡下で殻の表面を通して観察する必要がある。この有孔虫がつくる殻にもさまざまな構造があり、光の当たる面が薄く透明につくられているゼニイシなどの種類は、中の原形質や共生藻類が確認しやすい。しかしながら、ホシズナやタイヨウノスナなど厚い殻をつくる種類は確認しにくい。このことが有孔虫の白化についてお茶を濁す答えしかできない理由の一つとなっている。

礁原に棲む有孔虫の観察結果

サンゴやイソギンチャクが白化した今年(2001年)の夏、阿嘉島ヒズシの礁原で水温・塩分・水中光量を測定したところ、水温は7月に平均28.8度(最高29.9度)、8月に平均28.5度(最高29.5度)を記録した。また、日中の水中光量は7月に最高2016 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、8月に最高2179 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ に達した。塩分は7月に平均33.4、8月に平均33.2であった。このような物理環境条件の中で、阿嘉島の礁原に棲むゼニイシやホシズナなどの有孔虫を定期的に採取して顕微鏡下で観察したが、特に色彩的に通常と異なる個体は確認されなかった。また、ゼニイシで白色の個体が少なからず発見されたが、共生藻が抜けて色が白くなったのではなく、殻の中の原形質ごとなくなっていた死骸であった。この時期、自然条件下での死亡も起こるため、もしも白化によって死亡していたとしてもそれらを区別することが難しい。さらに、この期間個体群密度が激減したというような変化も見つからなかった。以上のように筆者の観察結果は礁原に棲息する有

孔虫の白化に関して否定的だが、礁斜面に棲息する *Amphistegina* という有孔虫で白化のような現象が報告されている(Hallock *et al.* 1992)。

白化した *Amphistegina*

Amphistegina という有孔虫は、主にサンゴ礁の礁斜面に棲息する有孔虫で、沖縄では 5 種確認されている(Hohenegger 1994)。この有孔虫は羽状目珪藻を細胞内に共生させているため、原形質が黄緑色から褐色を呈している。また、表面の殻が薄く透明なため、殻の表面から共生藻類を含む原形質が見えやすい。問題の個体は、この殻を通して見える原形質が部分的に白くなったり、斑点状に白くなったりしている(Hallock *et al.* 1992; 図 1)。斑点状に白くなった部分は、共生藻が消化されているとともに、原形質が液胞化していたり、粒状化したりしていることが確認された(Talge and Hallock 1995)。このような白化した個体は、春頃から増えはじめ、7 月にピークに達し、その後減少するという季節的な傾向が認められる。また、成熟個体に多くみられる傾向があり、水深に関係なく起きているようである。この有孔虫の“白化”現象は 1991 年に大西洋海域で初めて確認され、地理的にはフロリダなど大西洋海域だけでなく、オーストラリアやハワイなど太平洋海域でも確認されている。その後夏のピーク時の出現率は 1992 年以降減少したが、1998



図 1. 白化した *Amphistegina gibbosa*
Hallock *et al.* (1992) より引用。スケールは 0.25 mm。

年に再び増加した(Talge *et al.* 1997; Williams *et al.* 1997, 2000)。この白化に伴って個体群密度の不安定化、殻の脆弱化、生殖異常(有性生殖の失敗、産クローン数の減少、奇形幼生の増加)なども報告されている。これまでの長期観測や飼育実験の結果から、水温の上昇よりも紫外線の照射が原因として推測されているが、病気のようなものだとも考えられている。

ちなみに沖縄における筆者の観察では、礁斜面に棲息している *Amphistegina* でも色が抜けやすい種と抜けにくい種がいるような気がする。色が抜けやすい種の中では、たしかに色が部分的に欠けている個体も確認されるが、斑点状に白くなったものは見つからず、白化かどうかは不明である。

環境ストレスに対する有孔虫の反応

Ross(1972)はゼニイシに高温ストレスを与える実験を行ったところ、全体に広がっていた色が中央部分のみ見られるようになり、共生藻も中央部分に濃縮してしまったことを報告している。同じような現象は飼育個体でもよく観察され、野外で有孔虫を採集してきたばかりの個体は周縁部分が白く仮足を伸ばさないが(図 2)、しばらくシャーレに入れて放置しておくと色が全体に戻り、仮足を伸ばし始める。これらのことから有孔虫-微細藻類共生系は外部環境からストレスを受けると収縮して、殻に閉じこもり嫌な環境を耐えしのぐ戦略をとるのではないのだろうか?この仮説が正しければ、ストレスを与えると体内から共生藻が外へ出てしまうサンゴ-微細藻類共生系とは異なるメカニズムである。

殻は有孔虫-微細藻類共生系を白化から守る?

以上のように、「有孔虫も白化するのか?」という問いには、基礎的研究の不足から現時点では「白化のような現象が確認されている種類もいるが、ほとんどの有孔虫では白化していないようだ」としか言えない。今後はこれまでの単なる観察にとどまらず、細胞レベルの観察や共生藻密度やクロロフィル量の変化を含めて検討すべきであろう。

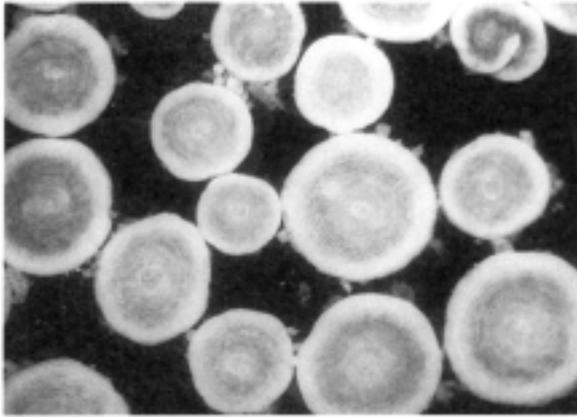


図2. 採集直後のゼニイシ殻の中の原形質と共生藻の色が周縁部分では見られない。造礁サンゴの白化現象が起きていた2001年8月6日、阿嘉島マジノハマの礁原にて採集。

しかしながら、有孔虫とサンゴに共生している微細藻類の生理的耐性が同じであると仮定して、それでも有孔虫が白化しない場合は、宿主と共生藻と外部環境との三者関係が有孔虫とサンゴとは異なるように思われる。つまり、原形質を包み込む有孔虫の殻は有孔虫-微細藻類共生系にとって不適な環境を避けるシェルターの役割をもつのではないのだろうか?有孔虫の殻は光に対する緩衝作用をもつようである(Köhler-Rink and Kühl 2000)が、水温や塩分など他の外部環境因子の変化に対しても殻が緩衝や遮蔽の効果を発揮し、中の細胞や共生藻に直接伝わりにくくしているのではないのだろうか?この仮説を検証するには、クローンを用いて、脱灰させた“裸の有孔虫”をつくり、正常な個体と同じ環境条件下で飼育し、共生藻の密度や色素量の変化を比較してみる必要がある。勿論造礁サンゴでも白化しない種もいるので一概に言えないが、藻類が入っている宿主の細胞が直接外部環境と接している造礁サンゴやイソギンチャクなどに対して、有孔虫ではその殻が何らかの役割をもつような気がしてならない。

有孔虫はサンゴ礁の砂粒をつくる重要な役割を担っている。白化などによってその個体群変動が不安定になれば、サンゴ礁海域の砂粒堆積物供給の減少を引き起こし、ひいては砂浜の後退、サンゴ礁の炭素循環への影響、礁生産力の低下につながるかも知れない。今後は、この殻の詳細な構造に着目しながら、有孔虫の白化問題の是非とそれに伴う個体群動態や生態系への影響、また詳細に

研究されている造礁サンゴの白化メカニズムとの違いについて追究していきたい。

●引用文献

- Hallock, P., H. K. Talge, K. Smith and E. M. Cockey 1992. Bleaching in a reef-dwelling foraminifer, *Amphistegina gibbosa*. Proc. 7th Int. Coral Reef Symp., Guam, 1: 44-49.
- 日高道雄 1966. サンゴの生物学. 西平守孝編, 沖縄のサンゴ礁. (財)沖縄県環境科学センター, p.66-82.
- 日高道雄 2000. 造礁サンゴの白化現象. 平成10年度 造礁サンゴ群集の白化が海洋生態系に及ぼす影響とその保全に関する緊急調査報告書. (財)海中公園センター, p.1-7.
- Hidaka, M. and A. Miyagi 1999. Does enrichment by inorganic nutrients prevent bleaching in the coral *Galaxea fascicularis* exposed to high temperature? *Galaxea*, JCRS, 1: 3-7.
- Hohenegger, J. 1994. Distribution of living larger foraminifera NW of Sesoko-jima, Okinawa, Japan. P.S.Z.N. I: Mar. Ecol., 15(3/4): 291-334.
- Köhler-Rink, S. and M. Kühl 2000. Microsensor studies of photosynthesis and respiration in larger symbiotic foraminifera. I The physico-chemical microenvironment of *Marginopora vertebralis*, *Amphistegina lobifera* and *Amphisorus hemprichi*. Mar. Biol., 137(3): 473-486.
- Kuroki, T. and R. van Woesik 1999. Changes in zooxanthellae characteristics in the coral *Stylophora pistillata* during the 1998 bleaching event. *Galaxea*, JCRS, 1: 97-101.
- Ross, C. A. 1972. Biology and ecology of *Marginopora vertebralis* (Foraminiferida), Great Barrier Reef. J. Protozool., 19: 181-192.
- Talge, H. K. and P. Hallock 1995. Cytological examination of symbiont loss in a benthic foraminifera, *Amphistegina gibbosa*. Mar. Micropaleontol., 26: 107-113.
- Talge, H. K., D. E. Williams, P. Hallock and J. N. Harney 1997. Symbiont loss in reef foraminifera: consequences for affected populations. Proc. Int. 8th Coral Reef Symp., Panama, 1: 589-594.
- Williams, D. E., P. Hallock, H. K. Talge, J. N. Harney and G. McRae 1997. Responses of *Amphistegina gibbosa* populations in the Florida Keys (U.S.A.) to a multi-year stress event (1991-1998). J. Foraminiferal Res., 27(4): 264-269.
- Williams, D. E., P. Hallock and H. K. Talge 2000. Photic stress as a cause of bleaching in the reef-dwelling foraminifer *Amphistegina gibbosa*. Abstract, 9th Int. Coral Reef Symp., Bali, 260.
- 赤松輝文 1966. サンゴ礁の生物たち3 -サンゴ礁の共生関係-. 西平守孝編, 沖縄のサンゴ礁. (財)沖縄県環境科学センター, p.123-145.