# 後期鮮新世から前期更新世の間氷期における対馬海流の動態とその要因一特 に下部更新統における浮遊性有孔虫 Globoconella inflata の産出の古環境学的 意義の再検討

北村晃寿

静岡大学理学部生物地球環境科学科

# The cause of the temporal changes in the Tsushima Current during interglacial periods in the late Pliocene-early Pleistocene Japan Sea. -reexamination of the early Pleistocene occurrences of the planktonic foraminifer *Globoconella inflata*

# Akihisa Kitamura

Institute of Geosciences, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529 (seakita@ipc.shizuoka.ac.jp)

Abstract. The stratigraphic distribution of warm-water molluscs and planktonic foraminifers in Plio-Pleistocene strata of the Sea of Japan coast of Japan is the basis for reconstructing the history of the Tsushima Current. These fossil records show that the current flowed at 3.5, 3.2, 2.9, 2.4 and 1.9 Ma, in the interval from 3.5 to 1.7 Ma, whereas the current flowed at every interglacial highstand, except for MIS 25, 23 and 21.3, at 1.71 to 0.8 Ma (MIS 59 to 20). The stratigraphic distribution of the warmwater planktonic foraminifer Globigerinoides ruber shows that its relative abundance in marine isotope stages 47, 43 and 31 was significantly higher than in the other interglacial stages. These three stages correspond to periods when eccentricity-modulated precession extremes were aligned with obliquity maxima. Therefore, it seems evident that the early Pleistocene marine climate in the Japan Sea was influenced by eccentricity cycles as well as obliquity cycles. I previously thought that the planktonic for aminifer Globoconella inflata could be used as an indicator of the existence of a southern strait with a water depth greater than that at present (ca. 130m) (Kitamura, et al., 2001). However, this species was recently found in surface sediment of the southwest Sea of Japan. In the present study, I reexamined the early Pleistocene occurrences of this species, by comparing the recent distribution of planktonic for aminifers between the northern East China Sea and the southwest Sea of Japan. I conclude that the population of G. inflata was extirpated by exceptional low temperature caused by the cool-water mass of Japan Sea Proper Water (JSPW). If this interpretation is correct, the occurrences of the species imply that the productivity of the JSPW declined in marine isotope stages 57, 47, 45, 43, 41 and 29. I believe that this was caused by reduced salinity of the Tsushima Current, due to a relative high input of fresh water, since the inflow of marine water was strongly restricted by the narrow and shallow southern strait.

Key words: *Globoconella inflata*, Japan Sea, Japan Sea Proper Water, planktonic foraminifers, Plio-Pleistocene, Tsushima Current

# はじめに

北村 (2004) は, 第四紀の日本海の環境変動に関して, 化石 75 号に紹介した.本稿では,その後公表された後期 鮮新世一前期更新世の対馬海流の動態に関する知見を紹 介し,次に下部更新統における浮遊性有孔虫 Globorotalia (Globoconella) inflata の産出の古環境学的意義を論ずる.

# 後期鮮新世-前期更新世の対馬海流の動態 に関する知見

## 3.5~1.7 Ma の対馬海流の動態

日本海に対馬海流が間氷期ごとに流入するようになっ たのは海洋酸素同位体ステージ (MIS)59 (1.7 Ma) からで, この時を境に日本海の環境セッティングは大きく変わっ た (Kitamura *et al.*, 2001). ここでは 3.5~1.7 Ma の対馬海 流の動態を記す. 3.5 Ma は珪藻 *Neodenticula koizumii* の出



図1.本論で用いた資料.a.日本海側に分布する上部鮮新-下部更新統の化石記録の地点(天野・菅野,1991; 天野ほか,1997,1988,2000a,b; Arai et al., 1991, 1997; 荒井ほか,1998; Cronin et al., 1994; Kitamura and Kimoto, 2006a; 三輪ほか,2004a,b; 大久保ほか,2000; 柳沢・天野, 2003) 及び東シナ海北部と日本海における現世の浮遊性有孔虫群集の調査地点(Domitsu and Oda, 2005; Ujiié and Ujiié, 2000; Xu and Oda, 1999). b.日本海表層堆積物中の暖水系浮遊性有孔虫*Globigerinoides ruber*の産出頻度と年間の平均水温の関係(Kitamura and Kimoto, 2006b).及び東シナ海北部と日本海における現世の浮遊性有孔虫群集の調査地点.c.図4に示した水温-水深のプロファイルの切断線.



図 2. 3.5~0.8 Maの暖水系浮遊性有孔虫 *Globigerinoides ruber*の産出頻度(Kitamura and Kimoto, 2006a, b)及び海洋酸素同位体ステージ 50~27 の期間の北緯 65 度 7 月の夏季日射量変動曲線と地軸傾斜角・離心率・気候歳差の変動曲線(Berger, 1992).



図 3. 現世の東シナ海北部から日本海南部に分布する浮遊性有孔虫の主要種の地理分布 (Domitsu and Oda, 2005; Ujiié and Ujiié, 2000; Xu and Oda, 1999).

現層準の年代値で(渡辺,2002), これが日本列島の日本 海沿いに分布する鮮新統において, 貝化石や浮遊性有孔虫 の層位分布に関する研究事例のある地層で, 層位が認定さ れている最古の基準面である.

Kitamura and Kimoto (2006a) は、上部鮮新統一下部更 新統の貝化石と浮遊性有孔虫の層位分布の研究を編纂し た(引用文献は Kitamura and Kimoto, 2006a を参照され たい)(図 1a, 2). そして暖水系貝化石と暖水系浮遊性有 孔虫 *Globigerinoides ruber* の層位から対馬海流の流入期を 検討し、以下のことを明らかにした.

(1)対馬海流が流入した期間は3.2, 2.9, 2.4, 1.9 Maである(図2). これら4層準のG. ruberの占有率は0.3~0.6%である(図2). 対馬海流の流入期は間氷期の高海水準期にあたる.酸素同位体比変動曲線(Shackleton et al., 1995)に基づくと,4回の対馬海流の流入期は、古いほうからKM5または3、G17または15、MIS95または93、MIS69に対比されると推定される(図2).

(2) 3.2 Ma と 2.9 Ma における G. ruber の占有率は 0.6% 以下である. 一方,後述するように, 1.7~0.8 Ma の各間 氷期における同種の占有率の最大値は 1.4%(MIS29) から

21.8%(MIS47)の範囲をとる(図2). この占有率の差を, Kitamura and Kimoto (2006a) は対馬海流の低塩分化に帰 した.

#### 1.7~0.8 Ma の対馬海流の動態

この期間には、MIS 25, 23, 21.3 を除く全間氷期に対 馬海流が流入した(Kitamura and Kimoto, 2006a). つまり、 地軸の傾きの変動に対応した 4.1 万年周期の氷期一間氷期 サイクルに連動して、対馬海流が間氷期に流入したのであ る (Kitamura *et al.*, 1994).

ところで,大桑層における MIS 49 から 31 までの各間 氷期の G. ruber の占有率の最大値は二峰的分布を示し, MIS 47,43,31 の占有率は相対的に高く(12~22%),他 の間氷期のそれは相対的に低い(2~6%)(図2).これら3 つの間氷期は「歳差運動の最大期」(離心率が最大となっ た時期)と「地軸の傾きの最大期」が接近した間氷期で, 北緯 65°の夏期日射量は495 W/m<sup>2</sup>,493 W/m<sup>2</sup>,500 W/m<sup>2</sup> と前後の間氷期の値より高い(Berger,1992),最終氷期以 降の夏期日射量の最大値は1万年前の469 W/m<sup>2</sup>である.

過去40万年間の深海底の酸素同位体記録と氷床コア中

の温室効果ガス濃度の変化を比較し,Ruddiman (2003)は 歳差運動の最大期と地軸の傾きの最大期が接近した間氷期 にはより強い間氷期になり,それが10万年周期の気候変動 の正体であると説いた.この長周期の気候変動は0.9 Ma以 降に顕著になるが,1.5~1.0 Maにおいても上記の3つの 間氷期の深海底生有孔虫のδ<sup>18</sup>O値(北半球高緯度の氷床 量の指標)が他の間氷期よりも小さいことが各地から報告 されている (Ruddiman *et al.*, 1989; Shackleton *et al.*, 1990; Berger *et al.*, 1994; Venz and Hodell, 2002).これは同期間 にも,歳差運動の最大期と地軸の傾きの最大期が接近した 間氷期には,他の間氷期よりも北半球の氷床量が減少した こと,つまり10万年周期の気候変動が存在したことを意 味する.

対馬海流の源の一部である黒潮は亜熱帯北太平洋環流 の一部で、その強度は北米西岸沖の亜熱帯高気圧の強度 に支配される (Sawada and Handa, 1998). この高気圧の 強度はローレンタイド氷床の面積に強い影響を受けてお り,最終氷期以降のローレンタイド氷床の縮小で, 亜熱帯 高気圧の強度が増し、8~7ka(縄文時代の気候最良期に相 当)に亜熱帯北太平洋環流の強度は最大となったことが判 明している (Sawada and Handa, 1998). 日本海南部では, ほぼ同時期に G. ruber の 占有率 が 最大 と なった (高田 ほ か,2006).このことから日本海の間氷期の表層水温の変 化はローレンタイド氷床の消長に連動しているといえる. 前述したように, MIS 47, 43, 31 のローレンタイド氷床 のサイズは他の間氷期よりも減少しており, そのため亜熱 帯北太平洋環流の強度が増し、日本海を含む北西太平洋中 緯度が他の間氷期よりも温暖化したと推定される.要する に、1.5~1.0 Maの日本海の表層水温変化は、4.1 万年周期 の氷期一間氷期サイクルに同調しているが、さらに前述の 約10万年周期の変動が間氷期の水温に正の影響を与えて いると結論づけられる (Kitamura and Kimoto, 2006b).

## 議論

### 下部更新統における G. inflata の産出の学術的意義

これまで日本海の第四系において G. ruber と共産する Globorotalia (Globoconella) inflata は,深度 200 mを越す南 方海峡の存在の指標とされてきた (Kitamura et al., 2001). なぜならば,同種は現在の東シナ海では水深 200 mを越 える海域に生息するが (Xu and Oda, 1995, 1999),日本 海からの報告がなかったからである (例えば,Park and Shin, 1998).しかし,Domitsu and Oda (2005)が日本海 南部の表層堆積物から G. inflata の産出を報告した.また, Irizuki et al. (2007)は中部鮮新統鍬江層 (新潟県)におけ る貝形虫群集の解析から,同時代では現在よりも鉛直方向 の水温勾配が小さく,日本海固有水の発達しない期間に G. inflata が日本海に生息したと述べている.そこで,前 期更新世の同種の産出に関する古海洋学的意味を再考察 する.それに先立ち,現世の東シナ海北部から日本海南部 に分布する浮遊性有孔虫の主要種の地理分布を, Xu and Oda (1999), Ujiie and Ujiie (2000), Domitsu and Oda (2005) を用いて調べた. その結果, 次の3タイプ (1~3) があることが分かった.

タイプ1は、東シナ海北部に比べて日本海南部の 占有率が低い種で、G. inflata, Globigerinita glutinata, Globigerinoides sacculifer, Neogloboquadrina dutertrei, Pulleniatina obliquiloculata が含まれる(図3). タイプ2は Neogloboquadrina incomptaで、東シナ海北部に比べて日本海 南部での占有率が有意に高い(図3). タイプ3は両海域の 占有率に差が認められない種で、G. ruber、T. quinqueloba, G. bulloides が含まれる(図3). 各種の生態情報を以下に示す.

*Globoconella inflata*: 生殖サイクルに伴い,表層から水 深 200m 前後まで移動する (Hemleben *et al.*, 1989). Bé (1977) と山根・大場 (1999) に基づくと,北西太平洋に おける生息北限は三陸沖から十勝沖の間にある. Oda and Yamasaki (2005) によると, 房総沖では冬季に個体密度が 最大となる.

Globigerinita glutinata: Hemleben et al. (1989) では本種は 生殖サイクルに伴い表層から水深 400 m 前後まで移動す るとされている.北西太平洋では北緯 50° まで分布する (Kuroyanagi et al., 2002).沖縄トラフでは、黒潮の流軸 が中国大陸の陸棚に近づく 12~1 月と 6~7 月に個体群が 減少する (Yamasaki and Oda, 2003; Xu et al., 2005). 房総 沖では冬季 (水温 18  $\mathbb{C}$ )でフラックスが最大となる (Oda and Yamasaki, 2005).

Globigerinoides sacculifer: 室内実験によると生息 温度は14~32℃で,最適温度は26.5℃である(Bijma et al., 1990). Kuroyanagi and Kawahata (2004)によると 日本周辺域では12℃より水温が高い海域に生息してい る. Erez et al. (1991) や Kawahata et al. (2002)によると, 同種の生殖サイクルは約29日の周期を持ち,満月の頃に 水深200m以深で配偶子を放出するという.琉球列島周 辺海域では,夏・秋に相対産出頻度が高い(Yamasaki and Oda, 2003; Xu et al., 2005).

Neogloboquadrina dutertrei: 本種の生息可能温度に関する報告には、9~30°C(最適温度は16~24°C; Bé and Tolderlund, 1971)、17.2~27.0°C (Tolderlund and Bé, 1971)、15~32°C (Bijma et al., 1990)がある. Kuroyanagi and Kawahata (2004)は、日本周辺において同種は2つの個体群に分かれ、一方は表層水温21~23°Cの暖海域に、他方は表層水温17°Cの寒海域に生息することを明らかにした.沖縄トラフでは黒潮の流軸が中国大陸の陸棚に近づく12~1月と6~7月に個体群が減少する(Yamasaki and Oda, 2003; Xu et al., 2005). 台湾東岸沖での本種の相対頻度は200 m で最大となる(Shieh and Chen, 1990). これをもとに、Lin et al. (2006)は同種の分布中心は温度躍層の中一下部にあると解釈した.

*Pulleniatina obliquiloculata*: Takemoto and Oda (1997) に よる表層堆積物中の遺骸群集データから解釈すると、本



図 4. JODC Data On-line Service System (http://www.jodc.go.jp/service\_j.htm) に基づく日本本土沖の日本海と太平洋の最寒月(3月)と最 暖月(8月)の水温一深度の関係図. 横軸の位置は図1を参照.

州沖の太平洋では、主に北緯 37°以南に分布する.沖縄ト ラフでは黒潮の流軸が中国大陸の陸棚に近づく 12~1 月と 6~7 月に個体群が減少する (Yamasaki and Oda, 2003; Xu *et al.*, 2005).また、沖縄トラフでの分布中心は混合層底 部から温度躍層最上部 (約 150 m)にある (Jian *et al.*, 2000; Tian *et al.*, 2005).ちなみに JODC Data On-line Service System (http://www.jodc.go.jp/ service\_j.htm)に基づく と、沖縄トラフ北部 (北緯 31~32°、東経 129~130°)での 深度 150m の最暖月 (9月)の平均水温は 16.5 ℃で、最寒 月 (4月)は 15.3 ℃である.

Neogloboquadrina incompta: 対馬海流と日本海固有水の 混合域に分布中心を持つ (Domitsu and Oda, 2005). 太平 洋側では黒潮と親潮の混合域に卓越する (Takemoto and Oda, 1997; Oda and Yamasaki, 2005). Schiebel *et al.* (2001) によれば,本種は北大西洋東部で 100 m 以浅に適応して いるという.また,Kuroyanagi and Kawahata (2004) に よると,本種はクロロフィル a 濃度の高い海域を好み, 9~15  $^{\circ}$ Cの温度で多産する.日本海では北海道北部まで分 布する (Domitsu and Oda, 2005).

*Globigerinoides ruber*: 室内実験によると本種の生息温度は14~32℃,最適温度は26.5℃である(Bijma *et al.*, 1990).浮遊性有孔虫の中で最も浅い海域に生息し,生息深度は2~50mと見積もられている(Hemleben *et al.*, 1989; Lin *et al.*, 2004). 琉球列島周辺海域では春,夏,秋に相対産出頻度が高い(Yamasaki and Oda, 2003; Xu *et al.*, 2005).よって,日本海への流入時期は春から秋と推定さ

れる. なお,現在の日本海表層堆積物中の G. ruber の占有 率は,年間平均水温の高い南方海域で高く,水温の低い北 方海域で低くなる傾向にある (図 1b).

Turborotalita quinqueloba: 亜熱帯から極域まで分布 し (Bé, 1977), 低塩分で栄養塩の多い陸棚を好む (Wang et al., 1988; Takemoto and Oda, 1997). Bé and Hutson (1977) は最適温度を9.9±5.4℃とし, Sautter and Thunell (1991) は5~17 ℃としている。また, Kuroyanagi and Kawahata (2004) は、日本周辺海域では 2~20 ℃の海 域に生息し、その最適温度は約10℃と報告している。日 本海では北海道北部の沿岸にも分布し (Domitsu and Oda, 2005), 北西太平洋では北緯 50°の海域でも普通に分布す る (Kuroyanagi et al., 2002). 東シナ海では長江沖の表層 堆積物に多産する (Xu and Oda, 1999). ここは長江からの 溶存栄養塩を多く含む淡水の影響を受け、生物生産量の高 い海域である. 房総沖では初春のフィトプランクトンのブ ルームの時にフラックスが増大する (Oda and Yamasaki, 2005). Kuroyanagi and Kawahata (2004) による日本海表 層 200 m 中の浮遊性有孔虫群集の調査結果 (Fig. 8) による と、同種の生体は200mまで分布する.

Globigerina bulloides: 熱帯から亜寒帯まで分布する (Tolderlund and Bé, 1971). また, 湧昇域の指標として知 られる (Thiede, 1975). Bé and Hutson (1977) によると, 最適温度は 13.4 ± 7.8 ℃である. 東シナ海では長江沖の 生物生産量の高い海域に多産する. また, Xu et al. (2005) によると, 沖縄トラフでは黒潮の流軸が中国大陸の陸棚に 近づく12~1月と6~7月に個体群が減少する.日本海で は北海道北部まで分布している (Domitsu and Oda, 2005). Kuroyanagi and Kawahata (2004) の行った日本海表層 200 m 中の浮遊性有孔虫群集の調査結果 (Fig. 8) によると,同種 の生体は、日本海南部では 200 m まで分布するが、北部 では 120 m 以浅に限られる.

各種の生態情報を総合すると、東シナ海北部で占有率が 高く日本海南部で消滅する種(タイプ1)は、生殖サイク ルに伴い水深200m以深に潜るか分布中心が150m以深 にある.一方、占有率の低下が見られない種(タイプ2,3) は、50m以浅に生息する種か、低温への耐性が高くかつ沿 岸域に分布中心を持つ種である.つまり、低温への耐性が 低くかつ生活史の全期間あるいは一部の期間を150~200m 以深で過ごす種が日本海南部で消滅するのだ.

西村 (1974) は、日本海では真の深海動物や深海プラン クトンを欠くが、これは日本海の深一底層水が太平洋やオ ホーツク海のものと比べて低温なので、日本海に侵入して も,その個体群は死滅してしまうためと説いた.日本海南 部での G. inflata, G. glutinata, G. sacculifer, N. dutertrei, P. obliquiloculata の消滅も,同様の理屈で説明できる.図4は, JODC (日本海洋 データ センター) Data On-line Service System (http://www.jodc.go.jp/service\_j.htm) を基に作成 した東シナ海一日本海と太平洋の最寒月(3月)と最暖 月(8月)の水温一深度のプロファイルである. G. inflata の北限である三陸沖の深度150mから200mの間の水温 は3月では5.4℃~4.9℃,8月では7.0℃~5.3℃である. 一方,日本海では深度150mから200mの間で水温が急激 に低下し、最暖月ですら200m以深は5℃を下回る.この 低温が低緯度に分布中心のある種(G. glutinata, G. sacculifer など)はもとより G. inflataの日本海南部での消滅を引き 起こしたのだろう.

日本海中層の異常な低温の原因は、約300m以深の空 間を満たす日本海固有水にある.この冷水塊は、冬季の日 本海北部海域で、海氷形成時に排出される高塩分水の付加 と海面の冷却の効果により密度が高くなった表面水が沈 降したものである.この時に沈降する海水により深層に輸 送される酸素で、日本海深層は酸化的環境となり、炭酸カ ルシウムを溶かす(北里、1984).よって、日本海の深海 コア中の浮遊性有孔虫の溶解度の時間変動は、日本海固 有水の有無の代替指標となる.Kheradyar (1992)による ODP 798 地点(深度 900 m、図1)のコア中の浮遊性有孔 虫の群集解析の結果を見ると、前期更新世には少なくとも 6 層準で浮遊性有孔虫の溶解が見られる.このことは、前 期更新世にも日本海固有水が存在したことを示唆する.

以上のことから、日本海第四系における G. ruber と共産 する G. inflata の古海洋学的意義は、「深度 200 mを越す南 方海峡の指標」から「日本海固有水の低生産性の指標」と 変更される.これに伴って両種の共産する MIS57, 47, 45, 43, 41, 29 の南方海峡の水深が 200 m 以上で、「MIS47 か ら 41 の期間には氷期にも南方海峡が存在した」という北 村・木元 (2004) の推論は修正されるが, 1.55 Ma と 1.2 ~ 1.1 Ma の海峡の急激な浅海化を想定する必要はなくなった. 前述の Irizuki *et al.* (2007) の解釈は, 第四紀の日本海 にも適用できる.

#### 前期更新世の日本海固有水の低生産性の原因

日本海固有水の生産量は、冬季モンスーンの強度と表面 水の塩分に支配され、塩分は対馬海流によって供給されて いる.残念ながら、日本海における前期更新世の冬季モ ンスーンの強度に関する研究事例はない. Liu *et al.* (2003) は南シナ海の深海底コア試料を対象に粘土鉱物組成の時 系列変動を解析し、2.0 Ma 以降のアジアモンスーンの強 度を復元し、1.2~0.4 Ma の間氷期の夏季モンスーンは強 まったが、その前後の時代の間氷期では冬季モンスーンは強 まったが、その前後の時代の間氷期では冬季モンスーンと 夏季モンスーンの相対的強度は同じであったことを明ら かにした.よって、日本海固有水の生産量の低下の原因は、 冬季モンスーンの弱まったことよりも対馬海流の塩分が 低かった可能性が高い.そして、低塩分の原因は南方海峡 の断面積が現在の対馬海峡よりも小さく、海水の流入量 が現在よりも少なかったので、陸水の相対的影響度が高く なったことによると思われる.

以上をまとめると、後期鮮新世から前期更新世の間氷 期の日本海の生物の地理分布に重大な影響を及ぼした対 馬海流の動態およびその性状は、「地軸の傾きの変動に伴 う4.1万年周期の氷期一間氷期サイクル」、「離心率の変動 に関係した10万年周期の気候変動」、「1.7 Maの大規模な 南方海峡の形成」、「淡水の相対的影響度」に支配されてい る.

## 謝辞

天野和孝博士と匿名の査読者からのコメントは,有益な ご指摘をいただいた.ここに深く感謝いたします.

### 文献

- 天野和孝・市川敦子・小金沢五月,1988. 西頚城郡名立町大菅橋付 近の名立層産軟体動物群-新潟県上越地域西部の軟体動物化石の 研究(その3)-. 上越教育大学研究紀要,7,第3分冊,63-71.
- 天野和孝・菅野三郎, 1991. 新潟県上越市西部の 鮮新世貝化石群集 の構成と構造. 化石, (51), 1-14.
- 天野和孝・菅野三郎・市川敦子・柳沢幸夫,1987. 上越市西部の谷 浜層産軟体動物群一新潟県上越地域西部の軟体動物化石の研究 (その2)一. 上越教育大学研究紀要, 6, 第3分冊, 157-170.
- 天野和孝・佐藤時幸・小池高司,2000a. 日本海中部沿岸域におけ る鮮新世中期の古海況一新潟県新発田市の鍬江層産軟体動物群 一. 地質学雑誌, 106, 883-894.
- 天野和孝・鈴木政憲・佐藤時幸,2000b. 鮮新世中期における暖流の 日本海への流入一秋田県太平山周辺の天徳寺層産軟体動物群一. 地質学雑誌, 106, 299-306.
- Arai, K., Konishi, K. and Sakai, H., 1991. Sedimentary cyclicities and their implications of the Junicho Formation (late Plioceneearly Pleistocene), Central Honshu, Japan. *The Science Reports of Kanazawa University*, **36**, 49-82.

- Arai, K., Sakai, H. and Konishi, K., 1997. High resolution rockmagnetic variability for shallow marine stratigraphy: a sensitive paleoclimatic metronome-. *Sedimentary Geology*, **110**, 7-23.
- 荒井晃作・安井 秀・尾田太良,1998. 富山県十二町層中部(後期 鮮新世)の磁性鉱物量変動と浮遊性有孔虫化石群集に記録された 古海洋環境. 地質学雑誌, 104, 525-537.
- Bé, A. W. H., 1977. An ecological, zoogeographic and taxonomic review of recent planktonic foraminifera. Oceanic Micropaleontology, 1, 1-100.
- 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 University Press, London.
- Berger, A., 1992. Orbital Variations and Insolation Database. IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series # 92-007. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA. ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/paleo/ insolation/orbit91.
- Berger, W. H., Yasuda, M. K., Bickert, T., Wefer, G. and Takayama, T., 1994. Quaternary time scale for the Ontong Java Plateau: Milankovitch template for Ocean Drilling Program Site 806. *Geology*, 22, 463-467.
- Bijma, j., Faber, Jr. W. W. and Hemleben, C., 1990. Temperature and salinity limits for growth and survival of some planktonic foraminifers in laboratory cultures. *Journal of Foraminiferal Research*, 20, 95-116.
- Cronin, T.M., Kitamura, A., Ikeya, N., Watanabe, M. and Kamiya, T., 1994. Late Pliocene climate change at 3.4-2.3 Ma: paleoceanographic record from the Yabuta Formation, Sea of Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 108, 437-455.
- Domitsu, H. and Oda, M., 2005. Japan Sea planktic foraminifera in surface sediments: geographical distribution and relationships to surface water mass. *Paleontological Research*, **9**, 255–270.
- Erez, J., Almogi-Labin, A. and Avraham, S., 1991. On the life history of planktonic foraminifera: lunar reproduction cycle in *Globigerinoides sacculifer* (Brady). *Paleoceanography*, 6, 295-306.
- Hemleben, C., Spindler, M. and Anderson, O.R. 1989.
- Modern planktonic foraminifera. New York, Springer, 363p.
- Irizuki, T., Kusumoto, M., Ishida, K. and Tanaka, Y., 2007. Sealevel changes and water structures between 3.5 and 2.8 Ma in the central part of the Japan Sea Borderland: Analyses of fossil Ostracoda from the Pliocene Kuwae Formation, central Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 245, 421-443

JODC Data On-line Service System. http://jdoss1.jodc.go.jp/cgi-bin/1997/bts.jp

- Jian, Z., Wang, P., Saito, Y., Wang, J., Pflaumann, U., Oba, T. and Cheng, X., 2000. Holocene variability of the Kuroshio Current in the Okinawa Trough, northwestern Pacific Ocean. *Earth and*
- Planetary Science Letters, 184, 305-319.
  Kawahata, H., Nishimura, A. and Gagan, M.K., 2002. Seasonal change in foraminiferal production in the western equatorial Pacific warm pool: evidence from sediment trap experiments. *Deep-Sea Research*, *II*, 49, 2783-2800.
- Kheradyar, T., 1992. Pleistocene planktonic foraminiferal assemblages and paleotemperature fluctuations in Japan Sea, Site 798. *Proceedings of the ODP, Scientific Results*, **127/128**, 457-470.
- 北村晃寿,2004.第四紀の気候変動と種多様性:氷期一間氷期サイ クルに対する海生生物の応答.化石,(75),54-59.
- 北村晃寿・木元克典, 2004. 3.9Maから1.0Maの日本海南方海峡の変遷史.第四紀研究, 43, 417-434.
- Kitamura, A. and Kimoto, K., 2006a. History of the inflow of the warm Tsushima Current into the Sea of Japan between 3.5 and

0.8 Ma. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 236, 355-366.

- Kitamura, A. and Kimoto, K., 2006b. Eccentricity cycles shown by early Pleistocene planktonic foraminifers of the Omma Formation, Sea of Japan. *Global and Planetary Change*, doi:10. 1016/j. gloplacha. 2006. 09. 001.
- Kitamura, A., Kondo, Y., Sakai, H. and Horii, M., 1994. 41,000-year orbital obliquity expressed as cyclic changes in lithofacies and molluscan content, early Pleistocene Omma Formation, central Japan. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, **112**, 345-361.
- Kitamura, A., Takano, O., Takada, H. and Omote, H., 2001. Late Pliocene-early Pleistocene paleoceanographic evolution of the Sea of Japan. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 172, 81-98.
- 北里 洋, 1984. CCD 変化-KH-79-3, C-3 コアの解析を中心にして-. 月刊地球, 63, 567-570.
- 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.
- Lin, H. L., Wang, W. C. and Hung, G. W., 2004. Seasonal variation of planktonic foraminiferal isotopic composition from sediment traps in the South China Sea. *Marine Micropaleontology*, 53, 447-460.
- Lin, Y. S., Wei, K. Y., Lin, I. T., Yu, P. S., Chiang, H. W., Chen, C. Y., Shen, C. C., Mii, H. S. and Chen, Y. G., 2006. The Holocene *Pulleniatina* Minimum Event revisited: Geochemical and faunal evidence from the Okinawa Trough and upper reaches of the Kuroshio current. *Marine Micropaleontology*, **59**, 153-170.
- Liu, Z., Trentesaux, A., Clemens, S., Colin, C. and Wang, P., 2003. Clay mineral assemblages in the northern South China Sea: implicationsfor East Asian monsoon evolution over the past 2 million years. *Marine Geology*, **201**, 133-146.
- 三輪美智子・柳沢幸夫・山田 桂・入月俊明・庄司真弓・田中裕一 郎, 2004a. 新潟県北蒲原郡胎内川における鮮新統鍬江層の浮遊 性有孔虫化石層序-No.3 Globorotalia inflata bed 下限の年代につ いて-. 石油技術協会誌, 69, 272-283.
- 三輪美智子・渡辺真人・山田 桂・柳沢幸夫,2004b. 富山県氷見 市灘浦地域の藪田層(鮮新統)の浮遊性有孔虫化石群集-とくに No.3 *Globorotalia inflata* bed の下限の年代について-. 石油技術 協会誌,**69**,668-678.
- 西村三郎. 1974. 日本海の成立 生物地理学からのアプローチ. 227p. 築地書館.
- Oda, M. and Yamasaki, M., 2005. Sediment trap results from the Japan Trench in the Kuroshio domain: seasonal variations in the planktic foraminiferal flux. *Journal of Foraminiferal Research*, 35, 315-326.
- 大久保 弘・佐藤時幸・渡辺真人,2000. 富山県北西部の 鮮新一更 新統, 薮田層と十二町層の火山灰層の対比と十二町層下部の珪藻・ 石灰質ナンノ化石層序.地質学雑誌,106,583-596.
- Park, B. J. and Shin, I. C., 1998. Seasonal distribution of planktic foraminifers in the East Sea (Sea of Japan), a large marginal sea of the Northwest Pacific. *Journal of Foraminiferal Research*, 28, 321-326.
- Ruddiman, W. F., 2003. Orbital insolation, ice volume, and greenhouse gases. *Quaternary Science Reviews*, **22**, 1597-1629.
- Ruddiman, W. F., Raymo, M. E., Martinson, D. G., Clement, B. M. and Backman, J., 1989. Pleistocene evolution: Northern hemisphere ice sheets and North Atlantic Ocean. *Paleoceanography*, 4, 353-412.
- 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

- Sawada, K. and Handa, N., 1998. Variability of the path of the Kuroshio ocean current over the past 25,000 years. *Nature*, **392**, 592-595.
- Schiebel, R., Waniek, J., Bork, M. and Hemleben, C., 2001. Planktic foraminiferal production stimulated by chlorophyll redistribution and entrainment of nutrients. *Deep-Sea Research I*, 48, 721-740.
- Shackleton, N. J., Berger, A. and Peltier, W. R., 1990. An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP Site 677. *The Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences*, **81**, 251-261.
- Shackleton, N. J., Hall, M. A. and Pate, D., 1995. Pliocene stable isotope stratigraphy of ODP site 846. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 127/128, 457-470.
- Shieh, Y. T. and Chen, M. P., 1990. Planktonic foraminiferal assemblages within the surface 200 m water, across the Kuroshio Current, June, 1990. Acta Oceanographic Taiwan. 25, 87-98 (in Chinese, with English Abstract).
- 高田裕行・板木拓也・池原 研・山田和芳・高安克己, 2006. 有 孔虫化石が示す完新世初~中期の山陰地方沿岸域における対馬海 流.第四紀研究, 45, 249-256.
- Takemoto, A. and Oda, M., 1997. New planktic foraminiferal transfer functions for the Kuroshio- Oyashio Current region off Japan. *Paleontological Research*, 1, 291-310.
- Thiede, J., 1975. Distribution of foraminifera in surface waters of a coastal upwelling area. *Nature*, **253**, 712-714.
- Tian, J., Wang, P., Chen, R. and Cheng, X., 2005. Quaternary upper ocean thermal gradient variations in the South China Sea: implications for east Asian monsoon climate, *Paleoceanography*, 20, A4007.
- Tolderlund, D. S. and Bé, A. W. H., 1971. Seasonal distribution of planktonic foraminifera in the western North Atlantic. *Micropaleontology*, **17**, 297-329.

- Ujiié, Y. and Ujiié, H., 2000. Distribution and oceanographic relationships of modern planktonic foraminifera in the Ryukyu Arc region, northwest Pacific Ocean. *Journal of Foraminiferal Research*, **30**, 336-360.
- Venz, K. A. and Hodell, D. A., 2002. New evidence for changes in Plio-Pleistocene deep water circulation from Southern Ocean ODP Leg 177 Site 1090. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 182, 197-220.
- Wang, P., Zhang, J., Zhao, Q., Bian, Y., Zheng, L., Cheng, X. and Chen, R., 1988. Foraminifera and ostracoda in bottom sediments of the East China Sea. 438p., Ocean Press, Beijing. (in Chinese with English abstract).
- 渡辺真人,2002. 富山県氷見・灘浦地域の 鮮新統の 珪藻化石層序 と年代層序の再検討―とくに広域火山灰層と No.3 Globorotalia inflata (浮遊性有孔虫) bed の年代について―.地質学雑誌,108, 499-509.
- Xu, X. and Oda, M., 1995. Surface water changes in the Ryukyu Trench slope region, western margin of the North Pacific during the last 320,000 years. *Transactions and Proceedings of the Palaeontological Society of Japan, New Series*, (178), 105-121.
- Xu, X. and Oda, M., 1999. Surface-water evolution of the eastern East China Sea during the last 36,000 years. *Marine Geology*, **156**, 285-304.
- Xu, X., Yamasaki, M., Oda, M. and Honda, C. M., 2005. Comparison of seasonal flux variations of planktonic foraminifera in sediment traps on both sides of the Ryukyu Islands, Japan. *Marine Micropaleontology*, 58, 45-55.
- 山根雅之・大場忠道, 1999. 三陸沖海底コア (KH94-3, LM-8)の解 析に基づく過去9万年間の海洋環境変遷. 第四紀研究, **38**, 1-16.
- Yamasaki, M. and Oda, M., 2003. Sedimentation of planktonic foraminifera in the East China Sea: evidence from a sediment trap experiment. *Marine Micropaleontology*, **49**, 3-20.
- 柳沢幸夫・天野和孝,2003.新潟県上越地域西部に分布する鮮新統 の珪藻化石層序と古海洋環境.地質調査研究報告,54,63-93.

