

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?—

黒柳 あずみ¹⁾

1. はじめに

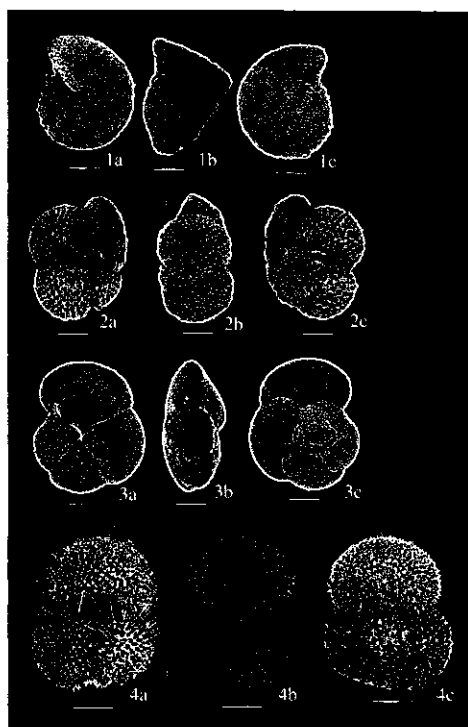
浮遊性有孔虫は、熱帯から極域までの海洋表層に広く分布し、炭酸塩の殻をつくる原生動物プランクトンである。この分類群は、ジュラ紀に出現して以降、ほとんどの外洋の炭酸塩堆積物に化石として含まれ、水温や塩分、栄養塩、生物生産性(餌の量)などの指標になるので、古環境を精密に解析する際に重要である。特に、水温については、殻の酸素同位体比を使うことにより、かなり正確な推定が可能である。その他の指標については、検討すべき課題もあるが、今後大きく発展する可能性がある。

本論では、最初に浮遊性有孔虫の生態に関して概説し、その後、浮遊性有孔虫がどのような環境の情報を記録するかについて紹介し、環境指標としての可能性や今後の課題について考察する。

2. 浮遊性有孔虫とはどんな生物か?

有孔虫は、肉質虫亜門(subphylum Sarcodina)、根足虫綱(Class Phizopodea)有孔虫目(Order Foraminiferida)に分類され、浮遊性有孔虫はグロビゲリナ亜目(Globigerinina)で一括される。

浮遊性有孔虫は、炭酸カルシウム(方解石)の室(chamber)を前殻に付加させながら殻全体を大きくする付加成長を行う。一般的に、らせん旋回の場合が多いが、平巻き(*Hastigerina*, *Globigerinella* 属), Biserial (*Streptochilus* 属)に巻く場合もある。また、ときおり、その旋回軸を曲げる場合もある(たとえば、*Pulleniatina* 属)。殻に棘(spine)を持つ種と持たない種とがあり、熱帯から亜熱帯の表層生息種には一般に棘を持つものが多い(第1図)。



第1図 北太平洋の浮遊性有孔虫。1a-c: *Globorotalia truncatulinoides*, 2a-c: *Globigerinoides sacculifer*, 3a-c: *Globorotalia scitula*, 4a-c: *Globigerinoides ruber*, 2と4が棘(spine)を持つ。スケールバーは100 μm 。

浮遊性有孔虫の大きさは30 μm から数mmに及ぶが、一般的に種の同定が可能な大きさは63 μm 以上である。同定の基準とする最小の大きさは、海域や研究手法、研究者により異なるが、現生種では125 μm または150 μm 、化石種では150 μm がよく用いられている。

浮遊性有孔虫は、熱帯から極域までの主として

1) 東北大学大学院理学研究科:
〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉

キーワード: 浮遊性有孔虫, 環境指標, 水温指標, 酸素同位体比, Mg/Ca比, 変換関数

100m以浅の海洋表層で生息するが、*Globorotalia* 属の一部 (*G. hirsuta*, *G. truncatulinoides*) など 1,000m以深で生息する種もある。植物プランクトンや動物プランクトンを捕食しており、棘を持つ種は肉食、棘を持たない種では草食を一般に好む傾向がある。また、*Globigerinoides*属などには、渦鞭毛藻や黄金藻のような共生藻を有するものがある。生存期間は、表層種では約2週間～1ヶ月、深層種では半年～1年とされている。しかし、深層種の生態はまだ明らかではない (Hemleben *et al.*, 1989)。

3. 水温指標

浮遊性有孔虫の分布は、基本的に水温(または水塊)に規制されるので、過去の水温を推定するために利用されることが多い。浮遊性有孔虫を用いて、水温を推定する場合、殻の化学組成(酸素同位体比やMg/Ca比)から求める方法と群集組成から求める場合(変換関数、*Neogloboquadrina pachyderma*の巻き方向など)がある。

3.1 殻の酸素同位体比

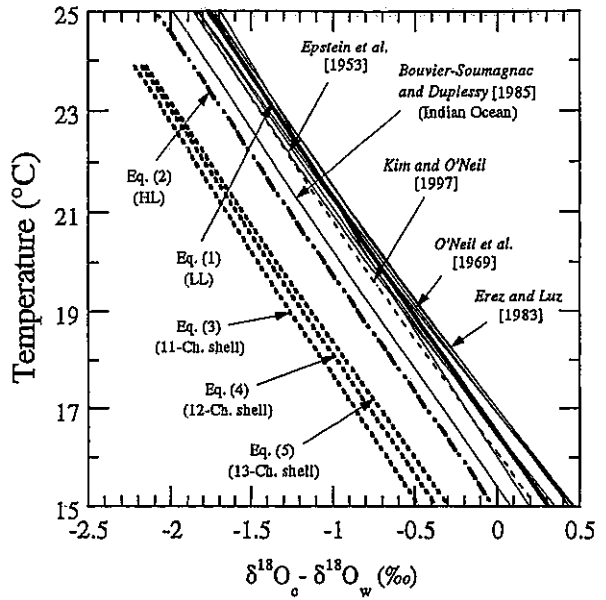
有孔虫が、新しい室を形成する場合、その殻の中に海水の酸素同位体比 ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) を記録する。これは炭酸塩が生成する際、海水との同位体分別が温度依存性を持つという原理に基づくものである。この関係はUrey (1947) により初めて報告され、McCrea (1950) や Epstein *et al.* (1953) などの室内実験で検証された。酸素同位体比と水温との関係式は一般に下式 (1) で表せる。ここで、Temp. は水温、a-cは定数、 $\delta^{18}\text{O}_c$ は炭酸塩、 $\delta^{18}\text{O}_w$ は海水の同位体比である。

$$\text{Temp. (}^\circ\text{C)} = a + b (\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w) + c (\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w)^2 \quad (1)$$

(1) 式の a, b, c の定数は、研究者により様々な値が報告されている(第2図)。例えば、Epstein *et al.* (1953) では下式となる。

$$\text{Temp. (}^\circ\text{C)} = 16.5 - 4.3 (\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w) + 0.14 (\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w)^2 \quad (2)$$

現在の酸素同位体比の測定機器の誤差は±0.1‰なので、(2)式を用いた温度計の精度は±0.4℃となり、高い精度を示す。同位体比を使用する場



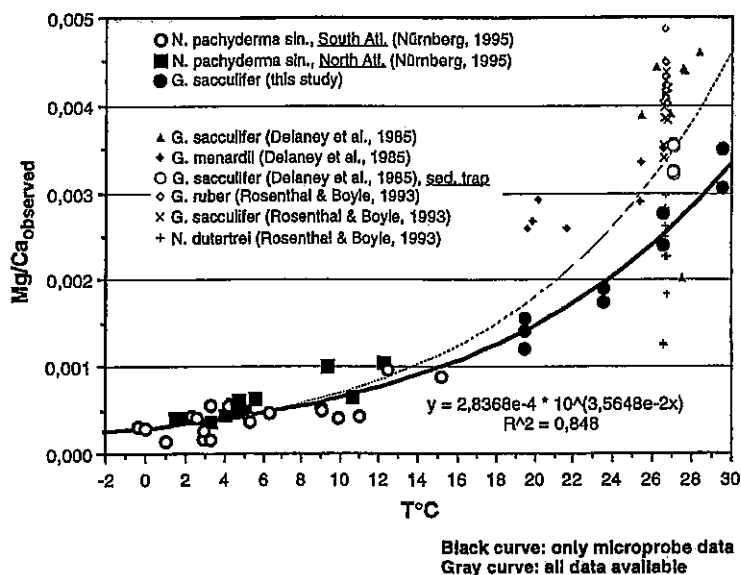
第2図 炭酸カルシウムと水の酸素同位体比の差と水温との関係 (Bemis *et al.*, 1998)。

合、最も問題になるのは続成作用による変質である。その他、共生藻の有無や種ごとによる生物効果 (vital effect) (Spero and Lea, 1996)、氷床量や降水量等の影響による海水の同位体比組成の変化、海水のpHや炭酸塩濃度 (Spero *et al.*, 1997) などが値に影響を与えるので注意する必要がある。

3.2 殻のマグネシウム・カルシウム比 (Mg/Ca比)

有孔虫の炭酸塩(カルシウム)殻が生成される際、水温が高いほど多くのMgを殻中に取り込む性質がある。これは、MgとCa間のイオン交換反応の平衡定数が温度に依存して変化するために起こる現象である。したがって、殻中のMg/Ca比を測定できれば、殻形成時の海水温が推定できることになる。

このMg取り込みに関する温度依存性を指摘したのは、Chave (1954) が最初である。その後、否定的な見解も出されたが (Krinsley, 1960; Savin and Douglas, 1973など)、最近では、両者の間には正の相関があることが認められ、水温指標として利用されるようになった (Delaney *et al.*, 1985; Puechmaile, 1994など)。浮遊性有孔虫に関しては、*Globigerinoides sacculifer*を用いて水温、塩分を制御した飼育実験があり、



第3図
コア試料, セジメントトラップ, 飼育実験で得られた浮遊性有孔虫殻のMg/Ca比と水温との関係 (Nürnberg et al., 1996).

$$\text{Mg/Ca}_{\text{observed}} = 0.000284 * 10^{(0.0354 * T^{\circ}\text{C})} \quad (3)$$

という関係式が報告されている (Nürnberg et al., 1996) (第3図). 但し, 種による係数の違い, 堆積後の溶解などの続成作用, 異常な高・低塩分水塊の存在, 生殖後のMg濃集などが, この関係式に影響を与える. それらの影響がない場合, 殻のMg/Ca比はほぼ水温に支配されることが示唆されており (Nürnberg et al., 1996), その誤差は約±1~2°Cの範囲の正確さを示す. 現在の海洋のMg/Ca比は, 水深や海域を問わず一定なので (Broecker and Peng, 1982), 浮遊性有孔虫殻のMg/Ca比を用いた方法は, 今後, 水温を推定するのに有力な手段となるであろう.

3.3 *N. pachyderma*を用いた水温推定

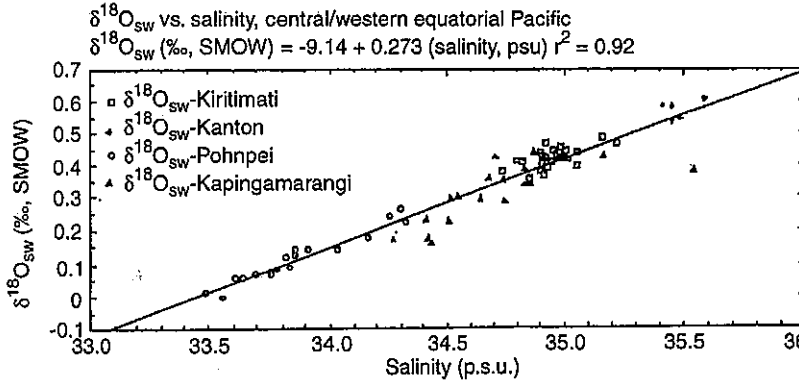
*N. pachyderma*の殻の巻き方向は一般に水温に規制され, ある水温より高ければ右巻き, 低ければ左巻きの殻の個体が群集の中で卓越するといわれてきた (たとえば, 黒柳, 2002など). そこで, この種の左巻き個体が多い場合, その海域の水温は相対的に低いと結論される. この水温との関係は, 酸素同位体比などによっても検証され, その有効性には疑いがない. その境界となる水温は, 7.2°C (Ericson, 1959; Bé and Hamlin, 1967), 8°C (Bé, 1960; Reynolds and Thunell, 1986), 10~15°C (Ingle, 1973)と推定されている.

一方, 最近の遺伝子解析の研究より, *N. pachyderma*の巻き方向は生息時の水温に応じて変化するのではなく, 両者の群集は別種であることが明らかとなってきた (Darling et al., 2000). しかし, 両者の個体が別種であるとしても, 各々の群集の示す環境 (この場合, 水温) が異なっていることに違いはない. したがって, 両者の群集の相対比を水温の推定に用いることに問題はないと思われる. この方法は簡便であるので, 続成作用により同位体比やMg/Ca比が使えない試料でも有効である.

3.4 変換関数を用いた水温推定

既に述べたように, 浮遊性有孔虫と水温の間には密接な関係がある. そこで, 現在の海洋で水温と浮遊性有孔虫群集との関係式をつくることができれば, 逆に化石群集から当時の古水温を推定できるはずである. この関係式が, 変換関数とよばれている. 変換関数に用いる各因子は, 堆積物中の化石群集に対してQモード主成分分析を行い, バリマックス群集を抽出後, 水温などの海洋観測値と重回帰分析を行い決定される (例えば Imbrie and Kipp, 1971など).

日本近海では, Takemoto and Oda (1997)により, 夏の表層水温 (T_s)の変換関数 (PFJ-125)が提案された. (4)式に基づく水温推定の誤差は±1.17°Cで, X_1 - X_5 はバリマックス群集を表している.



第4図
中央および西太平洋における表層海水の塩分と酸素同位体比の関係 (Fairbanks et al., 1997).

$$Ts = 4.16X_1 - 2.28X_2 - 6.50X_3 + 1.23X_4 - 3.41X_5 + 23.74 \quad (4)$$

変換関数は、海域により各係数が異なるので、海域ごとに独自の関数を作成する必要がある。このとき、炭酸塩溶解の影響を慎重に考慮しなければならない。この手法も化学的な手法が使えない試料に対して有効である。

4. 塩分指標

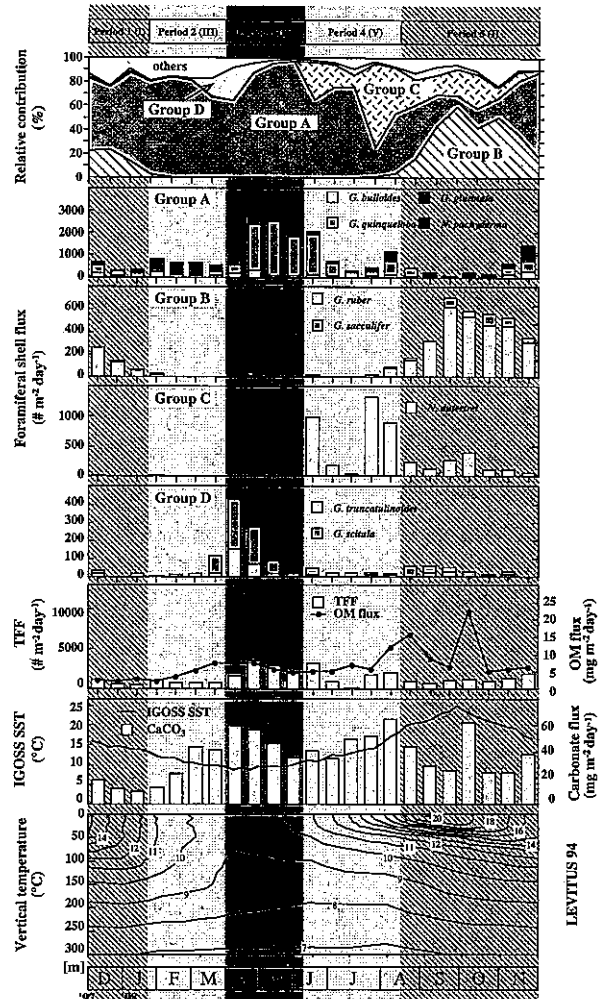
現在の表層の塩分と酸素同位体比の間には正の相関が見られる(第4図)。有孔虫殻の酸素同位体比は海水温と海水の同位体比により決定されるので、水温が既知であれば、殻が形成された時の塩分を知ることができる。

また、変換関数などの結果によると、*Globigerinita glutinata*や*Turborotalita humilis*が低塩分の指標種として解釈されている。実際に、ベンガル湾ではモンスーンにより淡水が流入し、低塩分化した時期に*G. glutinata*が増加している(Guptha et al., 1997)。しかし、飼育実験によると、浮遊性有孔虫の塩分に対する耐性はそれほど低くないことが確認されている(Bijma et al., 1990)。したがって、これらの种群の増加を単純に塩分の低下と結びつけるのは危険であり、他の要因も検討を要するであろう。

5. 生物生産(湧昇)の指標

海洋表層の生物生産を制御しているのは、珪藻などの植物プランクトンの量である。その量が最も多くなるのは、栄養塩類を表層まで運搬している

Site 40N



第5図 北太平洋のセジメントラップSite 40N (40°N, 165°E)での浮遊性有孔虫群集や有機物などのフラックス量、水温、水塊構造の時系列変化。最上部のIからVまでのローマ数字は第1表の環境タイプをそれぞれ示している(Kuroyanagi et al., in press)。各々のタイプが卓越する時期をPeriodの1から5までに区分した。

第1表 浮遊性有孔虫, 有機物, 水温および水塊構造から見た表層環境のタイプ区分. それぞれの環境タイプが卓越する期間を右端に示した(Kuroyangi et al., in press).

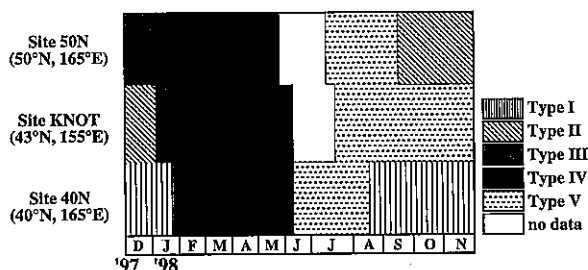
	1) Foraminiferal Group	2) TFFs	3) OM fluxes	4) SST, thermal structure	Period		
					40N	KNOT	50N
Type I	Group B	low (av. 760-1290 shells m ⁻² day ⁻¹)	low to moderate (av. 2.3-9.6 mg m ⁻² day ⁻¹)	stratified and weakly stratified SST maximum	period 1 period 5		
Type II	Group A	high (av. 7790-8740)	moderate (av. 7.9-9.5)	weakly stratified		period 1	period 4
Type III	Group A	low (av. 860-1930)	low (av. 3.6-7.9)	destruction of stratification winter	period 2	period 2	period 1
Type IV	Group D at 40N + Group A	relatively high (av. 2500-9020)	moderate (av. 5.4-9.0)	well mixed SST minimum	period 3	period 3	period 2
Type V	Group C at 40N and KNOT + Group A	relatively low (av. 1750-3100)	moderate to high (av. 6.5-14.4)	strongly stratified	period 4	period 4	period 3

湧昇流が発生している地域である。浮遊性有孔虫に関して、湧昇地域に多産する代表的な種が *Globigerina bulloides* と *Neogloboquadrina dutertrei* である (Bradshaw, 1959; Thiede, 1975; Wefer et al., 1983; Thunell and Reynolds, 1984 など)。但し、前者は 11-16°C 程度の水温の低い環境を好み、後者はより温暖で植物プランクトン密度の高い水塊を好むことが報告されている (Sautter and Thunell, 1991; Watkins et al., 1996)。また、実際に湧昇が生じたとき、*G. bulloides* は湧昇もしくは湧昇の初期、*N. dutertrei* は、湧昇直後の水塊が成層化し始める時期にそれぞれ増加し、両者の間で多産する時期は異なっている (Sautter and Thunell, 1991; 第5図)。

一方、栄養塩類の量を有孔虫殻のカドミウム/カルシウム比 (Cd/Ca 比) から直接得ようとする方法もある。この方法は、底生有孔虫ではそれなりの成果を挙げたが、北大西洋の浮遊性有孔虫では十分な結果が得られていない (McIntyre et al., 1997)。おそらく、北大西洋では Cd 濃度が相対的に低い (<0.01 nmol kg⁻¹) ことが原因であろう。これに対して、太平洋の Cd 濃度は大西洋よりも高い (Millero, 1996) ので、今後の発展が期待できるかもしれない。

6. 浮遊性有孔虫と複数の環境因子

実際には、今まで述べてきたこれらの環境因子は単独に認識されるわけではなく、複雑に結びついている。そこで、浮遊性有孔虫の群集解析からどのように環境因子を読みとるかその実例を示す。



第6図 異なる緯度における環境タイプの季節変化 (Kuroyangi et al., in press). タイプIVの時期が各サイトで共通していることがわかる。

Kuroyangi et al. (in press) は、北緯40度付近に設置したセジメント・トラップに回収された浮遊性有孔虫のフラックスの時系列解析を行った (第5図)。ここでは、浮遊性有孔虫群集は4グループに区分することができ、グループAは湧昇期、グループBは温暖期、グループCは湧昇終了直後、グループDは鉛直混合が活発で水温最小時に、それぞれ群集内で卓越することが明らかとなった。各々の群集は、有機物、水温、水塊構造など、それぞれの環境因子を反映していると考えられるので、それらを整理して、群集と環境因子の関係をまとめることができる (第1表)。また、ここで設定した浮遊性有孔虫群集と環境因子の関係は、異なる緯度であっても適用できることを示した (第6図)。今後、これにさらなる定量パラメーターを入力できれば、浮遊性有孔虫がより強力な環境指標となることが期待される。

7. まとめ

環境指標で重要なことは、1) 精度、2) 汎用性、

3) 簡便さの3つである。浮遊性有孔虫では、水温としての指標が上述の条件を満たしており、現段階で最も実用的である。しかし、他の環境因子についても、今後プランクトンネットやセジメントトラップ、飼育実験、分子系統解析などの野外・室内実験を通じて、確度、精度の向上が大いに期待できる。また、浮遊性有孔虫と他の生物や堆積物から得られた情報を組み合わせることにより、将来的にはより精密な古環境復元が可能となるであろう。

謝辞：本論文をまとめるにあたり九州大学大学院比較社会文化研究科の西弘副助教授、産業技術総合研究所海洋資源環境研究部門の川幡穂高博士には原稿を読んでいただき、様々なご指導をいただいた。千葉大学理学部地球科学科の豊福高志博士、千葉大学海洋バイオシステム研究センターの土屋正史博士、茨城大学教育学部の大串健一博士、産業技術総合研究所の蓑島佳代氏の各位からは貴重なご意見、ご教示をいただいた。ここに感謝いたします。

引用文献

- Bé, A.W.H. (1960) : Ecology of Recent planktonic foraminifera: Part 2. Bathymetric and seasonal distributions in the Sargasso Sea off Bermuda. *Micropal.*, 6, 373-392.
- Bé, A.W.H. and Hamlin, W.H. (1967) : Ecology of Recent planktonic foraminifera, Part3: distribution in the North Atlantic during the summer of 1962. *Micropal.*, 13, 87-106.
- Bemis, B.E., Spero, H.J., Bijma, J. and David, W.L. (1998) : Reevaluation of the oxygen isotopic composition of planktonic foraminifera: Experimental results and revised paleotemperature equations. *Paleoceanography*, 13, 150-160.
- 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.
- Bradshaw, J.S. (1959) : Ecology of living planktonic foraminifera in the north and equatorial Pacific Ocean. *Contributions of the Cushman Foundation for foraminiferal Research*, 10, 25-64.
- Broecker, W.S. and Peng, T.H. (1982) : Tracers in the Sea. *Palisades*, New York, 690p.
- Chave, K.E. (1954) : Aspects of biochemistry of magnesium: 1. Calcareous marine organisms. *J. Geol.*, 62, 266-283.
- Darling, K.F., Wade, C.M., Stewart, I.A., Kroon, D., Dingle, R. and Brown, A.J.L. (2000) : Molecular evidence for genetic mixing of Arctic and Antarctic subpolar populations of planktonic foraminifers. *Nature*, 405, 43-47.
- Delaney, M.L., Bé, A.W.H. and Boyle, E.A. (1985) : Li, Sr, Mg, Na in foraminiferal calcite shells from laboratory culture, sediment traps, and sediment cores. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, 1327-1341.
- 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.
- Ericson, D.B. (1959) : Coiling direction of *Globigerina pachyderma* as a climatic index. *Science*, 130, 219-220.
- Fairbanks, R.G., Evans, M.N., Rubenstone, R.A., Mortlock, K.B., Moore, M.D. and Charles, C.D. (1997) : Evaluating climate indices and their geochemical proxies measured in corals. *Coral reefs*, 16, S93-S100.
- Guptha, M.V.S., Curry, W.B., Ittekkot, V. and Muralinath, A.S. (1997) : Seasonal variation in the flux of planktonic foraminifera: sediment trap results from the Bay of Bengal, Northern Indian Ocean. *J. Foraminiferal Res.*, 27, 5-19.
- Hemleben, Ch., Spindler, M. and Anderson, O.R. (1989) : *Modern Planktonic Foraminifera*. Springer-Verlag, New York, 363p.
- Imbrie, J. and Kipp, N.G. (1971) : In: *The Late Cenozoic Glacial Ages*. K.K. Turekian (Ed.). Yale University Press, 71-181.
- Ingle, J.C., Jr. (1973) : Neogene foraminifera from the northeastern Pacific Ocean, Leg 18, DSDP: Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Leg 18, Washington, 617-567.
- Krinsley, D. (1960) : Trace elements in the tests of planktic foraminifera. *Micropal.*, 63, 297-300.
- 黒柳あずみ (2002) : 浮遊性有孔虫の *Neogloboquadrina pachyderma* の巻き方向は水温を反映するか? : 環境指標としての有効性と課題. *地質ニュース*, no.571, 33-39.
- Kuroyanagi, A., Kawahata, H., Nishi, H. and Honda, M.C. (in press) : Seasonal changes in planktonic foraminifera in the northwestern North Pacific Ocean: sediment trap experiments from subarctic and subtropical gyres. *Deep-Sea Res. Part II*.
- McCrea, J.M. (1950) : On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *J. Chem. Phys.*, 18, 849-857.
- McIntyre, K., Ravelob, A.C., Delaney, M.L., Anderson, L.D. and Johannessen, T. (1997) : Ground truthing the Cd/Ca-carbon isotope relationship in foraminifera of the Greenland-Iceland-Norwegian Seas. *Mar. Geology*, 140, 61-73.
- Millero, F.J. (1996) : *Chemical oceanography*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, 469p.
- 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.
- Puechmaille, C. (1994) : Mg, Sr and Na fluctuations in the test of modern and recent *Globigerina bulloides*. *Chem. Geol.*, 116, 147-152.
- Reynolds, L.A. and Thunell, R.C. (1986) : Seasonal production and morphologic variation of *Neogloboquadrina pachyderma* (Ehrenberg) in the northeast Pacific. *Micropal.*, 32, 1-18.
- Sautter, L.R. and Thunell, R.C. (1991) : Planktonic foraminiferal response to upwelling and seasonal hydrographic conditions: sediment trap results from San Pedro Basin, southern California Bight. *J. Foraminiferal Res.*, 21, 347-363.
- Savin, S.M. and Douglas, R.G. (1973) : Stable Isotope and magnesium geochemistry of recent planktic foraminifera from the South Pacific. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 84, 2327-2342.
- Spero, H.J. and Lea, D.W. (1996) : Experimental determination of stable isotope variability in *Globigerina bulloides*: implications for

- paleoceanographic reconstructions, *Mar. Micropal.*, 28, 231-246.
- 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.
- Takemoto, A. and Oda, M. (1997) : New planktic foraminiferal transfer functions for the Kuroshio-Oyashio current region off Japan. *Paleontol. Res.*, 1, 291-310.
- Thiede, J. (1975) : Distribution of foraminifera in surface waters of a coastal upwelling area. *Nature* 253, 712-714.
- Thunell, R.C. and Reynolds, L.A. (1984) : Sedimentation of planktonic foraminifera: Seasonal changes in species flux in the Panama Basin, *Micropal.*, 30, 241-260.
- Urey, H.C. (1947) : The thermodynamic properties of isotopic substances. *J. Chem. Soc.*, 562-581.
- Watkins, J.M., Mix, A.C. and Wilson, J. (1996) : Living planktic foraminifera: tracers of circulation and productivity regimes in the central equatorial Pacific. *Deep-Sea Res. II*, 43, 1257-1282.
- Wefer, G., Dunbar, R.G. and Suess, E. (1983) : Stable isotopes of foraminifers off Peru recording high fertility and changes in upwelling history. Thiede, J. and Suess, E. (Eds.), *Coastal Upwelling: Its Sedimentary Record, Part B*: Plenum Press, New York, 295-308.
-
- KUROYANAGI Azumi (2002) : The reliability of the planktonic foraminifera as a proxy for the sea surface environment.
-

< 受付 : 2002年5月9日 >