

浮遊性有孔虫の飼育実験

黒柳 あずみ¹⁾

1. はじめに

浮遊性有孔虫は、炭酸カルシウム(方解石)の殻を持つ、ジュラ紀に出現した原生動物プランクトンで、赤道から極域までの海洋表層に広く分布している。また、水温や塩分、栄養塩、生物生産性(餌の量)などの過去の環境をその殻や群集組成に記録することができるため、古環境復元に用いられることが多い。古環境を精密に解析する際に必要となるのが、環境と浮遊性有孔虫との関係の正確な把握である。このため、野外での観察調査に加え、周囲の環境をコントロール可能な室内での飼育実験手法による検証が重要である。

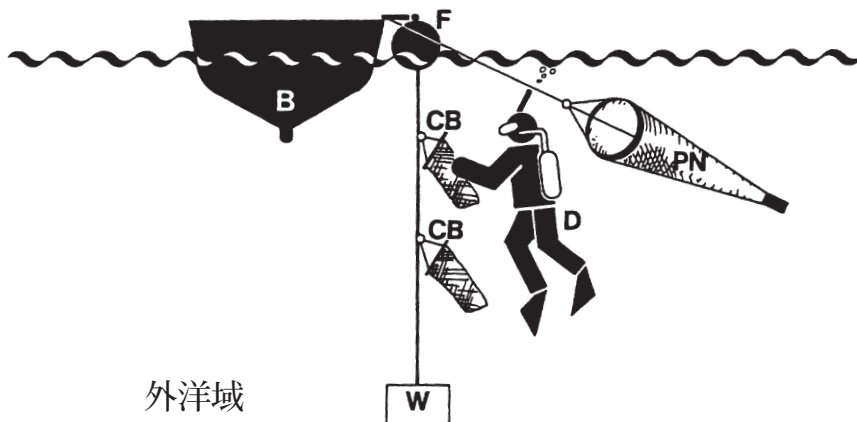
本論では、最初に浮遊性有孔虫の飼育実験手法について概説し、その後、実際に飼育実験手法を用いた研究例を紹介し、飼育実験が環境指標の検証としてどのように用いられてきたかや、今後の課題等について考察する。

2. 浮遊性有孔虫飼育実験の基本的手法

浮遊性有孔虫を用いた飼育実験の基本的な流れは、1) 有孔虫を野外から採取してきた後に、2) 室内のコントロールされた環境下で飼育し、3) その成育過程や環境に対する生物的反応の観察を行い、4) 必要があれば飼育後にその殻を分析することである。

野外からの採取方法は、プランクトンネットを使う方法と、スクーバダイビング(SCUBA diving)による2通りが主である(第1図)。ダイビング採取の方が有孔虫の損傷が少なく、飼育時の個体への負担が小さくなるが、殻に棘(spine)を持たない種では肉眼による認識が困難なため、プランクトンネットを用いる。また浮遊性有孔虫は主として100m以浅の海洋表層で生息するが、ダイビングでは表層(3-5m)の採取に限られるため、より深い水深に生息する個体の採取にもまたプランクトンネットを用いる。

浮遊性有孔虫を飼育する際に重要となるのは、飼



第1図
SCUBA ダイビングによる浮遊性有孔虫の採取。Dは採取を行うダイバー、Fはウキ、Bはポート、CBは採取用のバッグ、Wは重り、PNはプランクトンネットを示す(Hemleben *et al.*, 1989)。

1) 産総研 地質情報研究部門 学振特別研究員

キーワード: 浮遊性有孔虫, 飼育実験, 環境指標, 酸素同位体比, Mg/Ca比, ホウ素同位体比

育水温・塩分・光量と照射サイクル・飼育に用いる水溶液(海水)の量と組成・エサの質と頻度, 等である(Hemleben *et al.*, 1989). 浮遊性有孔虫は基本的には雑食(植物プランクトン及び動物プランクトンを捕食)であるが, 種によりエサの好みが異なり, 一般に殻に棘を持つ種は肉食, 棘を持たない種では草食寄りの傾向がある(Hemleben *et al.*, 1989). エサとして, 短時間で孵化する *Artemia salina* (brine shrimp) を用いることが多い。

3. 飼育実験手法を用いた研究例

浮遊性有孔虫を用いた飼育実験では, 一般に, コントロールされた環境下の有孔虫の反応を観察・分析し, 環境指標として応用する目的で行われるものが多い。浮遊性有孔虫は水温・塩分・pH・栄養塩や生物生産性(餌の量)などの環境の指標となることが可能であり(黒柳, 2002), その中でも代表的なものが水温指標である。以下に, 水温指標をはじめ環境指標としての浮遊性有孔虫に着目して行われた, 有孔虫飼育実験の研究例をいくつか紹介する。

3.1 浮遊性有孔虫の温度・塩分耐性

有孔虫を環境指標として用いる場合, 殻の化学組成に着目し, それと環境因子との関係を調べるものが多い。しかし最も基本的なものは, 各因子に対する有孔虫の生息限界についてである。ここでは有孔虫の存在の有無そのものが, 大きな意味での環境指標となる。

水温や塩分が有孔虫に与える影響については, Caron *et al.* (1987) が *Globigerinoides sacculifer* を用いた飼育実験を行い, 水温や塩分よりも光やエサの方が, 成長に影響することを示した例などがあるが, Bijma *et al.* (1990) は, さらに厳しい条件である生息限界について検証した。Bijmaらは, 飼育実験下の水温と塩分をコントロールし, 殻形成率, エサ摂取率, 配偶子形成率などを基に, 有孔虫7種の生存限界値及び最適値を明らかにした。そして海水温が有孔虫分布にとって重要な因子であることを示すとともに, その実験で用いた *G. sacculifer*, *Globigerinoides ruber* を始めとする7種が耐性を持つ塩分の範囲は, 自然界での範囲を超えていることから, 塩分が通常これらの種の分布を規制する要因にはならないこと

を示した(Bijma *et al.*, 1990)。

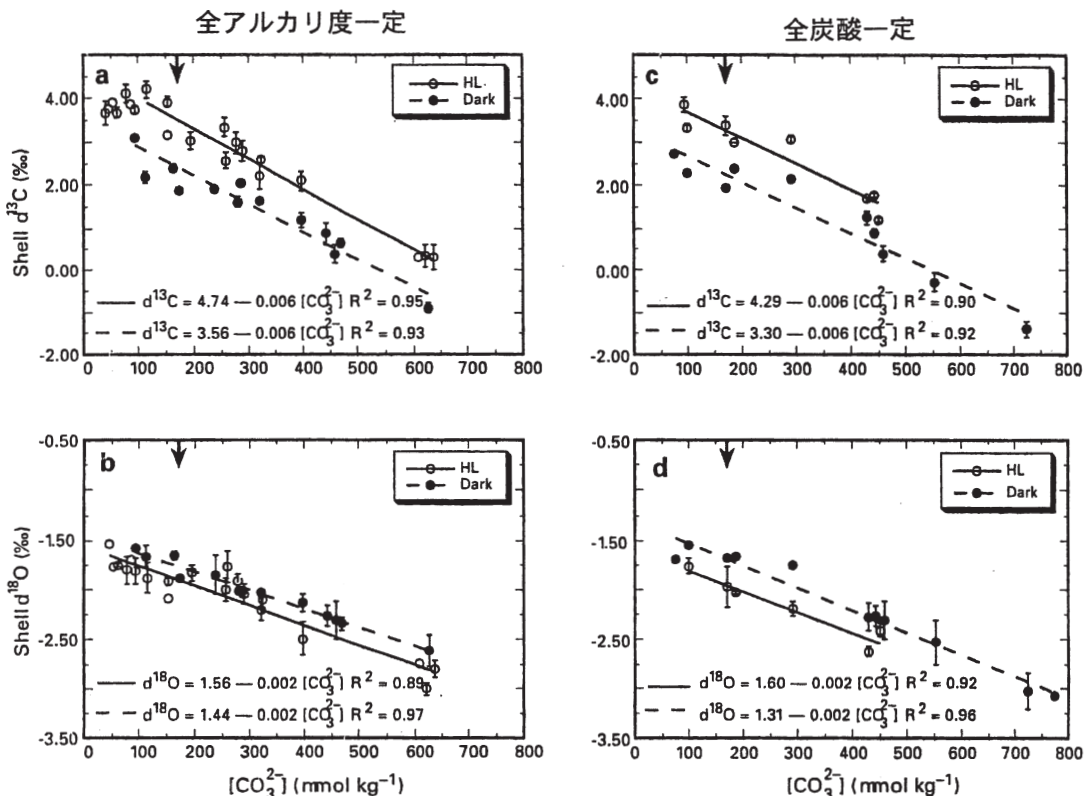
3.2 水温指標としての殻の酸素同位体比

炭酸塩が生成される際, 周囲の海水との同位体分別は温度依存性を持つ(e.g., Urey, 1947; McCrea, 1950; Epstein *et al.*, 1953)。このため, 有孔虫の殻中の酸素同位体比 ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) は海水の同位体比組成と石灰化温度の関数となり, 温度指標として広く用いられている。飼育実験手法を用いて, 浮遊性有孔虫と酸素同位体比との関係を最初に報告したのが, Erez and Luz (1983) である。彼らは *G. sacculifer* を 14–30°C の環境で約 10–15 日間飼育し, その後, 飼育個体の酸素同位体比を測定して, 温度及び海水同位体比との関係式を明らかにした。

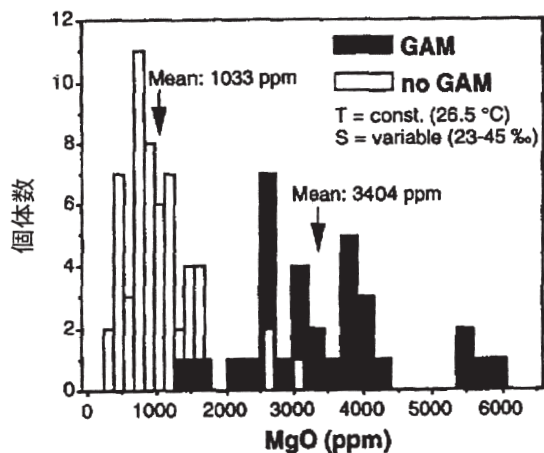
しかしその一方で, 水温と海水の同位体比以外の要因による, 浮遊性有孔虫の酸素同位体比への影響を指摘する研究も報告されている。Spero *et al.* (1997) は, 共生藻を持つ有孔虫種である *Orbulina universa* と, 共生藻を持たない *Globigerina bulloides* を対象に飼育実験を行った。Speroらの実験では, 全アルカリ度または全炭酸を一定に保ちつつ, 海水中の炭酸イオン濃度 ($[\text{CO}_3^{2-}]$) を変化させた海水中で, 前出の有孔虫2種を約 6–8 日間飼育し, 配偶子形成後の殻を分析した。そして, 有孔虫殻中の酸素同位体比は海水中の炭酸イオン濃度の増加に伴い減少することを明らかにした(Spero *et al.*, 1997; 第2図)。この炭酸イオン濃度の酸素同位体比に対して果たす役割は, 飼育実験を通じて初めて認識・定量化できた事柄であり, 飼育実験が果たした役割は大きい。

3.3 水温指標としての殻のマグネシウム・カルシウム比(Mg/Ca比)

MgとCa間のイオン交換反応の平衡定数は温度に依存して変化する。有孔虫の炭酸カルシウム殻が生成される際, 水温が高いほど多くのMgを殻中に取り込むため, 殻中のMg/Ca比は水温指標として用いることが可能である(e.g., Chave, 1954)。Nürnberg *et al.* (1996) は, *G. sacculifer* を用いて, 1) 塩分一定にして水温を変化する, 2) 水温一定で塩分を変化させる, という2つの条件で飼育実験を行い, 水温がMg/Ca比を主に変化させる因子であることを示し, 水温との関係式を明らかにした。また, 塩分でも比率は変化するが, その変化率は小さいことを示し, さら



第2図 炭酸イオン濃度 ($[CO_3^{2-}]$) と有孔虫 *O. universa* の炭素・酸素同位体比との関係 (Spero *et al.*, 1997). 光強度の強い環境 (HL) で成長した個体は白丸, 暗所 (Dark) で成長したものは黒丸で示している. 図中の矢印は, 飼育用有孔虫を採取した現場 (Southern California Bight) における炭酸イオン濃度の値.

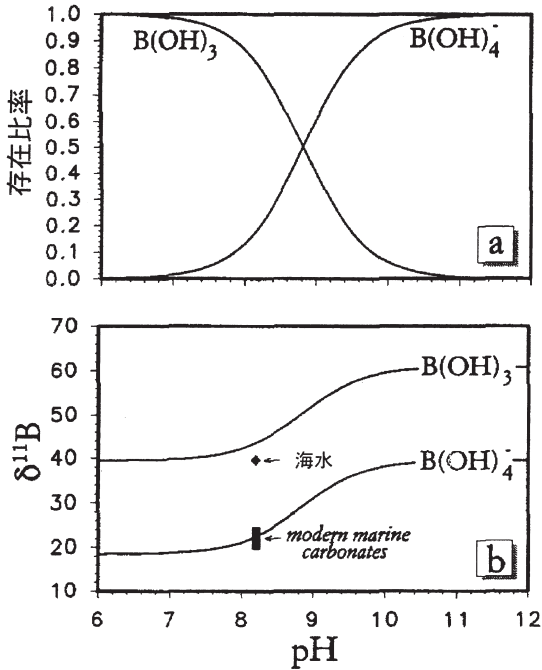


第3図 配偶子を形成した個体 (GAM) と形成していない個体 (no GAM) のマグネシウム濃度の頻度分布 (Nürnberg *et al.*, 1996).

に飼育実験時の配偶子形成の有無も観察して, 配偶子形成後の殻 (GAM calcite) のマグネシウム濃集 (第3図) を明らかにした (Nürnberg *et al.*, 1996). この実験では, 塩分温度を一定にしたり変化させたりする飼育環境のコントロールはもとより, 配偶子形成前後の比較を可能にしたという点でも, 飼育実験の特性が貢献している.

3.4 ホウ素同位体比を用いたpH推定

海水中でホウ素は主に $B(OH)_3$ と $B(OH)_4^-$ という形で存在し, この2つの存在比はpHに依存している (第4図a). 一方, ホウ素同位体比 ($^{11}B/^{10}B$) は, 前述の2つの存在比によって変化するため, 炭酸塩に取り込まれたホウ素の同位体比は炭酸塩形成時のpHを反映している (第4図b) (Hemming and Hanson, 1992). Sanyal *et al.* (1996) は, *O. universa* を4段階



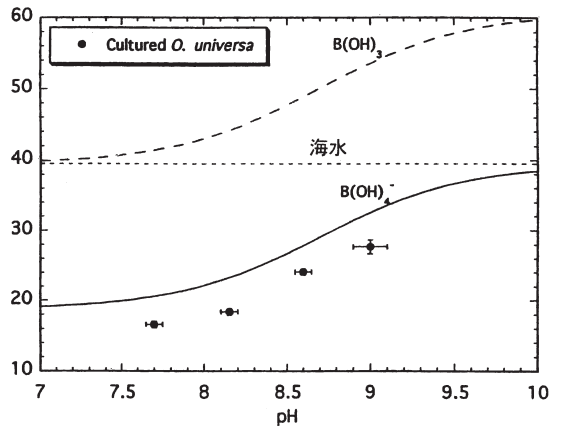
第4図 pHに対する海水中のB(OH)₃とB(OH)₄⁻の存在比(a), それぞれのホウ素同位体比(¹¹B/¹⁰B)とpH変化との関係(b) (Hemming and Hanson, 1992).

の異なるpHで飼育して、有孔虫殻中のホウ素同位体比とpHとの関係を調べ、pH値が大きくなるほど同位体比が重くなることを明らかにし、過去のpHの指標として有用であることを示した(第5図)。さらに、Hönisch *et al.* (2003)は、*O. universa*を光強度の異なる環境で飼育し、光合成活性や共生藻の有無がホウ素同位体比に与える影響を検証した。そして、光強度の低い(光合成活性の低い)場合では、光強度が高い時よりもホウ素同位体比が1.5%軽くなる(pH0.2の低下に相当)ことを示した。

4. まとめ

飼育実験では、生息環境をコントロールでき、自然界では存在し得ないあらゆる条件下での有孔虫の反応を観察・検証することが可能である。

例えば、現在の海洋ではほとんど変化することがないpHでは、現在の値とは異なる過去のpHを、有孔虫がどのように記録するのかということは、飼育実



第5図 pHに対する海水中のB(OH)₃とB(OH)₄⁻のホウ素同位体比(¹¹B/¹⁰B)の変化曲線と、異なるpHで飼育された*O. universa*のホウ素同位体比の値(Sanyal *et al.*, 1996)。

験でしか検証することができない。同様に、前出のSperoらの酸素同位体比やNürnbergらのMg/Ca比にしても、炭酸イオン濃度や配偶子形成前後での比較など、飼育実験ならではの点で貢献する部分も大きい。しかし、それらの利点の一方で、あくまでも自然界ではない人工的な環境における成長であり、生物学的な面から見て、いささか不自然な環境であることは否めない。そして、その生物学的影響への評価や、飼育実験の結果をどこまで野外の結果に適用可能なのかなど、これら考慮すべき点もまだ多く残されている。また有孔虫でも、現行の飼育方法に適した種、あまり適していない種があり、飼育手法の改良も今後の大きな課題となる。しかしながら、これらの課題を持ちつつも、更なる精密な環境復元の礎として、今後も飼育実験手法が古環境復元に多いに活用されることが期待される。

謝辞：東京大学海洋研究所海洋底科学部門の川幡穂高教授及び産業技術総合研究所地質情報研究部門の鈴木 淳博士には、本論文をまとめる機会をいただき、また貴重なご意見、ご教示をいただいた。東京大学海洋研究所海洋底科学部門の朝日博史博士には査読をしていただき、有益なご助言をいただいた。ここに感謝いたします。

引用文献

- Bijma, J., Faber JR., W.W. and Hemleben, Ch. (1990) : Temperature and salinity limits for growth and survival of some planktonic foraminifers in laboratory cultures. *J. Foraminiferal Res.*, 20, 95-116.
- Caron, D.A., Faber JR., W.W. and Bé, A.W.H. (1987) : Effects of temperature and salinity on the growth and survival of the planktonic foraminifer *Globigerinoides sacculifer*. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, 67, 323-341.
- Chave, K.E. (1954) : Aspects of biochemistry of magnesium: 1. Calcareous marine organisms. *J. Geol.*, 62, 266-283.
- Epstein, S., Buchsbaum, R., Lowenstam, H.A. and Urey, H.C. (1953) : Revised carbonate-water isotopic temperature scale. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 64, 1316-1326.
- Erez, J. and Luz, B. (1983) : Experimental paleotemperature equation for planktonic foraminifera. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 1025-1031.
- Hemleben, Ch., Spindler, M. and Anderson, O.R. (1989) : *Modern Planktonic Foraminifera*. Springer-Verlag, New York, 363p.
- Hemming, N.G. and Hanson, G.N. (1992) : Boron isotopic composition and concentration in modern marine carbonates. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56, 537-543.
- Hönisch, B., Bijma, J., Russell, A.D., Spero, H.J., Palmer, M.R., Zeebe, R.E. and Eisenhauer, A. (2003) : The influence of symbiont photosynthesis on the boron isotopic composition of foraminifera shells. *Mar. Micropal.*, 49, 87-96.
- 黒柳あずみ (2002) : 浮遊性有孔虫が記録する海洋環境 — どのような環境指標として有効か? —. *地質ニュース*, no. 575, 5-11.
- McCrea, J.M. (1950) : On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *J. Chem. Phys.*, 18, 849-857.
- Nürnberg, D., Bijma, J. and Hemleben, Ch. (1996) : Assessing the reliability of magnesium in foraminiferal calcite as a proxy for water mass temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 803-814.
- Sanyal, A., Hemming, N.G., Broecker, W.S., Lea, D.W., Spero, H.J. and Hanson, G.N. (1996) : Oceanic pH control on the boron isotopic composition of foraminifera: Evidence from culture experiments. *Paleoceanography*, 11, 513-517.
- Spero, H.J., Bijma, J., Lee, D.W. and Bemis, B.E. (1997) : Effect of seawater carbonate concentration on foraminiferal carbon and oxygen isotopes. *Nature*, 390, 497-500.
- Urey, H.C. (1947) : The thermodynamic properties of isotopic substances. *J. Chem. Soc.*, 562-581.
-
- KUROYANAGI Azumi (2007) : The laboratory culture of planktonic foraminifera.
-
- < 受付 : 2006年12月22日 >