

琉球弧周辺海域における生物起源粒子の 物質循環について

田中 裕一郎¹⁾

1. はじめに

東シナ海は、世界有数の面積の大陸棚を持ち、そこには黄河と揚子江河川からの大量の浮遊堆積物が流入している。また、揚子江からは大量の栄養塩が供給されているため、東シナ海の生物生産量は高い (Milliman and Meade, 1983; Milliman *et al.*, 1984)。その大陸棚沖合には、沖縄舟状海盆上を北上する黒潮が流れ、陸棚水と黒潮水の境界では、主に大陸棚からの海水・粒状物質の移流と海水の水温、塩分、湧昇によってコントロールされる複雑な混合域が形成されている。気象庁は、このような海洋学的変化に対して東シナ海の大陸棚から黒潮、沖縄トラフを横断し、奄美大島西方海上に延びる定線 (PN線) 海洋観測を長期にわたって実施しており、多くの海洋観測データの蓄積がある。また、科学技術振興調整費 MAS-FLEX プロジェクトにおける PN 線上での物質循環の経年・季節変化の研究をはじめとして、大陸棚縁辺域から黒潮域の物質循環の研究は数多く報告されている。また、更新世の海退・海進による陸棚形成過程や黒潮流路の変遷の研究も行われている。さらに、海洋変遷の解明のために、海洋循環に関係のある有殻微小動植物プランクトンの時空間分布の研究も数多くなされている。これらの有殻微小動植物プランクトンには、円石藻、浮遊性有孔虫や翼足類のような石灰質の殻と、珪藻、珪質鞭毛藻や放散虫のような珪質の殻を持つものがある。植物プランクトンである円石藻、珪藻や珪質鞭毛藻は、海洋環境、特に栄養塩の供給との関係が深い。また、動物プランクトンである浮遊性有孔虫や放散虫は、植物プランクトンを捕食する生活様式をとるもの、あるいは共生藻を持つものもあり、海洋の栄養塩の供給とは深く関与している。

一方、海底にも石灰質・砂質の底生有孔虫や貝形虫が生息しており、餌の一部となる海洋表層からの有機物の沈降とも関係した生活様式をとっている。

そこで、今回、東シナ海の大陸棚から沖縄トラフ域および琉球海溝域にかけて、これまで行われてきた主に現世の有殻動植物プランクトン及び底生有孔虫の研究のレビューを行うとともに、これらの結果を踏まえた琉球列島周辺海域に関する今後の研究の展望について述べる。

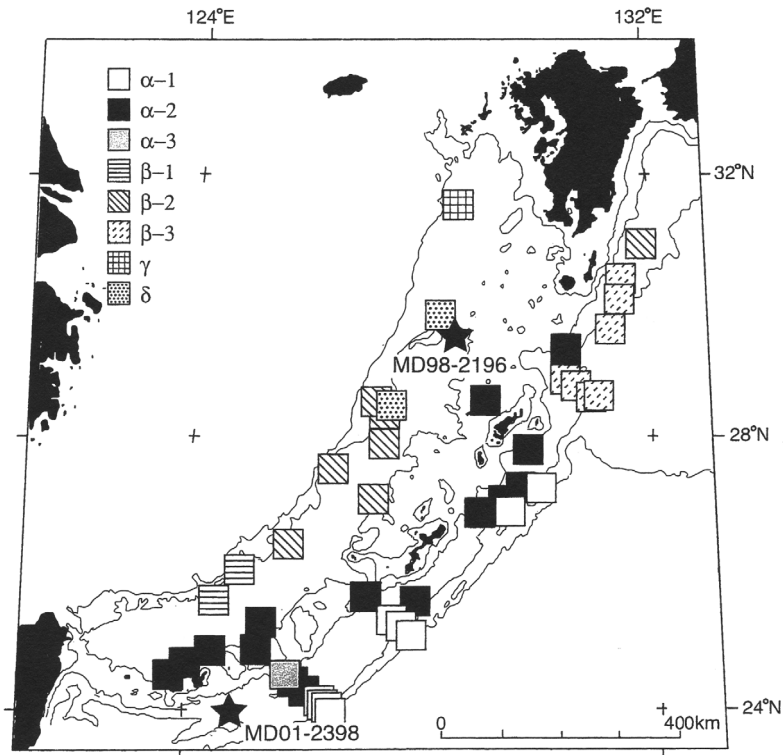
2. 東シナ海の栄養塩と一次生産量

植物プランクトン現存量の分布は、リン酸の濃度分布と類似しており (Berger *et al.*, 1987 ほか)、海洋の一次生産を規定しているのは、有光層への栄養塩の供給であることがわかる。東シナ海の PN 線における栄養塩は、渡辺 (1994) や Furuya *et al.* (2003) の報告によると、春季は陸棚奥部で高く沖縄トラフで低い。夏季は成層化によって陸棚域から沖縄トラフ域にかけて表層は低い値を示す。また、クロロフィル a 濃度は、春季に大陸棚および陸棚縁辺の湧昇域で高く、夏季は陸棚では水深約 40m で高く、沖縄トラフでも水深約 90m で高くなる傾向が認められている。

沖縄トラフ域のエキスポートの有機炭素量は、冬季から春季にかけて高くなり、沖縄トラフ域は炭酸塩 (有孔虫、円石藻)、オホーツク海は珪酸 (珪藻) が主体となっている違いはあるが、オホーツク海のピーク期 (秋季) にも匹敵する高い値となっている (Honda *et al.*, 1997)。また、琉球海溝域に比べると有機炭素と炭酸塩フラックスとも 2 倍以上の量となっており、沖縄トラフ域は大陸棚には及ばないまでも、海域によっては生物生産性が高いことがわかる。

1) 産総研 地質情報研究部門

キーワード: 東シナ海, 沖縄トラフ, 物質循環, 生物起源粒子, 黒潮, 八重山諸島, PN 線



第1図
Q-モードクスター解析による
琉球弧周辺海域における現世底
生有孔虫群集の区分(氏家・氏
家(2006)より, 原図はKawagata
and Ujiie (1996)).

3. 沖縄トラフの生物起源粒子

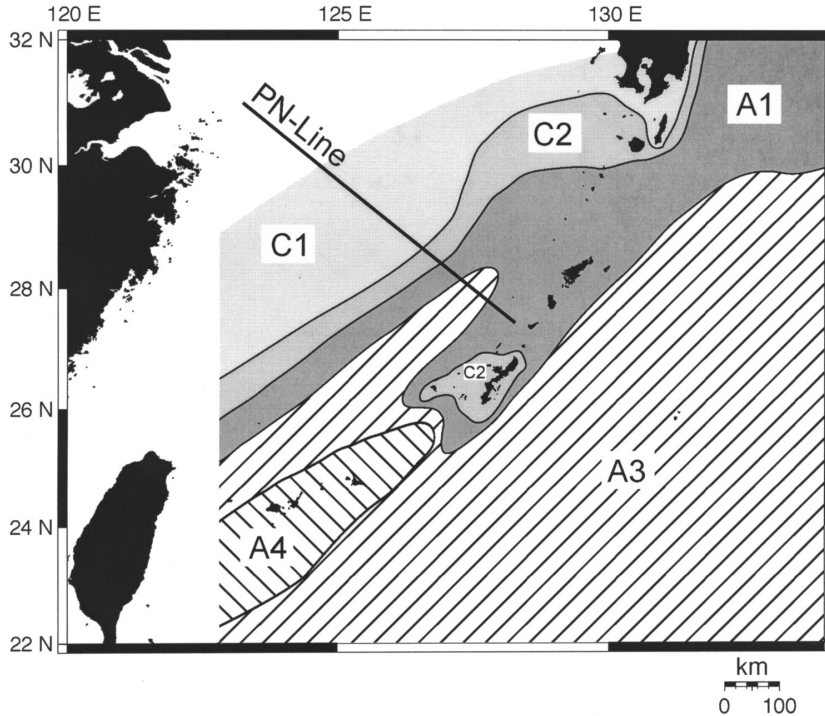
3.1 現世底生有孔虫群集解析

琉球弧周辺海域における現世底生有孔虫の分布は、Wang *et al.* (1988) やInoue (1989) およびKawagata and Ujiie (1996) などの報告がある。Kawagata and Ujiie (1996) は、東シナ海大陸棚縁辺域から沖縄トラフ、琉球列島周辺域および琉球海溝斜面域の海底表層堆積物から得た底生有孔虫遺骸群集について、Q-モードクスター解析により、8つの生物相に分けた(第1図)。それらは、陸棚縁辺から沖縄トラフ域と琉球弧周辺海域から琉球海溝斜面域の大きく2つに分けられ、前者は低塩分で比較的高い栄養塩域、後者は高温・高塩分で低い栄養塩の海水環境を反映している。また、Ujiie and Hatta (1995) は、西表島と石垣島に挟まれた石西礁湖およびその周辺海域で、表層堆積物中の底生有孔虫群集の解析を行った。この調査海域の表層堆積物は、ラグーン内は中粒・粗粒砂で、ラグーン外の斜面域は細粒砂から粗粒泥で構成されていた。一般に、底生有孔虫群集変化は、堆積環境を反映することが多いが、この海域での

底生有孔虫群集は、堆積場より外洋水の石西礁湖内への流入といった水理学的状態と地形学的状態によって構成されていることを報告している。

3.2 浮遊性有孔虫

琉球列島周辺海域の表層堆積物中の浮遊性有孔虫は、Xu and Oda (1999), Ujiie and Ujiie (1999) や Ujiie and Ujiie (2000) によって解析が行われている。Ujiie and Ujiie (2000) によると、浮遊性有孔虫群集も、底生有孔虫群集と同様に、黒潮流路と琉球海溝に大きく2つの生物相群に分かれる。東シナ海の陸棚から宮古島北部海域の群集をより詳細にみると、沖縄トラフ中央を挟んで、顕著な群集変化が認められている。すなわち、宮古島海域に向かうにしたがって、*Globigerinoides ruber*が増加し、黒潮流路で頻度の高かった*Globigerinita glutinata*が徐々に減少している。この傾向は、PN線でもみられ東シナ海域の特徴となっている。底生有孔虫の生物相は、石垣島から宮古島の北東海域(沖縄トラフ側)については、琉球海溝域と同じ生物相であったが、浮遊性有孔虫の生物相は、むしろ黒潮流路の生物相を示しており、



第2図 Q-モードクスター解析による琉球弧周辺海域における円石藻群集の区分(Tanaka (1991)より)。

琉球海溝側の生物相と異なることから、石垣島から宮古島の北西海域の海洋表層は、複雑な環境であることを示唆している。

東シナ海における浮遊性有孔虫エキスポート生産の季節変化については、Yamazaki and Oda (2003), Xu *et al.* (2005) や山崎ほか (2001) で報告されている。Xu *et al.* (2005) は、沖縄トラフと琉球海溝斜面から同じ期間に捕集されたセジメントトラップ試料について、浮遊性有孔虫エキスポート生産の解析を行った。その結果、Ujiié and Ujiié (2000) による表層堆積物中の浮遊性有孔虫分布と調和的で、すなわち沖縄トラフ域のトラップサイトで *G. ruber* のフラックスが高い結果を得た。また、彼女らは *G. glutinata* が栄養塩の多い黒潮流路で高いことからこの種と *Globigerina bulloides* などのフラックスの変化をもとに、黒潮軸の北西-南東のシフトとの関係を見出した。すなわち、黒潮軸が沖縄トラフ側へシフトするとこれらの種群のフラックスが高くなり、大陸棚側へシフトするとフラックスが低くなることを明らかにした。

3.3 円石藻

2007年6月号

東シナ海におけるPN線及び沖縄トラフの円石藻の研究は、これまでになかなか行なわれていない(Wang and Samtleben, 1983; Zhang and Siesser, 1986; Tanaka, 1991ほか)。Tanaka (2003) による表層堆積物中の円石藻遺骸群集およびTanaka *et al.* (1995) のPN線の秋季の現生円石藻の研究によると、円石藻現存量は、大陸棚縁辺部で最も高い値を示す。また、円石藻群集は、*Emiliania huxleyi*, *Gephyrocapsa oceanica* の2種が、陸棚域で多産し、特に陸棚内部域から中部域では *G. oceanica* が卓越する。一方、沖縄トラフでは *Florisphaera profunda* が、*G. oceanica* に代わって多産し、特に沖縄トラフ中央海域では *F. profunda* が卓越するとともに *Thorosphaera flabellatus* や *Umbellosphaera irregularis* は、陸棚には産出せず沖縄トラフ域のみの産出であった。これらの結果は、陸棚域から沖縄トラフ域における円石藻群集は、陸棚と黒潮のそれぞれの水塊の影響を反映していることを示している。

Tanaka (1991) は、日本周辺海域の海底表層堆積物中の円石藻遺骸群集を解析した。その結果、東シナ海には、大陸棚域、黒潮軸域、沖縄トラフ域、外洋水

域と宮古・八重山周辺海域の5つの異なる生物相を報告した(第2図)。特に、宮古・八重山周辺海域の生物相は、区分された生物相のなかで、最も種の多様性が高い(第2図のA4)。また、この海域の水温は高いが、外洋に比べると塩分がやや低い特徴があり、八重山諸島海域の生物相は黒潮ならびに外洋水の両方の影響を受けていると推測される。

3.4 珪藻

東シナ海における珪藻の研究は、朝岡(1975)、Furuya *et al.*(1996)、Furuya *et al.*(2003)や谷村ほか(2002)がある。朝岡(1975)は、東シナ海における1961年から1966年の夏季と冬季の表面水の全珪藻平均細胞数を調べた。それによると、夏季は大陸沿岸域に多産する($10^3 \sim 10^6$ 細胞)が、黒潮流域あるいは沖繩トラフや琉球海溝域では非常に少ない(10^2 細胞以下)。冬季は、黒潮流域と沿岸水が混合する海域で増加するが、沖繩本島以南の海域では少ないままである。Furuya *et al.*(1996)によるとPN線における1993年冬季の現生珪藻の生産量は、陸棚で最も多く陸棚縁辺に向かって徐々に減少し、黒潮流域で再度多くなり、沖繩トラフ域で最も少ない。また、R-モードクラスター解析によると陸棚と陸棚縁辺から沖繩トラフにかけて、大きく2つの生物相群に分かれる。これは、水温-塩分ダイアグラムによって、前者は低塩分・低水温、後者は高塩分・高水温とに識別されている。後者はさらに黒潮軸域と沖繩トラフを特徴づける種群にはっきりと分かれ、これらの結果は、クロロフィルa濃度とも調和している。また、1993年夏季の珪藻量も、大陸棚で多く沖繩トラフで低く、冬季、夏季とも沖繩トラフ域で非常に低い値を示している。

3.5 放散虫

東シナ海における放散虫の研究は、Chang *et al.*(2003)やShinjo *et al.*(1998)などがある。Chang *et al.*(2003)は、東シナ海北東部の海底表層堆積物の分布と海洋環境との関係について報告している。放散虫の個体数変化に基づいて、陸棚域、沖繩トラフの西部縁辺域と沖繩トラフ中央域の3つの群集にわけた。その個体数は、陸棚域が最も少なく、沖繩トラフ域が最も多く、クロロフィルa濃度とは、逆相関をしている。したがって、彼らは、放散虫の生息には栄養塩が必要ではあるが、それが十分条件ではないと結論づけ

た。この結果は、南シナ海で同様な放散虫の研究をしたWang *et al.*(1998)とは、全く逆の提唱となっている。但し、陸棚から沖繩トラフにかけて海底堆積物のタイプも急速に変化しており、放散虫の海底への堆積作用による密集あるいは枯渇も考えられ、今後の課題となっている。

一方、Shinjo *et al.*(1998)は、宮古島北東海域から大陸棚における海底堆積物について調査を行った。放散虫遺骸は陸棚と黒潮流域で少なく、沖繩トラフ域で比較的多産しており、典型的な温暖種群を見出した。

4. 琉球弧周辺海域における生物起源粒子の研究

東シナ海における海洋学に関する研究は、特に、陸棚から黒潮流域の研究は、豊富な海洋資源域でもあり、研究成果も数多く報告されている。一方、沖繩トラフから琉球弧周辺域での海洋一次生産量、あるいは有殻微小動植物プランクトンと海洋環境との関係については研究報告が少ない。そこで、PN線東端海域(沖繩トラフ東部域)と八重山諸島海域に焦点を当てて、生物起源粒子の物質循環に関する研究の今後の展望を述べる。

4.1 PN線東端海域において

動植物プランクトンは、生物活動による炭素の固定、大気からのCO₂の吸収、CO₂の大気への放出、死後の海洋中・深層への炭素の輸送に関与し、その過程の中で有機物生成や分解、石灰化および溶解が行われており、これらは、炭素循環に大きく影響を与えている。1993年から1994年における海洋-大気間の二酸化炭素分圧をみると、冬季および秋季では陸棚から沖繩トラフ域で、海洋が二酸化炭素を吸収している。一方、夏季には、黒潮の流域で海洋が二酸化炭素を吸収しているが、大陸棚及び沖繩トラフ域では大気へ放出しており、特に、PN線上の東経127度30分より東部海域で顕著である(日下部ほか、1995)。

東シナ海の海面水温は、過去50年間にわたって上昇しており、特に1980年代後半からは、上昇率が大きくなり、その上昇率は冬季に大きく、夏季に小さいことが明らかとなっている(高槻ほか、2006)。Aoyama *et al.*(2005)によると、PN線の東端(沖繩トラフ東側域)では、過去30年間で、リン酸塩、クロロフィルa

は減少しており、この変化は、海面表層水温上昇による成層の強化によって表層への栄養塩の供給が減少し、クロロフィルa濃度が減少していると考察されている。これらの結果は、夏季にPN線の東端で海洋の二酸化炭素分圧が高くなり、二酸化炭素を大気に放出していることを支持している。また、この海域の海水の流量も少なく、その流れは黒潮と逆方向に流れており(黒潮反流)、海水の交換が少ない。このような海洋環境下により、沖縄トラフ東側海域の珪藻、円石藻群集も沖縄トラフあるいは黒潮流路とは、顕著な違いが見られている。また、この海域の底生有孔虫の群集も沖縄海溝斜面と同じ群集を示しており、高水温・高塩分で栄養塩の低い環境を反映しているといえる。

したがって、今後の地球温暖化によって海水温度が高くなることを考えると海水酸性化問題に関して、調査する価値のある海域であると考えられる。なお、海水酸性化問題の詳細な説明については、本特集の鈴木ほか(2007)を参照されたい。

4.2 八重山諸島周辺海域について

遠距離海洋レーダを用いた表層流観測によると東シナ海南西部に流入する黒潮と八重山諸島に挟まれる海域は、与那国島の西と東から発生した時計回りの渦と反時計回りの渦によって海洋性乱流場が形成されることが明らかとなっている(児島ほか, 2006)。この海域における浮遊性有孔虫群集が黒潮と外洋水両方の影響を受けた結果とも調和している。また、円石藻も八重山諸島海域に特徴的な群集を示しており、同様な海水の影響を反映していたと考えられる。衛星による表層水温データによると夏季に八重山諸島周辺や東側海域は、その周りの海域や沖縄本島周辺海域より水温の低い状態が存在することも観測されており、台風の影響あるいは台湾と八重山諸島との間を通過する黒潮の流れと海洋環境変化との関係について興味深い海域となっている。なお、八重山諸島周辺海域の海洋物理環境に関しては、本特集の長尾ほか(2007)を参照されたい。

5. おわりに

PNライン東端海域や八重山諸島海域の生物起源粒子の物質循環の解明を行うためには、セジメント

ラップ実験によって、生物起源粒子の経年変化を調べる必要がある。また、これらの海域での栄養塩、クロロフィルa濃度の観測や海水流動構造の観測を行い、総合的な環境解析が必要である。

謝辞: 本稿を書く機会を与えていただいた産業技術総合研究所・荒井昇作博士に感謝いたします。また、産業技術総合研究所・鈴木 淳博士および長尾正之博士には貴重な助言をしていただき感謝いたします。

引用文献

- Aoyama, M., Goto, H., Kamiya, H., Kaneko, I., Kawae, S., Kodama, H., Konishi, Y., Kusumoto, K., Miura, H., Moriyama, E., Murakami, K., Nakano, T., Nozaki, F., Sasano, D., Shimizu, T., Suzuki, H., Takatsuki, Y. and Toriyama, A. (2005) : Marine biogeochemical response to a rapid warming ocean during these three decades in the East China Sea. DOBIS International Symposium-Dynamics of the Ocean Biosystem- Abstract.
- 朝岡 治(1975) : 東シナ海の植物プランクトン分布と海況. 海洋科学, 7, 38-45.
- Berger, W. H., Fischer, K., Lai, C. and Wu, G. (1987) : Ocean productivity and organic carbon flux. Part I. Overview and maps of primary production and export production. Univ. California, San Diego, SIO Reference 87-30.
- Chang, F., Zhuang, L., Li, T., Yan, J., Cao, Q. and Cang, S. (2003) : Radiolarian fauna in surface sediments of the northeastern East China Sea. Mar. Micropaleont., 48, 169-204.
- Furuya, K., Kurita, K. and Odate, T. (1996) : Distribution of phytoplankton in the East China Sea in the winter of 1993. J. Oceanography, 52, 323-333.
- Furuya, K., Hayashi, M., Yabushita, Y. and Ishikawa, A. (2003) : Phytoplankton dynamics in the East China Sea in spring and summer as revealed by HPLC-derived pigment signatures. Deep-Sea Res. II, 50, 367-387.
- Honda, M. C., Kusakabe, M., Nakabayashi, S., Manganini, S. J. and Honjo, S. (1997) : Change in pCO₂ through biological activity in the marginal seas of the western North Pacific: the efficiency of the biological pump estimated by a sediment trap experiment. Journal of Oceanography, 53, 645-662.
- Inoue, Y. (1989) : Northwest Pacific foraminifera as paleoenvironmental indicators. Sci. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba, Sec. B, 10, 57-162.
- Kawagata, S. and Ujiie, H. (1996) : Distribution and environmental relationships of recent bathyal foraminifera in the Ryukyu Island Arc region, northwest Pacific Ocean. J. Foram. Res., 26, 342-356.
- 児島正一郎・佐藤健治・小賀百樹・長尾正之・瀧野拓郎(2006) : 遠距離海洋レーダによる東シナ海南西部の表層流観測. 海岸工学論文集, 53, 1431-1435.
- 日下部正志・渡辺修一・柳 哲雄(1995) : 大気・海洋間の物質交換と海中粒子状物質の時空間変動に関する研究. 縁辺海における物質循環機構の解明に関する国際共同研究報告書. 51-75.
- Milliman, J. D. and Meade, R. H. (1983) : World wide delivery of river sediment to the oceans. Journal of Geology, 91, 251-259.
- Milliman, J. D., Xie, Q. and Yang, Z. (1984) : Transfer of particulate

- organic carbon and nitrogen from the Yangtze river to the ocean. *American Journal of Science*, 284, 824-834.
- 長尾正之・橋本英資・高杉由夫・児島正一郎・佐藤健治・森本昭彦・鈴木 淳・渋谷拓郎 (2007) : 八重山諸島周辺での物理環境計測. *地質ニュース*, no.634, 43-49.
- Shinjo, R., Motoyama, I., Nakamura, M., Takaki, Y., Nishida, H., Morii, Y. and Tanaka, H. (1998) : Report on RN97 Cruise by T/S Nagasaki Maru in the southern Okinawa trough. *Bull. Coll. Sci., Univ. Ryukyus*, 65, 39-51.
- 鈴木 淳・長尾正之・箕島佳代・井上麻夕里・川幡穂高 (2007) : 琉球列島のサンゴ礁の諸問題: 礁形成の解明から生物多様性保全まで. *地質ニュース*, no.634, 35-42.
- 高槻 靖・永井直樹・志賀 達 (2006) : 気象庁観測定線 (PM線, PN線) で検出された長期変動. *沿岸海洋研究*, 44, 9-17.
- Tanaka, Y. (1991) : Calcareous nannoplankton thanatocoenoses in surface sediments from seas around Japan. *Sci. Rep., Tohoku Univ.*, 2nd ser., 61, 127-198.
- Tanaka, Y., Katayama, H. and Yamada, M. (1995) : Transport processes of biogenic materials based on the coccolith compositional analysis of particles in the sediment traps from the East China Sea. In: Tsunogai, S. *et al.* (eds.), *Global fluxes of carbon and its related substances in the coastal sea-ocean-atmosphere system*. 213-217.
- Tanaka, Y. (2003) : Coccolith fluxes and species assemblages at the shelf edge and in the Okinawa Trough of the East China Sea. *Deep-Sea Res. II*, 50, 503-511.
- 谷村好洋・嶋田智恵子・芳賀正和 (2002) : 珪藻 *Paralia sulcata* の増減からみた大陸系混合水の消長-東シナ海北東部の最終氷期-後氷期海洋環境-. *第四紀研究*, 41, 85-93.
- Ujiié, H. and Hatta, A. (1995) : Quantitative analyses of benthic foraminiferal assemblages from southern Ryukyu Islands Arc, subtropical northwestern Pacific Ocean. *J. Foram. Res.*, 25, 334-349.
- Ujiié, H. and Ujiié, Y. (1999) : Late Quaternary course changes of the Kuroshio current in the Ryukyu Arc region, northern Pacific Ocean. *Mar. Micropaleont.*, 37, 23-40.
- Ujiié, Y. and Ujiié, H. (2000) : Distribution and oceanographic relationship of modern planktonic foraminifera in the Ryukyu Arc region, northwest Pacific Ocean. *J. Foram. Res.*, 30, 336-360.
- 氏家由利香・氏家 宏 (2006) : 沖縄トラフおよび石垣島南方で採取されたIMAGESコアに基づく過去約25万年間の表層・中層水の変動. *化石* 79, 43-59.
- Wang, P., Zhang, J., Zhao, Q., Min, Q., Bian, Y., Zheng, L., Cheng, X. and Chen, R. (1988) : Foraminifera and ostracoda in bottom sediments of the East China Sea. *Ocean Press. Beijing*, 438p.
- Wang, P. and Samtleben, C. (1983) : Calcareous nannoplankton in surface sediments of the East China Sea. *Mar. Micropaleont.*, 8, 249-259.
- Wang, R., Jian, Z., Li, B. and Cheng, R. (1998) : Paleooceanographic implication of radiolarian in the southern Okinawa Trough over the last 20000 years. *Sci. China (Ser. D)* 41, 21-27.
- 渡辺康憲 (1994) : 3断面から見た東シナ海の海洋構造と栄養塩分布. *月刊海洋*, 26, 125-130.
- Xu, X. and Oda, M. (1999) : Surface-water evolution of the eastern East China Sea during the last 36,000 years. *Mar. Geol.*, 156, 285-304.
- Xu, X., Yamasaki, M., Oda, M. and Honda, M. C. (2005) : Comparison of seasonal flux variations of planktonic foraminifera in sediment traps on both sides of the Ryukyu Islands, Japan. *Mar. Micropaleont.*, 58, 45-55.
- 山崎 誠・尾田太良・秋元和美・田中裕一郎 (2001) : セジメント・トラップ実験にもとづく東シナ海陸棚縁辺域における有孔虫の輸送過程. *地質雑*, 107, 15-25.
- Yamasaki, M. and Oda, M. (2003) : Sedimentation of planktonic foraminifera in the East China Sea: evidence from a sediment trap experiment. *Mar. Micropaleont.*, 49, 3-20.
- Zhang, J. and Siesser, W. G. (1986) : Calcareous nannoplankton in continental-shelf sediments, East China Sea. *Micropaleont.*, 32, 271-281.

TANAKA Yuichiro (2007) : Biogenic particles in sea area around Ryukyu Arc.

<受付: 2007年4月6日>