

日本周辺海域の浮遊性有孔虫 *Neogloboquadrina pachyderma* の分布と古環境復元への応用, 北太平洋での季節変動と巻き方向

黒柳あずみ

独立行政法人産業技術総合研究所 地質情報研究部門学振特別研究員

Spatial and seasonal distribution of planktonic foraminifera *Neogloboquadrina pachyderma* in the northwestern North Pacific and reconstruction of paleoceanography off Shimokita

Azumi Kuroyanagi

Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba-higashi 1-1-1, Ibaraki, 305-8567

Abstract. Planktonic foraminifera can record the upper ocean environments. For the purpose of the better understanding of the subpolar species *Neogloboquadrina pachyderma*, plankton tows, IMAGES core and sediment trap samples were analyzed. Plankton tow results indicate that *N. pachyderma* mainly inhabits below the pycnocline (>20 m). On the other hand, *N. incompta* prefers shallower and warmer waters than *N. pachyderma*, and its abundance is correlated with the chlorophyll-*a* concentration around the Japanese Islands. Based on these spatial distributions, the changes in mass accumulation rates (MAR), and coiling ratio of *N. pachyderma*, the palaeo-environment and water mass structure off Shimokita area (41°33.9'N, 141°52.1'E) were reconstructed during the last 26,900 years.

The only Oyashio Current affected the surface and subsurface waters in 26.9-10.6 thousand calendar years before present (cal. kyr BP) with relatively subsurface warming at ~14 cal. kyr BP. The Tsugaru Current started to enter the Pacific about 11.2-10.6 cal. kyr BP and led to the baroclinic conditions that surface and subsurface layers were under the influence of the Tsugaru and Oyashio currents, respectively. Stratification of water column and surface layer warming developed with increasing of inflow of the Tsushima Current and finally the subsurface layer started to warm at about 6 cal. kyr BP.

Time-series sediment trap studies were also conducted in the northwestern North Pacific in 1998-2000. Seasonal flux profile of right-coiling *N. pachyderma* was consistent with that of the left-coiling one at the relatively northern area (50°N), while they were different at the southern area (40°N). It would be caused by the genetic variation of right-coiling *N. pachyderma* observed in the North Atlantic, and this boundary seemed to be 5% of right-coiling ratio of *N. pachyderma*.

Key words: planktonic foraminifera, *Neogloboquadrina pachyderma*, coiling direction, vertical distribution, plankton tow, IMAGES core, sediment trap

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、生息時の水温や塩分、栄養塩、生物生産性などの環境を群集組成や殻の化学組成に記録する。有孔虫を用いた環境復元の際に重要となるのは、環境を記録するメカニズムに併せ、記録されている環境が水柱のどの場所のものなのか、という点である。前者については、現在、主に変換関数や殻の酸素同位体比、マグネシウム・カルシウム比 (Mg/Ca 比) を用いてキャリブレーションがなされている (黒柳, 2002)。また

後者については、1970年代から80年代前半にかけての研究で有孔虫のおおまかな生息域 (空間分布) が明らかにされた。しかしこれらの初期の生息域調査では、近年の研究で主に用いられているサイズ (125 ~ 150 μm) と比べ、比較的粗いメッシュサイズ (200 ~ 333 μm) が用いられ、特に熱帯種と比べて比較的サイズの小さな寒冷種の空間分布についてはまだ不確かな点も多い (例えば、Bé and Tolderlund, 1971; Bé and Hutson, 1977; Fairbanks *et al.*, 1982; Bé *et al.*, 1985)。

Neogloboquadrina pachyderma は亜寒帯、寒帯を代表する浮遊性有孔虫種であり、中・高緯度域の有孔虫群集中に卓越して存在する。また、水温に応じて変化すると考えられているこの種の殻の巻き方向を、古環境推定で用

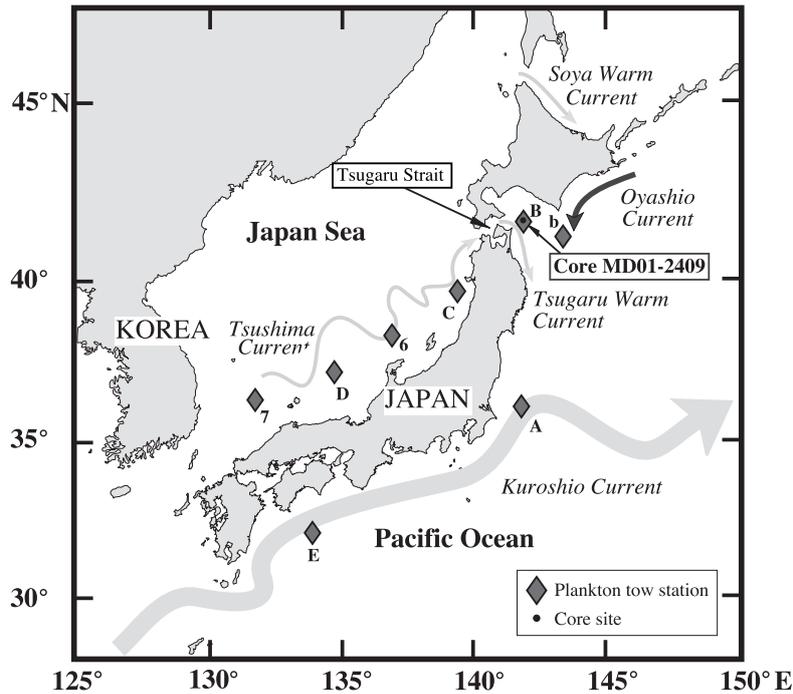


図1. プランクトンネットとコアの採取地点。暖流は灰色線，寒流は黒線で示されている。地図中の海流は2週間ごとに公表される海上保安庁海洋速報を基に，プランクトンネット観測当時（2002年5月14日～6月11日）のものに改訂した（JHOD, 2002）。

Fig. 1. Location map of the sampling stations. Diamonds indicate tow stations, dot core sampling stations. Gray lines indicate warm currents, black lines cold currents. The currents on the map are modified from the biweekly reports of the Quick Bulletin of Ocean Conditions from 14 May 2002 to 11 June 2002 (JHOD, 2002).

いることも多い。そのため古環境推定をする際に，この種の空間分布の把握が重要となる。しかし前述のとおり，亜寒帯種の研究報告例は少なく，日本周辺海域での詳細な *N. pachyderma* の分布はあまり明らかではない（例えば，Arikawa, 1983）。そこで，本論文では現在の日本列島周辺海域における *N. pachyderma* の空間分布を明らかにし，その結果を化石記録に応用する。さらに *N. pachyderma* の時間分布に焦点を当て，巻き方向ごとの季節変動について考察する。

研究概要

N. pachyderma を用いた古環境の推定をより精密にするためには，この種の空間分布や時間分布の把握が必要である。そこでプランクトンネット試料を用いて現在の海洋でこの種が水柱のどの水深にどのように生息しているのかという空間分布を調べ，その結果を実際の堆積物に応用して検証した。またセジメントトラップ試料を用いて時間分布を調査し，さらに巻き方向による分布の違いについての考察を行った。

N. pachyderma の空間分布は，プランクトンネットや表層堆積物を用いて，東部太平洋（Ortiz *et al.*, 1996），東部北大西洋（Schiebel *et al.*, 2001），北大西洋やインド洋（Hilbrecht, 1997）やノルウェー沖（Simstich *et al.*, 2003）などで報告されている。しかし，これらの議論で用いら

れている環境因子の値は，複数年の平均値や堆積物からの推定が多く，プランクトンネット観測時の環境を直接測定して比較した例は少なく，分布を規制する因子についての統一した見解はまだない。日本周辺海域の亜寒帯域では，Arikawa (1983) 以降の研究報告は少なく，この地域の *N. pachyderma* の詳細な分布についてはまだ不明な点も多い。そこで本論では日本周辺海域でプランクトンネット観測（図1）と同時に海洋環境も測定し，*N. pachyderma* の詳細な鉛直分布，また環境との関連を調べた。

また，上記のネット観測より得られた空間分布の結果を，下北沖 IMAGES コア試料（図1）に応用し，そのコア中の有孔虫記録から過去の環境変遷を推定した。現在，日本海は周囲の海洋と幾つかの海峡により接しているが，現在よりも海水準が130 m低下したと見積もられている最終氷期最盛期（Last Glacial Maximum: LGM）には海峡が陸化し，日本海は周囲の海洋からほとんど孤立したということが知られている（例えば，Keigwin and Gorbarenko, 1992; Tada, 1994; 大場ほか, 1995）。しかしLGM後に徐々に海水準が上昇すると，親潮がまず日本海に流入し，続いて対馬暖流が日本海に流入するなど日本海とそれに接する海洋の表層環境は急激に変化した。これらの水塊や海洋環境の変化については幾つもの研究がなされているが，日本海での研究が多く（例えば，大場ほか, 1995; Ishiwatari *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 2000），津軽海峡を

挟んで東側となる太平洋側の研究は少ない。本論文で用いた下北沖コアは津軽海峡の東側に位置し、この LGM 後の太平洋側の水塊変遷を記録していると期待される。

また *N. pachyderma* の巻き方向が水塊指標となる適応範囲を検討するために、セジメントトラップ試料を用いた。プランクトンネットの結果では巻き方向と水塊との関係が成り立ったが、外洋の北西部北太平洋ではこの関係が見られない事例も報告されている (Kuroyanagi *et al.*, 2002)。*N. pachyderma* の分布については、一般に表層水温が約 7.2 ~ 8 °C を超えると群集内で卓越する巻き方向が左から右巻きへと切り替わると考えられている (例えば、Bé, 1960; Bé and Hamlin, 1967; Reynolds and Thunell, 1986) が、前出の Kuroyanagi *et al.* (2002) のトラップの結果では表層水温が 8 °C 以上の時期でも左巻き個体が優勢のままであった。このように、日本周辺海域では指標となるが、太平洋のある海域ではそれが見られない、この違いは何によるものなのだろうか。その境界条件について北西部北太平洋の 3 地点における複数年のセジメントトラップデータを用いて検討した。

実験方法・試料

プランクトンネット

N. pachyderma の水平・鉛直分布を調べるため、2002 年の 5 月下旬から 6 月上旬にかけて日本列島周辺海域の 8 地点の水深 0 ~ 200 m の 7 区間 (20/40 m 間隔) でプランクトンネット観測を行った (図 1)。またネット観測と同時に、conductivity temperature depth sensor (CTD) 及び fast repetition rate fluorescence (FRRF) を用いて水温、塩分、クロロフィル a 濃度、光強度等を約 1 m 間隔以下の解像度で観測した。論文中の水温の議論ではポテンシャル水温を用いた。採取された試料は船上でローズベンガルを用いて染色した後、中和した 5% ホルマリン海水を加え、2 ~ 4 °C で冷蔵保存した。実験室でさらに試料を回転式分割器で分割後、水中でふるいにかけた後に乾燥して、染色された 125 μm サイズ以上の個体を拾い出し、同定・計数して個体群密度を算出した。採取地点での表層海流は、図 1 に示したとおりである。図は海上保安庁の海洋速報の海流図を実験期間に合わせて改訂しており、海流は観測当時 (2002 年 5 月 14 日 ~ 6 月 11 日) のものである (JHOD, 2002)。この海流の図と現場での水温、塩分等の測定より、サイト E は黒潮、A は黒潮と北からの冷たい水塊との混合海域に位置し、またサイト B と b は親潮の影響を受けていることがわかった。サイト 7, D, 6, C は日本海の対馬暖流内に位置し、表層水温は 16 ~ 17 °C である。観測当時、サイト 7 と D はそれぞれ、冷水渦 (cold eddy) と暖水渦 (warm eddy) に位置していた。

コア堆積物

本論文に用いた MD01-2409 コアは、2001 年の

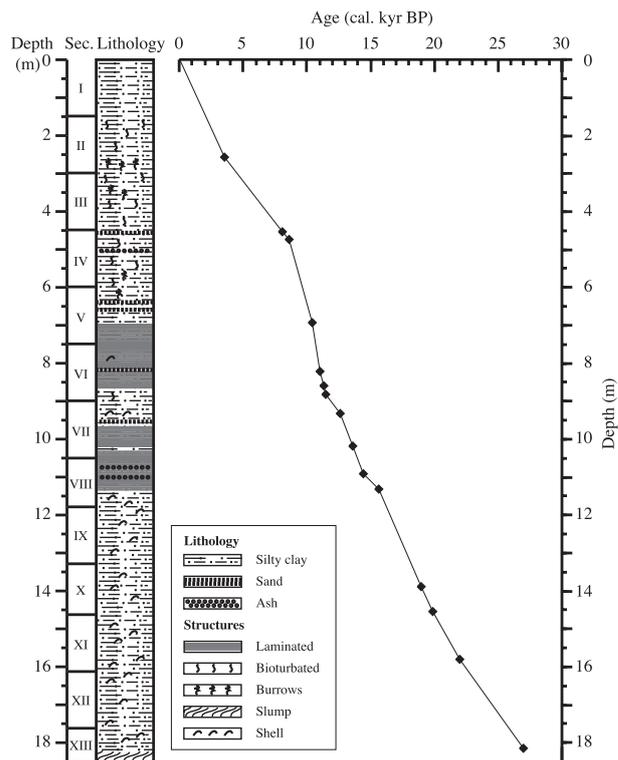


図 2. IMAGES MD01-2409 コアの岩相と AMS カレンダー年代。
Fig. 2. Visually observed lithology and the age-depth relationship based on AMS measurements.

IMAGES 航海で下北沖の水深 970 m の海底から採取された。コアの全長は 44.67 m だがコア下部 (18.75 ~ 40.30 m) はスランプ堆積物で構成されていたため、上部の 18.11 m を本研究の分析に用いた。岩相は主にオリブグレイ色の均質なシルト質粘土で、火山灰層を狭在し、二つの顕著なラミナ層が観察された (図 2)。有孔虫試料は 5 ~ 20 cm 間隔でサンプリングを行い、63 μm 開口のフルイ上で洗浄、乾燥して分割後、150 μm 以上の個体を拾いだし、同定・計数した。今回、浮遊性有孔虫のサイズは他の研究との比較のため、堆積物試料によく用いられる 150 μm 以上を使用した。コアの年代は、15 試料の浮遊性有孔虫 ¹⁴C 年代を日本原子力研究所むつ事業所の AMS で測定し、カレンダー年代に換算して求めた (図 2)。コアの記載や年代算出方法、浮遊性有孔虫群集の詳細については Kuroyanagi *et al.* (2006) に記述した。このコアで分析を行った期間の年代は、約 27 thousand calendar years before present (以後 cal. kyr BP と表現) に及ぶと考えられる (図 2)。

セジメントトラップ

N. pachyderma の季節変化を調べるため、1997 年 12 月から約 3 年間、北西部北太平洋の 3 地点、40 N (40° N, 165° E), KNOT (44° N, 155° E), 50 N (50° N, 165° E) に係留されたセジメントトラップ試料を分析した。セジメントトラップの 2 地点は西部亜寒帯循環 (western

表 1. 各サイトの 0 ~ 200m 水柱における, 浮遊性有孔虫の個体群密度, 相対頻度, また *Neogloboquadrina pachyderma* 全体に対する右巻きの比率.

Table 1. Standing stocks, relative abundance, and right-coiling ratio of *Neogloboquadrina pachyderma* in the water column of 0-200 m.

Tow station name	St. A	St. E	St. 7	St. D	St. 6	St. C	St. B	St. b
Current name	Kuroshio	Kuroshio & cold waters	Tsushima (cold eddy)	Tsushima (warm eddy)	Tsushima	Tsushima	Tsugaru/Oyashio	Tsugaru/Oyashio
Total planktonic foraminiferal standing stocks (shells m ⁻³)	63.8	17.5	103.3	11.3	39.6	36.9	53.1	82.8
<i>N. incompta</i> (shells m ⁻³) (Relative abundance)	12.3 (19%)	2.6 (15%)	32.7 (32%)	3.0 (27%)	30.4 (77%)	18.3 (50%)	23.5 (44%)	30.3 (37%)
<i>N. pachyderma</i> (dex.) (shells m ⁻³) (Relative abundance)	0.0 (0%)	0.0 (0%)	2.8 (3%)	0.2 (1%)	0.8 (2%)	1.8 (5%)	0.9 (2%)	0.8 (1%)
<i>N. pachyderma</i> (sin.) (shells m ⁻³) (Relative abundance)	0.0 (0%)	0.0 (0%)	0.1 (0%)	0.0 (0%)	0.0 (0%)	0.0 (0%)	3.3 (6%)	2.6 (3%)
Right coiling ratio of <i>N. pachyderma</i> (%)	-	-	96	100	100	100	21	25

subarctic gyre) 内に, 残り 1 地点は亜熱帯循環の北端に位置している. トラップ試料では, 約 2 週間ごと約 3 年間の *N. pachyderma* の巻き方向の時系列変化を調査した. 有孔虫個体は 125 μm 以上を同定・計数してフラックス(流量)を求めた. 実験方法および研究海域, トラップ深度等の詳細については Kuroyanagi *et al.* (2002) に述べられているものと同様である.

日本列島周辺海域における *Neogloboquadrina pachyderma* の空間分布

N. pachyderma の空間分布と水温・水塊との対応

N. pachyderma の産出状況は, 表 1 と図 3 のとおりである. これを見ると, この種の右巻きと左巻きは明らかに異なる産出状況を示している. 右巻きは日本海の 4 地点 (7, D, 6, C) (対馬暖流) で卓越し, 一方, 左巻きの個体は津軽暖流と親潮の影響下にある 2 地点 (B, b) で卓越した (表 1・図 3). 右巻き個体は, 15 °C で産出し, 6 ~ 9 °C 付近で極大, 左巻き個体は 11 °C 以下で産出し, 5 ~ 8 °C 付近で極大値を示した. これは, 両個体群の水温の耐性や水塊の好み異なることを示唆している. また, 右巻きと左巻きの個体を合わせた *N. pachyderma* 全体として考えると, 水温 12 °C 以下で主な産出を示すことがわかる. 他の研究から *N. pachyderma* の最適水温は, 4.8 ± 4.7 °C (Bé and Hutson, 1977) で, セジメントトラップ試料より求められた上限は 12 °C (Sautter and Thunell, 1991) ということが報告されており, 今回の結果とも整合的である. 以上より, 本研究海域では *N. pachyderma* の分布は主に水温によって規制されているといえる.

N. pachyderma の鉛直分布

N. pachyderma の鉛直方向の分布について, プランクトンネットと同時に採られた表層水濾過採取 (pump sampling) の結果から興味深いことが観察された (Kuroyanagi and Kawahata, 2004). まず, プランクトンネットの結果から, ほとんどすべての *N. pachyderma* (約 20 m 以深) 個体 (観察された 99.6 % 以上) が, 密度躍層よりも深層で産出することが確認された (図 3). さらに, 同じ航海でプランクトンネットと平行して採られた連続表層水濾過採取 (サンプリング水深は密度躍層以浅, 水深約 5 m) では, *N. pachyderma* は採取されなかった (Kuroyanagi and Kawahata, 2004). つまり今回の研究海域では, *N. pachyderma* は密度躍層よりも深層で生息していたと考えられる. このような *N. pachyderma* と密度躍層との関係は, 直接的ではないが他の研究からもうかがえる. Ortiz *et al.* (1996) は北東太平洋において *N. pachyderma* は最も浅い密度躍層よりも下部のみで見られることを報告している. また, 北大西洋とインド洋の堆積物の結果からは, *N. pachyderma* が密度躍層の発達に伴う成層化構造と関連した産出を示すことが報告されている (Hilbrecht, 1997). Simstich *et al.* (2003) は, 北東部北大西洋のノルウェー沖で *N. pachyderma* の酸素同位体比の値は密度躍層の近く, またはその下部の水塊を反映していることを明らかにした. 以上より, 密度躍層の位置は, *N. pachyderma* の鉛直分布を規制する重要な因子であるといえる.

N. pachyderma と *N. incompta* の異なる鉛直分布

右巻きの *N. pachyderma* を *N. incompta* と同定している研究例は幾つかあるが (例えば, Cifelli, 1973, 1982; Olssen,

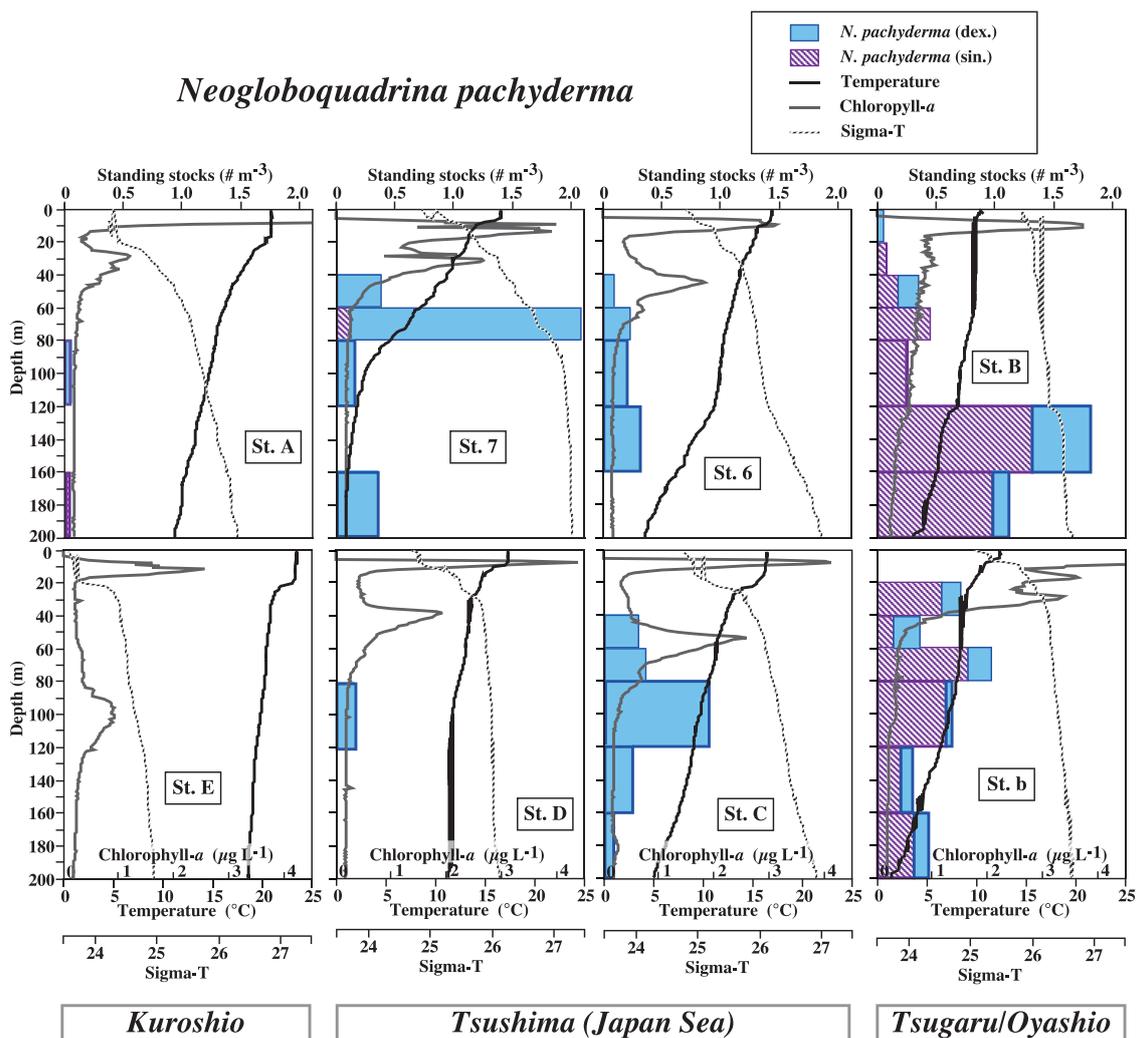


図3. 各プランクトンネット地点の水深0～200mにおける *Neogloboquadrina pachyderma* の右巻き・左巻きの個体群密度と各環境因子 (ポテンシャル水温, クロロフィル a 濃度, 密度). 太線はポテンシャル水温, 薄線はクロロフィル a 濃度, 破線は密度を示す.

Fig. 3. Standing stocks of total living right- and left-coiling *Neogloboquadrina pachyderma* with hydrographic conditions (potential temperatures, chlorophyll-a concentrations, and sigma-T) at each tow station. Solid lines indicate potential temperatures, gray lines indicate chlorophyll-a concentrations, and dashed lines represent sigma-T.

1976; Hilbrecht, 1997), 本研究で *N. incompta* は右巻きの *N. pachyderma* とは異なる地理分布を示した. 本論文での, *N. incompta* と *N. pachyderma* の同定は Kuroyanagi and Kawahata (2004) に準じた. *N. pachyderma* が主に密度躍層よりも深層に生息するのにに対し (図3), *N. incompta* は密度躍層より浅い水深でも卓越して生息する (図4). 東部北大西洋でも, *N. incompta* が 100 m 以浅の比較的小い水深に適応していることが報告されている (Schiebel *et al.*, 2001). さらに本研究では *N. incompta* は *N. pachyderma* よりも比較的温暖な水塊 (<約 20 °C) を好み, 9 ~ 15 °C で卓越する, という生息水温の違いも観察された. またこの種はクロロフィル a 濃度とよい相関を示したが (correlation coefficients $r = 0.69$), *N. pachyderma* ではクロロフィル a 濃度との相関はみられなかった ($r = -0.08$).

以上のことから, *N. pachyderma* の分布は主に海水温に

規制されるが, 鉛直分布については密度躍層との関係が強く, 密度躍層 (20 ~ 40 m 水深) 以深で主に生息していることが明らかになった (図3). また *N. pachyderma* と類似した形態を持つ *N. incompta* は, 右巻きの *N. pachyderma* よりも比較的高水温でより表層に生息し, クロロフィル a 濃度の高い水域でより高い存在量を示した (図4).

空間分布を基にした化石記録への応用

過去 27,000 年の有孔虫変化と下北沖の水塊の変遷

コア分析期間 (約 27 ~ 1.5 cal. kyr BP) を通じての *N. pachyderma* 全体に対する右巻きの比, また *Globigerinoides ruber*, *N. incompta* と *N. pachyderma* の Mass accumulation rate (MAR) の変化は図5に示したとおりである. 今回の試料では, 表層が溶解の影響を強く受けていたため,

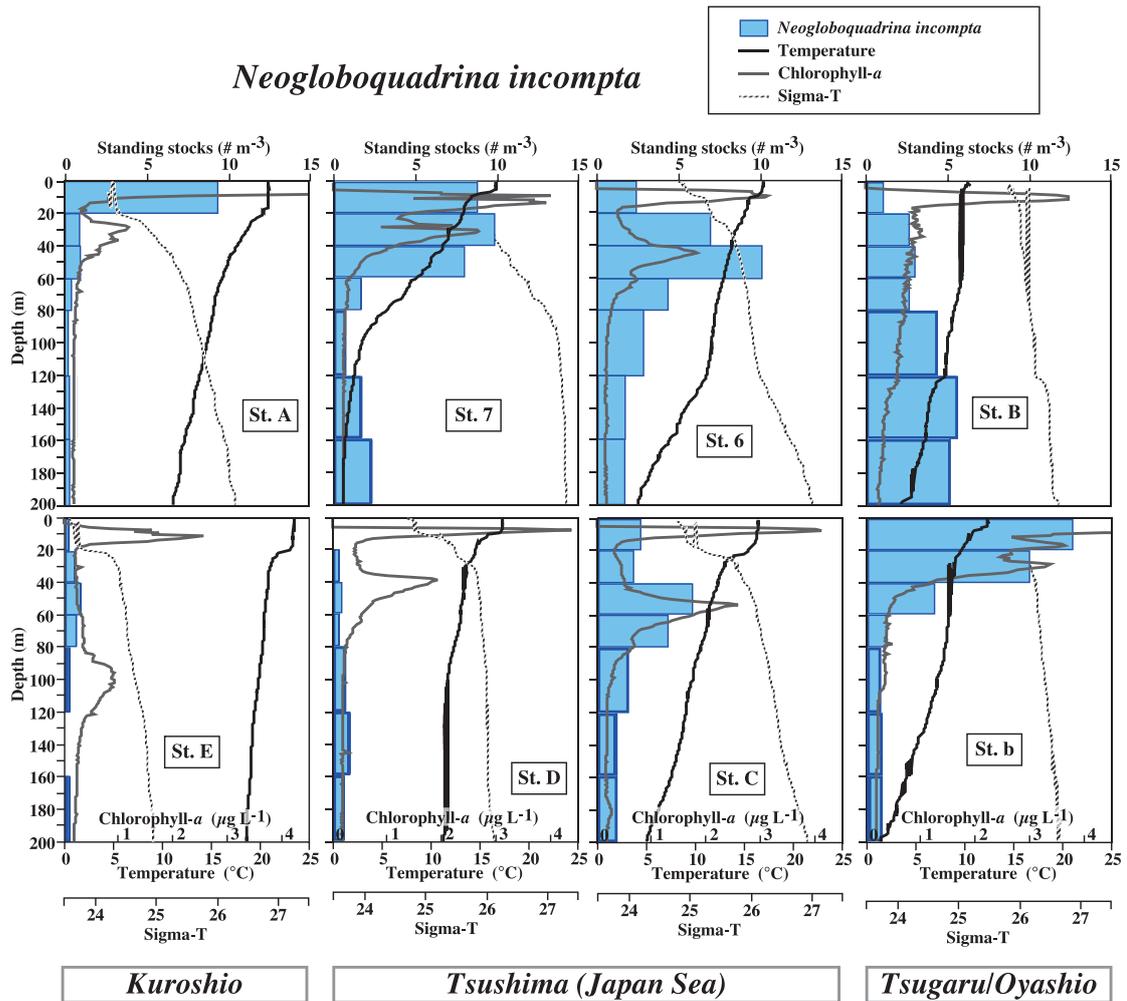


図4. 各プランクトンネット地点の水深0～200mにおける *Neogloboquadrina incompta* の個体群密度と各環境因子 (図3に準じる).
 Fig. 4. Standing stocks of total living *Neogloboquadrina incompta* with hydrographic conditions (same as Fig. 2).

約 3 cal. kyr BP 以浅のサンプルの MAR は議論しない。プランクトンネットの結果では、日本周辺海域では *N. incompta* が対馬海流域に多産し、表層でも生息していたのに対して、*N. pachyderma* は亜表層 (subsurface) (密度躍層以深) にのみ生息した。また *N. pachyderma* の左巻き個体は親潮域で主に産出し、右巻き個体は対馬海流域で卓越して存在した。

これらの結果を基にコアでの環境変遷を推測すると、この海域では、26.9～14 cal. kyr BP の期間は *N. pachyderma* の左巻きが卓越し、また表層に生息する対馬海流の種がほとんど見られないことから、表層でも亜表層でも親潮が卓越していたといえる (図5)。しかし、約 14～11.2 cal. kyr BP の期間になると、*N. pachyderma* の右巻きの比率がわずかに増加するので、亜表層 (密度躍層以深) の水温がやや上昇したといえるが、その一方、対馬海流表層に卓越する *N. incompta* 種が産出しないことから、この水温上昇は対馬海流の流入に起因するものではなく、LGM の終了に続く親潮全体の水温上昇と考えられる。

その後、10.6 cal. kyr BP 付近で表層環境が急激に変

化し、*N. incompta* と温暖種の *G. ruber* が増加するが、*N. pachyderma* には大きな変化が見られない。よって、この時期には日本海からの表層水が下北沖の表層に流入し始め津軽暖流の影響が強まったが、亜表層では依然親潮が優勢な状況であったと推測される。この状況は 5.9 cal. kyr BP 付近まで継続したが、約 9.1 cal. kyr BP になると、*G. ruber* が産出する一方で *N. incompta* が減少することから、表層水の成層化がさらに強まったと推測される。この群集変化は、クロロフィル a 濃度と相関する *N. incompta* が成層化により減少し、共生藻を持つ *G. ruber* はそれほど影響されなかった事を反映していると思われる。これと同様の群集構成の変化は温暖期 (約 10 cal. kyr BP) の日本西南沿岸でも観察されている (尾田・嶽本, 1992)。

表層は津軽海流、亜表層は親潮の影響下にそれぞれあり成層化していた水柱構造も、約 6 cal. kyr BP で終了し、これまであまり変化のなかった亜表層の環境も大きく変わり、*N. pachyderma* の右巻きの個体の割合が急激に増加した。これは、津軽暖流の太平洋への流入増加につれて、津軽暖流が表層に続き亜表層でも優勢となり、ほぼ現在と

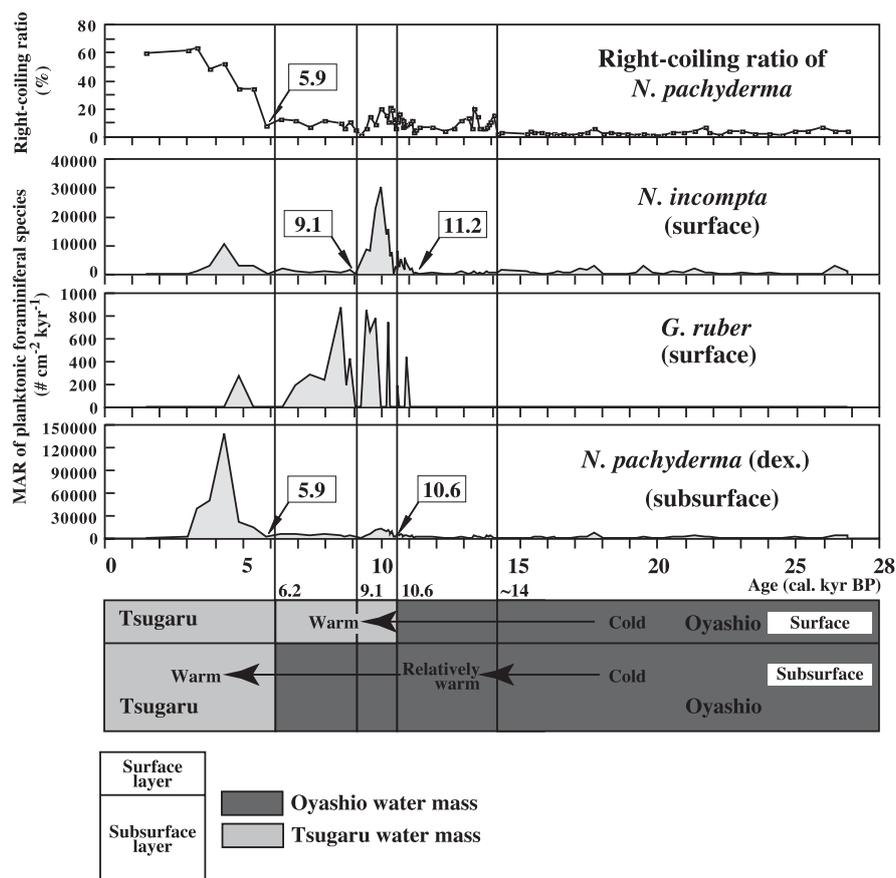


図 5. *Neogloboquadrina pachyderma* の右巻きの比率と *Neogloboquadrina incompta*, *Globigerinoides ruber*, *N. pachyderma* 右巻きの MAR の時間変化. また図中の枠内の数字は年代値を示す. 図の下部のボックスはこれらから推測される表層, 亜表層の水塊の時間変化を示している.

Fig. 5. Time-series changes in right-coiling ratio of *Neogloboquadrina pachyderma* and MAR of *Neogloboquadrina incompta*, *Globigerinoides ruber*, and *N. pachyderma* (dex.). Boiled figures in the box show ages. Boxes show the water column structure and oceanographic situation at this core site.

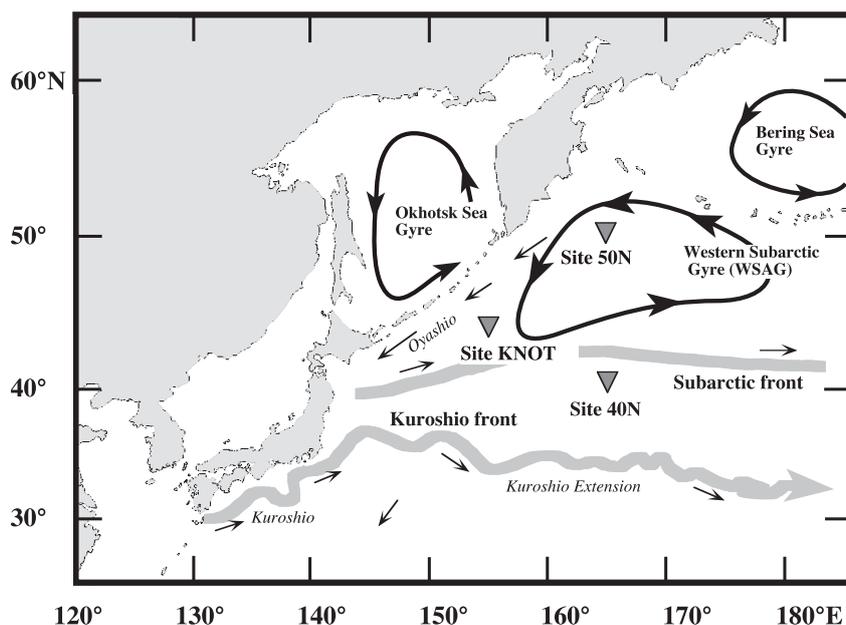


図 6. セジメントトラップの設置地点とその付近の一般的な海流. 図中の三角印が本研究で用いたトラップ繫留地点.
Fig. 6. Location map of the mooring sites in the northwestern North Pacific. The triangles indicate study sites.

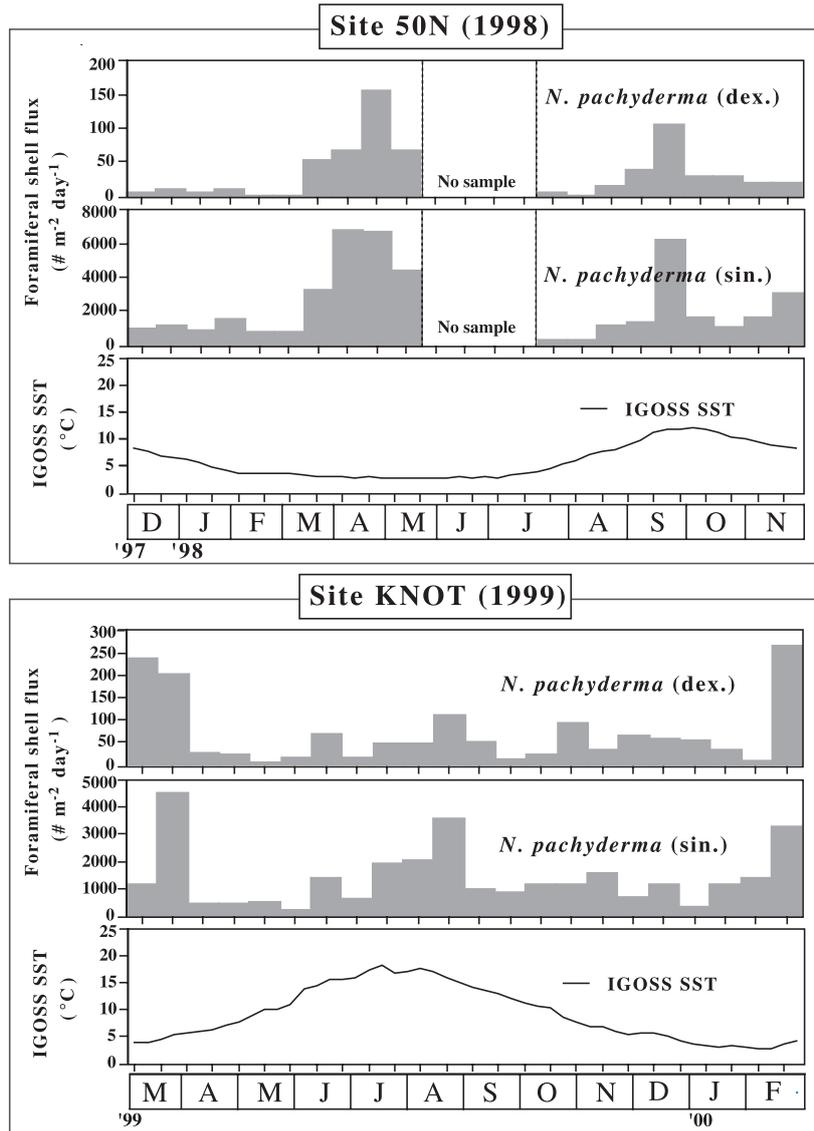


図7. サイト50NとKNOTにおける *Neogloboquadrina pachyderma* の右巻き (dex.)・左巻き (sin.) フラックスの季節変動とその当時の表層水温 (IGOSS). 50Nは1998年, KNOTは1999年の結果.

Fig. 7. Seasonal variation of foraminiferal flux and IGOSS sea surface temperatures (SST) at sites 50N and KNOT. IGOSS SST represents SST over the sampling periods.

同じような海洋状況になったことを示唆している。

以上の結果に基づくと、下北沖では、LGM以降、多少の水温上昇はあるものの、10.6 cal. kyr BPまでは親潮が卓越する海洋環境にあったが、その後表層は日本海から流出してきた暖かい表層水（対馬／津軽暖流）の影響下に入る一方、亜表層（密度躍層以深）は依然親潮の影響下にあり、成層化が強まった。しかし、約6 cal. kyr BPを過ぎると亜表層も徐々に温暖化し、津軽暖流が表層・亜表層ともに卓越した。この結果は、これまでの他の海域の研究結果ともほぼ整合的であり（例えば、Thompson and Shackleton, 1980; 大場ほか, 1995; Ishiwatari *et al.*, 1999; Takei *et al.*, 2002）、有孔虫の空間分布から詳細な水塊の変化をトレースできることが検証できた。

有孔虫の空間分布を規制する因子は、種や個別の生態

により異なる（例えば、Hemleben *et al.*, 1989; Ortiz *et al.*, 1995; Kuroyanagi and Kawahata, 2004）。そのため、今回は亜寒帯・寒帯種である *N. pachyderma* に着目したが、今後、温暖種などにさらに別の種に適用範囲を広げることができれば、より詳細な古環境復元に役立つ可能性がある。

Neogloboquadrina pachyderma の季節変動とその巻き方向に影響を与える要因

トラップ地点により異なる *N. pachyderma* の挙動

ここまでは、日本周辺海域の *N. pachyderma* の空間分布とそれを基にした化石記録への応用について述べてきた。*N. pachyderma* の分布については、一般に表層水温が約7.2～8℃を超えると、群集内で卓越する（50%を超

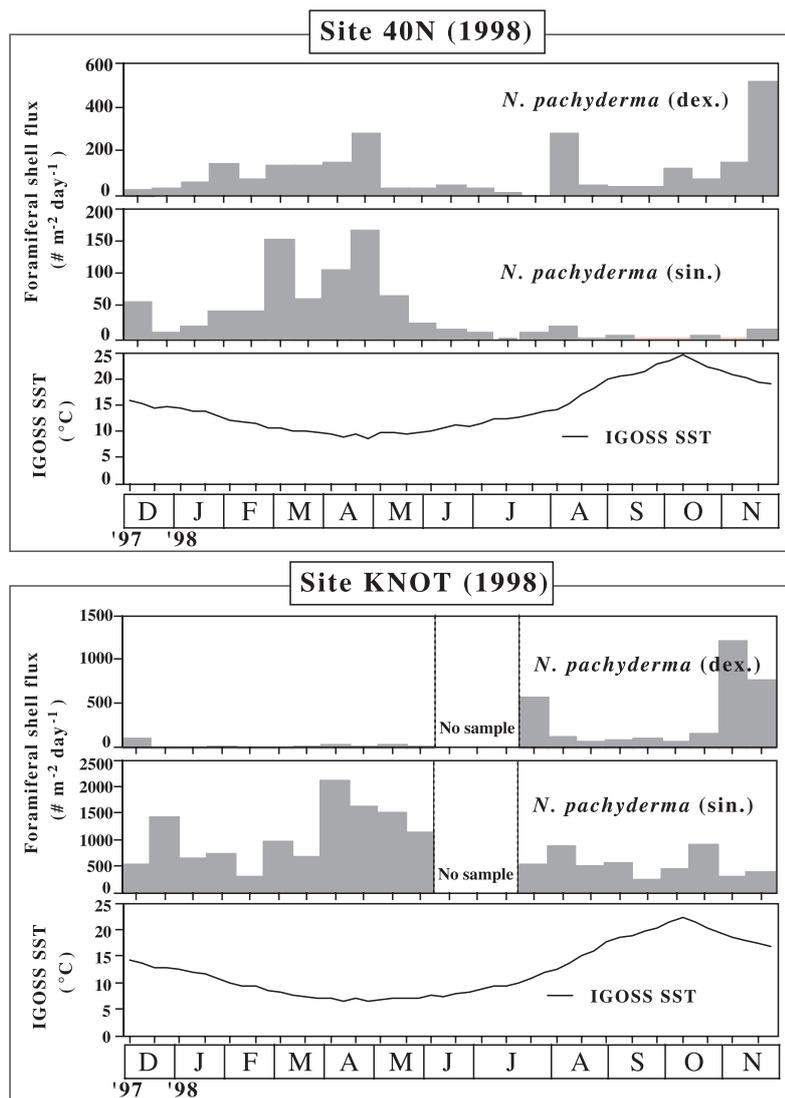


図 8. サイト 40N と KNOT における *Neogloboquadrina pachyderma* の右巻き (dex.)・左巻き (sin.) フラックスの季節変動とその当時の表層水温 (IGOSS). 40N, KNOT 地点ともに 1998 年の結果.

Fig. 8. Seasonal variation of foraminiferal flux and IGOSS sea surface temperatures (SST) at sites 40N and KNOT. IGOSS SST represents SST over the sampling periods.

える) 巻き方向も左から右へと替わると考えられている (例えば, Bé, 1960; Bé and Hamlin, 1967; Reynolds and Thunell, 1986). しかし, Kuroyanagi *et al.* (2002) のセジメントトラップの結果 (例えば, 50N 地点; 図 6) では表層水温が 8°C 以上の時期でも左巻き個体が優勢のままであった. これは今回の *N. pachyderma* の空間分布の結果より明らかとなったように, 表層水温と生息水深の水温が一致しなかったと解釈することもできる.

しかし今回の複数年のトラップ結果から, 左巻きと右巻き群集の季節変動のパターンが類似する場合と, 異なる場合の 2 つのケースがあることが観察された. 図 7 と 8 は, 各トラップ地点での *N. pachyderma* の各々の巻き方向のフラックスの季節変化を示してある. 表層水温は IGOSS の

データセットを用い, 有孔虫の沈降速度とトラップの深度を考慮して, 一ヶ月ずらしてある. これを見るとフラックスの絶対量は異なるものの, トラップ地点・サンプリング年により, 右巻きと左巻きが類似した季節変動プロファイルを示すものがある (1998 年の 50N 地点, 1999 年の KNOT 地点, 図 7) 一方で, 異なる季節変化を示す結果も見られた (1998 年の 40N 地点, 1998 年の KNOT 地点, 図 8). この違いは, いったい何を反映しているのだろうか.

N. pachyderma の遺伝子型

Darling *et al.*, (2000) は, *N. pachyderma* の分子系統解析を行い, 右巻き, 左巻きの個体間で異なる遺伝子型が

表 2. 各サイトの 1998 ~ 2000 年における, *Neoglobobadrina pachyderma* の殻流量, 相対頻度, 全体に対する右巻き比率と総有孔虫流量, その当時の表層水温 (SST). 相関係数は右巻きと左巻きの季節変動を基に算出された.

Table 2. Shell fluxes, relative abundance, and right-coiling ratio of *Neoglobobadrina pachyderma*, total foraminiferal fluxes, and sea surface temperature (SST) at each site in 1998-2000. Correlation coefficients between both coiling are calculated on the basis of their seasonal fluxes.

Site	Period (Year)	<i>N. pachyderma</i> (dex.)		<i>N. pachyderma</i> (sin.)		Right-coiling ratio of <i>N. pachyderma</i> (%)	Total planktonic foraminifera (shells m ² day ⁻¹)	Sea surface temperature (IGOSS) (°C)			Correlation coefficients of right and left coiling fluxes
		Shell fluxes (shells m ² day ⁻¹)	(Relative abundance)	Shell fluxes (shells m ² day ⁻¹)	(Relative abundance)			Average	Max.	Min.	
50N	1998	37	(1%)	2401	(46%)	1.5	5209	5.9	12.1	2.6	0.90
	1999	35	(1%)	1413	(34%)	2.4	4190	5.2	10.9	1.8	0.81
	1999-2000	23	(1%)	1688	(42%)	1.3	4049	5.2	10.9	1.6	0.90
KNOT	1998	186	(5%)	809	(23%)	18.7	3523	12.3	22.6	6.4	-0.23
	1999	68	(1%)	1434	(32%)	4.5	4509	8.8	18.2	2.5	0.66
	1999-2000	83	(2%)	2382	(38%)	3.4	6217	9.1	18.2	2.5	0.68
40N	1998	107	(7%)	35	(2%)	75.3	1454	14.5	24.7	8.5	0.24
	1999-2000	186	(20%)	9	(1%)	95.3	950	15.1	23.3	9.0	0.15

存在する事が明らかにした。その後, Bauch *et al.* (2003) は *N. pachyderma* の遺伝子型をさらに詳細に区分している。その結果によると, 北大西洋では 70 °N 以北の極域においても, *N. pachyderma* 群集中に右巻き個体が少数だが (5% 以下) 存在し, その右巻き個体の遺伝子型は左巻き個体と同じ [Type I (sin.)] を示す。一方, 70 °N 以南では, 徐々に右巻き個体の割合も増え, それとともに右巻き個体の遺伝子型も上記の [Type I (sin.)] とは異なる [Type I (dex.)] が出現し, 64 °N 以南では, [Type I (dex.)] の遺伝子型のみとなる。堆積物中の同位体比記録からのクロスチェックした結果を考慮すると, 左巻き個体と同じ遺伝子型を持つ右巻き個体が卓越する境界条件は *N. pachyderma* 群集中の右巻き比率が 5% 以下であると見積もられている (Bauch *et al.*, 2003)。

N. pachyderma の遺伝子型のことをふまえた上で, 先ほどのトラップの結果を考察してみる。トラップ地点ごとに, *N. pachyderma* 群集中の右巻き個体比率の年平均を算出した結果が表 2 に示してある。前述のトラップで右巻き個体と左巻き個体がそれぞれ類似した季節変動パターンを示した地点・期間 (図 7) の右巻き比率をみると, どれも 5% 以下の値を示しているが, 一方, 類似しなかった期間 (図 8) では, 右巻き比率は一概に 5% よりも高かった (表 2)。このことから, 北太平洋のトラップ試料でみられたこの現象は, 北大西洋で明らかになった *N. pachyderma* の遺伝子型の違いを反映しているのではないかと推測される。*N. pachyderma* についてはないが, 浮遊性有孔虫の遺伝子型の違いが, 異なる生態や環境適応による地理的分布の差に反映される事は既に報告されている (例えば, de Vargas *et al.*, 2002)。つまり, 右巻き 5% 以下の海域に生息する左巻きと, 同じ遺伝子型を持つ右巻き個体が海洋環境に対し左巻きに準じる反応をするため, この海域では右巻きと左巻きの季節変動パターンはよく対応している。

一方, 右巻き比率が 5% 以上の海域では, 左巻き個体とは異なる遺伝子型を持つ右巻き個体が卓越するため, 季節変動パターンが一致しないのかもしれない。同じ KNOT でもサンプリング年により異なる傾向が見られる (図 7, 8) ことは, 97 年末から 98 年前半の顕著なエル・ニーニョの影響で表層水温が高くなり, 異なる遺伝子系を持つ *N. pachyderma* が混在するためにその分布パターンが一致しなくなったためと考えられる。

これまでの研究で北大西洋の極域での *N. pachyderma* の遺伝子型と空間分布の違いについては明らかになっていたが, 今回のトラップの結果より, 形態は右巻き個体でも, 遺伝子型が左巻き個体であれば左巻き個体と類似した季節変動パターンを示す可能性が示唆された。季節変動が似ているということは, 環境に対する反応, 生態も類似している可能性がある。本研究より, 大西洋のみならず北太平洋においても, 右巻き個体でありながら, 左巻きの遺伝子型を持つ個体が生息し, その境界条件は右巻き比率の 5% 付近にあると推測される。さらに, 遺伝子型が同じである *N. pachyderma* の右巻き・左巻き個体は, 類似した時間分布・生態を示す可能性が初めて示唆された。

まとめ

N. pachyderma は日本周辺海域での過去の水塊の動きを追う際には非常に有効で有能なトレーサーだが, 巻き方向を水温の相対指標として用いる際, 特に外洋の北西部北太平洋では, 右巻き比率を考慮してその有効性に注意する必要があることがわかった。

本研究ではプランクトンネット観測を用いて, 日本周辺海域における *N. pachyderma* の空間分布を明らかにした。*N. pachyderma* は密度躍層 (20 ~ 40 m 水深) 以深で水温が 12 °C 以下の環境で主に生息している。*N. pachyderma* と

類似した形態を持つ *N. incompta* は *N. pachyderma* よりもより表層で温暖な水塊に生息し, またクロロフィル a 濃度とよい相関を示す。これら 2 種の鉛直分布の違いを基に, 下北沖の過去約 27,000 年間の古環境を推定し, 水塊変遷を表層, 亜表層ごとに復元することができた。また, セジメントトラップ試料を用いて, 北西部北太平洋の外洋における, *N. pachyderma* の巻き方向ごとの時間分布, 季節変動を調べ, *N. pachyderma* 群集中の右巻き比率が 5% 以下の海域では, 形態は右巻き個体でも遺伝子型が左巻き個体で, 左巻き個体と類似した季節変動パターンを示す個体が存在する可能性を示唆した。

謝辞

本論文をまとめるにあたり北海道大学の西 弘嗣博士および東京大学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。2 名の匿名の査読者の方からは有益なご教示をいただいた。産業技術総合研究所の外西奈津美氏からは貴重なご意見をいただいた。ここに感謝いたします。

文献

- Arikawa, R., 1983. Distribution and Tazonomy of *Globigerina pachyderma* (Ehrenberg) off the Sanriku Coast, Northeast Honshu, Japan. *Science Reports of Tohoku University, 2nd Sreies (Geology)*, **53**, 103-157.
- Bauch, D., Darling, K., Simstich, J., Bauch, H. A., Erlenkeuser, H. and Kroon, D., 2003. Palaeoceanographic implications of genetic variation in living North Atlantic *Neogloboquadrina pachyderma*. *Nature*, **424**, 299-302.
- Bé, A. W. H., 1960. Ecology of Recent planktonic foraminifera: Part 2. Bathymetric and seasonal distributions in the Sargasso Sea off Bermuda. *Micropaleontology*, **6**, 373-392.
- Bé, A. W. H. and Hamlin, W. H., 1967. Ecology of Recent planktonic foraminifera, Part 3: distribution in the North Atlantic during the summer of 1962. *Micropaleontology*, **13**, 87-106.
- Bé, A. W. H. and Hutson, H. H., 1977. Ecology of planktonic foraminifera and biogeographic patterns of life and fossil assemblages in the Indian Ocean. *Micropaleontology*, **23**, 369-414.
- Bé, A. W. H. and Tolderlund, D. S., 1971. Distribution and ecology of living planktonic foraminifera in surface waters of the Atlantic and Indian oceans. In Funnell, B. M. and Riedel, W. R., eds., *Micropaleontology of the Oceans*, 105-149. Cambridge Univ. Press, London.
- Bé, A. W. H., Bishop, J. K. B., Sverdløve, M. S. and Gardner, W. D., 1985. Standing stock, vertical distribution and flux of planktonic foraminifera in the Panama Basin. *Marine Micropaleontology*, **9**, 307-333.
- Cifelli, R., 1973. Observation on *Globigerina pachyderma* (Ehrenberg) and *Globigerina incompta* Cifelli from the North Atlantic. *Journal of Foraminiferal Research*, **3**, 157-166.
- Cifelli, R., 1982. Texture observations on some living species of planktonic foraminifera. *Smithsonian Contributions to Paleobiology*, **45**, 1-43.
- 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.
- de Vargas, C., Bonzon, M., Rees, N. W., Pawlowski, J. and Zaninetti, L., 2002. A molecular approach to biodiversity and biogeography in the planktonic foraminifer *Globigerinella siphonifera* (d'Orbigny). *Marine Micropaleontology*, **45**, 101-116.
- Fairbanks, R. G., Sverdløve, M. S., Free, R., Wiebe, P. H. and Bé, A. W. H., 1982. Vertical distribution and isotopic fractionation of living planktonic foraminifera from the Panama Basin. *Nature*, **298**, 841-844.
- Hemleben, Ch., Spindler, M. and Anderson, O. R., 1989. *Modern Planktonic Foraminifera*. 363p., Springer-Verlag, New York.
- Hilbrecht, H., 1997. Morphologic gradation and ecology in *Neogloboquadrina pachyderma* and *N. dutertrei* (planktic foraminifera) from core top sediments. *Marine Micropaleontology*, **31**, 31-43.
- Ishiwatari, R., Yamada, K., Matsumoto, K., Houtatsu, M. and Naraoka, H., 1999. Organic molecular and carbon isotopic records of the Japan Sea over the past 30 kyr. *Paleoceanography*, **14**, 260-270.
- Japan Hydrographic and Oceanographic Department (JHOD), 2002. Quick Bulletin of Ocean Conditions of Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard (JHOD), 2002.
- Keigwin, L. D. and Gorbarenko, S. A., 1992. Sea level, surface salinity of the Japan Sea, and the Younger Dryas event in the northwestern Pacific Ocean. *Quaternary Research*, **37**, 346-360.
- Kim, J.-M., Kennett, J. P., Park, B.-K., Kim, D. C., Kim, G. Y. and Roark, E. B., 2000. Paleocceanographic change during the last deglaciation, East Sea of Korea. *Paleoceanography*, **15**, 254-266.
- 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, (575), 5-11.
- Kuroyanagi, A. and Kawahata, H., 2004. Vertical distribution of living planktonic foraminifera in the seas around Japan. *Marine Micropaleontology*, **53**, 173-196.
- Kuroyanagi, A., Kawahata, H., Nishi, H. and Honda, M. C., 2002. Seasonal changes in planktonic foraminifera in the northwestern North Pacific Ocean: sediment trap experiments from subarctic and subtropical gyres. *Deep-Sea Research II*, **49**, 5627-5645.
- Kuroyanagi, A., Kawahata, H., Narita, H., Ohkushi, K. and Aramaki, T., 2006. Reconstruction of paleoenvironmental changes based on the planktonic foraminiferal assemblages off Shimokita in the northwestern North Pacific. *Global Planetary Change*, **53**, 92-102.
- 大場忠道, 村山雅史, 松本英二, 中村俊夫, 1995. 日本海隠岐堆コアの加速器質量分析 (AMS) 法による ¹⁴C 年代. 第四紀研究, **34**, 289-296.
- 尾田太良, 嶽本あゆみ, 1992. 浮遊性有孔虫からみた黒潮流域における過去 2 万年間の海洋変動. 第四紀研究, **31**, 341-357.
- Olssen, R. K., 1976. Wall structure, topography and crust of *Globigerina pachyderma*. In Takayanagi, Y. and Saito, T., eds., 244-257. *Progress in Micropaleontology*, American Museum Natural History, Micropaleontology Press, New York.
- Ortiz, J. D., Mix, A. C. and Collier, R. W., 1995. Environmental control of living symbiotic and asymbiotic foraminifera of the California Current. *Paleoceanography*, **10**, 987-1009.
- Ortiz, J. D., Mix, A. C., Rugh, W., Watkins, J. M. and Collier, R. W., 1996. Deep-dwelling planktonic foraminifera of the northeastern Pacific Ocean reveal environmental control of oxygen and carbon isotopic disequilibria. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **60**, 4509-4523.
- Reynolds, L. A. and Thunell, R. C., 1986. Seasonal production and morphologic variation of *Neogloboquadrina pachyderma* (Ehrenberg) in the northeast Pacific. *Micropaleontology*, **32**, 1-18.
- Schiebel, R., Waniek, J., Bork, M. and Hemleben, Ch., 2001. Planktic foraminiferal production stimulated by chlorophyll redistribution and entrainment of nutrients. *Deep-Sea Research I*, **48**, 721-740.
- Simstich, J., Sarnthein, M. and Erlenkeuser, H., 2003. Paired $\delta^{18}\text{O}$

- signals of *Neogloboquadrina pachyderma* (s) and *Turborotalita quinqueloba* show thermal stratification structure in Nordic Seas. *Marine Micropaleontology*, **48**, 107-125.
- Tada, R., 1994. Paleooceanographic evolution of the Japan Sea. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, **108**, 487-508.
- Takei, T., Minoura, K., Tsukawaki, S. and Nakamura, T., 2002. Intrusion of a branch of the Oyashio Current into the Japan Sea during the Holocene. *Paleoceanography*, **17**, 11-1-10.
- Thompson, P. R. and Shackleton, N. J., 1980. North Pacific palaeoceanography: late Quaternary coiling variations of planktonic foraminifera *Neogloboquadrina pachyderma*. *Nature*, **287**, 829-834.

