# 石灰質ナンノ化石サイズ変化と Discoaster 生産量からみた新生代古海洋変動

# 佐藤時幸\*·千代延 俊\*\*

\*秋田大学工学資源学部地球資源学科応用地球科学教室. \*\* 東北大学大学院理学研究科地学専攻地圈進化学講座(地質学古生物 学教室)

# Cenozoic paleoceanography indicated by size change of calcareous nannofossil and *Discoaster* abundance

# Tokiyuki Sato\* and Shun Chiyonobu\*\*

\*Institute of Applied Earth Sciences, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University, Tegata-Gakuencho 1-1, Akita 010-8502, Japan (toki@keigo.mine.akita-u.ac.jp); \*\*Institute of Geology and Paleontology, Graduate School of Science, Tohoku University, Aobayama, Sendai 980-8578, Japan

Abstract. We discuss in detail the Cenozoic paleoceanograpy related to the sea surface stratification, nutrient, and sea surface temperature based on the relationship between the coccolith maximum size and *Discoaster* abundance. The positive correlation was recognized between these parameters in the sequence from Eocene to Pliocene. As *Discoaster* is likely a lower photic species as like *Florisphaera profunda*, abundant occurrence of *Discoaster* indicates the sea surface stratification and the oligotrophic condition. On the basis of the relationship between coccolith maximum size and *Discoaster* abundance found in the Cenozoic sequence of ODP sites 807 and 731, the intervals of the late Eocene, NN3 to NN4 zones in the early Miocene, and NN6 to NN9 zones in the middle Miocene, are interpreted as the oligotrophic conditions.

Key words: nannofossil, Cenozoic, paleoceanography, coccolith size

### はじめに

石灰質ナンノプランクトンは、コッコリスと呼ばれる 石灰質殻によって細胞が覆われる極めて小さな植物プラ ンクトンである. コッコリスのサイズは多くは5~10 ミ クロン前後のきわめて小さなサイズで特徴づけられるが, 地質時代通じで様々に変化してきた. 例えば新生代初めに 比較的小型であったコッコリスは、始新世で急激に大型 化し(Backman and Hermelin, 1986),同世末には20ミ クロンを超える極めて大型のコッコリスが出現する.新 第三紀の代表的コッコリスである Reticulofenestra 属をみ ても、2ミクロンから10ミクロン以上までに様々に変化 する (Young, 1990) が、 第四紀では極めて小型のコッコ リスの多産へと変化する. このような地質時代を通じて のコッコリスサイズ変化の原因は,海洋環境変化と関連 させて議論されてきたが (Takahashi and Okada, 2001; Schmidt et al., 2006; Henderiks and Pagani, 2008 など), その詳細については未だ不明な部分が多い.

筆者らは、このような石灰質ナンノ化石の形態変化と古 海洋変動との関係を明らかにすべく、ODP, IODP で採取 された第三系、第四系深海底コアを用いて検討を行ってい る. その結果、コッコリスのサイズ変化と海洋環境変動 との関係に興味深い結果がいくつか得られた.本論では、 そのうちインド洋および南太平洋から採取された第三系 深海底コアの研究成果の中から、コッコリスサイズの問題 点に関する予察結果について紹介する.

# 第四紀海洋構造と石灰質ナンノプランクトン - Margalefのマンダラと円石藻類の分布形態-

珪藻/円石藻/渦鞭毛藻間の消長について議論した Margalef のマンダラ (Margalef, 1978) では、それぞれの プランクトンの生産量や形態変化が海洋表層の栄養塩濃 度と成層化/撹拌が極めて重要であることを示した. その 後, Falkowsky et al. (2004) は, このマンダラを地質時代 までに延長し,大陸の配置変化とそれによる緯度間の温度 勾配、海洋の撹拌変化によって、地球は中生代以降、中 栄養~貧栄養性の円石藻類から富栄養性の珪藻優位の海 洋へ変化したことを示し, 地史を通じた植物プランクトン の変遷が海洋表層構造と密接に関連してきたことを指摘 した.一方,円石藻のみを見ると,円石藻がr-K戦略を とって生息している(Young, 1994)ばかりでなく、その 化石である中生代以降の石灰質ナンノ化石群集が、貧栄 養の亜熱帯海洋環境に特徴的なK戦略のグループと,富 栄養の高緯度もしくは湧昇流海域に多産するr戦略のグ ループとの間で大きく変動して来たことが指摘されてい



図1. 現在および中新世における石灰質ナンノプランクトン垂直分布と海洋の成層構造

る (Bown *et al.*, 2004).

一般に円石藻は、水深100m以深に発達する水温躍層 を境に大きく群集を異にする. すなわち, 円石藻は光合 成を行うことから、水深200m以浅の透光帯に生息が限 られるが、多くの種は約100m以深の水温躍層より浅い 高水温/貧栄養層(上部透光帯)に生息する. 逆に100 m 以深で下部透光帯の低光量/低水温/富栄養層では、生息 する種は Florisphaera profunda Okada and Honjo などに限 られる (図1). Boeckel et al. (2006) によると, F. profunda は表層水が高水温/貧栄養で、下位に水温躍層が発達する 成層構造を持った海洋の堆積物に極めて多い. 同様な結果 は Hagino and Okada (2000)の現生の調査結果からも示さ れている. このことは、F. profunda の多産が高水温/貧栄 養環境の表層水(上部透光帯)と,その下位に水温躍層が 発達する成層構造を示唆し、逆に F. profunda が稀な場合 は, 湧昇流などにより海洋表層の成層構造が消滅し, 小型 の Gephyrocapsa 属と Reticulofenestra 属が多産する (図2). 近年 Chivonobu et al. (2006) は, このような生態学的特

徴を第四系に応用し,第四紀後期に円石藻の生産量と富 栄養の指標種である小型のコッコリスが減少し,代わっ て下部透光帯種の F. profunda が急増することを指摘した (図3).このことからも明らかな様に,F. profunda の多 産は第四紀後期における海洋表層の強い成層化を示唆し ており,F. profunda の産出量変化に注目することによっ て過去の水塊構造の乱れや,表層水温の低下と栄養状態 の変遷までをも言及できることを示唆している.

# 石灰質ナンノ化石群集から探る 新生代海洋構造の変遷

#### **Discoaster** 属は温暖種か?

前項では,第四紀後期における海洋表層構造に関して石 灰質ナンノ化石群集からの復元例を示した.しかしなが ら,我々が石灰質ナンノ化石に基づいてこのような古海洋 構造復元を試みる場合,鮮新世以前の時代では石灰質ナン ノ化石種の多くが絶滅種であるために,現生石灰質ナンノ 佐藤時幸・千代延 俊



図2. 海洋表層の成層時と湧昇発達時における石灰質ナンノプランクトン垂直分布の違い

プランクトンの生態を直接応用することができない.

この点で注目されるのが Discoaster 属である.第三紀の 代表的石灰質ナンノ化石である Discoaster は、古くから 暖海種と考えられて来た(例えば Bukry, 1973).しかし、 Wei and Wise (1990)は、Discoaster の地理分布から、本属 を直接暖海の指標と考えることに慎重であるべきであると 論じた.その後、Aubry (1992)は、Discoaster の地理分布 が暖海域であっても、生息水深は透光帯下部であり、貧栄 養帯を好む種であることをはじめて指摘した.さらに近年 になって、Stoll et al. (2007)は、Discoaster が下部透光帯種 である可能性を Discoaster の Sr/Ca 分析から示した.これ ら一連の研究成果は、温暖種と考えられて来た Discoaster が表層水温の直接的な指標種ではないこと、すなわちその 多産は海洋表層の成層化を示し、結果として表層水が高水 温で貧栄養であったことを示唆している(図 1).

# 石灰質ナンノ化石のサイズ変化と Discoaster の産出頻度

はじめに述べたように、地質時代を通じた石灰質ナ ンノ化石のサイズ変化は特徴的であり、特に古第三紀 での変化は際立っている.図4は、古第三紀に特徴的な Chiasmolithus 属の最大サイズ変化を模式的に示したもの で、始新世初めに15ミクロン前後であった最大サイズが、 同世末には20ミクロン以上の極めて大型の Chiasmolithus grandis (Bramlette and Riedel)Radomski が出現する.しかし,始新世/漸新世境界を境に Chiasmolithus 属は10 ミクロン前後へと小型化する.この時期には,南極大陸とオーストラリア大陸の分離と,これによる南極大陸の氷床形成/地球の大規模な寒冷化(Zachos et al., 2001)が発生しており,これらの環境変動が石灰質ナンノ化石形態に大きな影響を及ぼしたことが推定される.

このようなコッコリスのサイズ変化を前述の Discoaster の生産量との比較から考察してみる.図5は東赤道太平 洋で掘削された ODP Hole 807A, Cのコッコリス生産量 と下部透光帯種と考えられる Discoaster の生産量,および Reticulofenestra と Chiasmolithus の最大サイズ変化を示し ている.上述の始新世/漸新世境界に注目すると,酸素 同位体比の変動(Zachos et al., 2001)からも示される急 激な寒冷化と同時に Discoaster の産出量およびコッコリス サイズは減少し,コッコリスの生産量が急増する.やや 不明瞭であるものの,これと逆の現象が中新世の NN3 ~ NN10 層準でも認められる.すなわち,NN6 付近での一 時的な Discoaster 生産量の低下を伴うものの,大局的には Discoaster の生産量と Reticulofenestra 属の最大サイズ増加 に対し,コッコリスの生産性は低下する.

同様に図6はインド洋 Hole 731Aの前期中新世~後期 中新世におけるコッコリスサイズと Discoaster の相対頻 度変化を示している.この Hole では、Hole 807A, C で やや不明瞭であったコッコリスサイズと Discoaster との



図 3. 東西赤道太平洋深海底コアの過去 50 万年間における 全コッコリス (A),小型コッコリス (B),暖海種 (C),および下部透光帯種 *F. profunda*(D)の産出量変化 (Chiyonobu *et al.* (2006) を加筆修正)

化石 86 号



図4. 始新世から漸新世における Chiasmolithus 属の最大サイズ変化

関係が、明瞭に認められる. すなわち、Discoaster が 50% 以上の割合で多産する NN3 から NN4帯下部では、コッ コリスの最大サイズが Coccolithus 属で 20 から 16 ミクロ ン程度, Reticulofenestra 属が 10 から 8 ミクロン前後と比 較的大型であるのに対し、Discoaster が 10% から 5% 以 下と小さくなる NN4帯上部から NN5帯では、それぞ れ 12 ミクロンまたは 8 ミクロン以下へ小型化する. その 上位、Discoaster の相対頻度が再び増加するする NN6帯 から NN9帯では、Coccolithus のサイズは同様に最大 18 ミクロンまで、Reticulofenestra が 12 ミクロンまで大型 化しており、Discoaser の相対頻度変化 と Coccolithus や Reticulofenestra の最大サイズが極めて良い相関関係にある ことを示す.

以上の結果に基づくと、インド洋および西太平洋におけるコッコリスサイズと Discoaster 産出量との関係は、次のような海洋構造の変化を示す.すなわち、Discoaster の減少は海洋表層の成層構造の崩壊、およびそれに伴う表層の富栄養化を示唆し、コッコリスの小型化と生産量の急増を招く.逆に Discoaster の多産は海洋表層の成層化を示し、

表層の貧栄養と温暖化によってコッコリスサイズの増大 と生産量の低下を招いたことを示唆している. すなわち, インド洋では前期中新世末から中期中新世初めの NN3帯 から NN4 帯下部で海洋表層は成層化し、表層水は温暖化 とともに貧栄養状態であったが,その後一時的な成層化の 崩壊後,中期中新世後期から後期中新世初め,NN6帯上 部からNN10帯最下部までの間で再び成層構造が発達し た. このような成層化による表層の貧栄養状態では、円石 藻類は大型のコッコリスを持つグループ, すなわち K 選 択を行うグループが出現する.一方,西赤道太平洋,Site 807の始新世/漸新世境界では、Discoasterの産出量が減 少し、コッコリスの最大サイズは20ミクロン以上から10 ミクロン以下へ急激に小型化, 逆にコッコリスの生産性は 1桁以上上昇する. これらの変化は、大陸の分離と寒冷化 による海流の流路/流速の変化が海洋表層の成層化崩壊 と表層の富栄養化を招いたことが原因となっていると推 定され、その結果として小型のコッコリスの多産、すなわ ちr選択のグループの支配へ変化したことを示唆する.





図 5. 西赤道太平洋 Hole 807A, C の始新世から第四紀におけるコッコリス生産量, Discoaster 生産量,および Reticulofenestra と Chiasmolithus 最大サイズの変遷(\*Pleistocene 基底は Calabrian 基底に対応)

#### 本邦の新第三系石灰質ナンノ化石群集

Discoaster に 関 す る 新 し い 生態学的解釈 は, こ れ ま で石灰質ナンノ化石群集の解釈で問題となっていた本 邦の新第三紀石灰質ナンノ化石群集解釈に新しい示唆 を与える. すなわち (1) Discoaster が産出する常磐地 域と同緯度の日本海側地域,鮮新統では暖海性浮遊性 有孔虫の Globorotalia inflata (d'Orbigny) が産するにも かかわらず Discoaster が全く認められない(佐藤ほか, 1988),(2) 西南日本の宮古島では下部鮮新統で多産し た Discoaster が、上部鮮新統ではほとんど産しない(Sato et al., 2002), (3) 亜熱帯~温帯のきわめて暖かいと考え られている西黒沢期初期 NN4帯,秋田県出羽丘陵の須 郷田層や北陸地域の砂子坂層の石灰質ナンノ化石群集が Coccolithus pelagicus (Wallich) Schiller の多産で特徴づけ られ Discoaster が稀である(佐藤ほか, 1996;千代延ほか, 2000) などである. このうち, 須郷田層はホタテなどの二枚 貝類を多産する浅海成層であることからすると, Discoaster の産出個体数に関しては水温ではなく、浅海域の水塊構造の 点から考察する必要があることを示している.同様に、日 本海側地域および西南日本地域における上部鮮新統での Discoaster の産出状況は、西南日本および日本海固有の表 層水塊発達様式からの再検討が必要である.

石灰質ナンノ化石群集からの古環境推定では,殆どが絶 滅種のために様々な問題が含まれる.円石藻類が水温のみ ならず栄養塩など様々な環境要因に反応して群集組成を 変化させることと同様に,その化石である石灰質ナンノ化 石も群集組成や形態の変化には多くの原因が考えられる. 本論では,Discoasterの産出量やコッコリスのサイズなど が示す変化を水塊構造の変遷と関連させ議論した.水塊構 造の変化は水温変動とも密接に関連しており,石灰質ナン ノ化石群集解析は,詳細な古海洋環境の変遷をより具体的 に復元できる可能性を示唆していることになる.

# おわりに

本論では Margalef (1978) および Falkowsky *et al.* (2004)の海洋表層の撹拌とそれによる富栄養化の概念 に基づいて,第三紀石灰質ナンノ化石群集変化の原因を *Discoaster*の産出量とコッコリスのサイズ変化から解釈を 試みた.その結果,*Discoaster*の産出量変動は,Wei and Wise (1990)やAubry(1992)が指摘したごとく,水温変動 を直接示唆しておらず,コッコリスのサイズと同様に海洋

#### 佐藤時幸・千代延 俊



図 6. インド洋 Hole731A の中新世における Reticulofenestra 属と Coccolithus 属の最大サイズと Discoaster の相対頻度変化

表層の成層化と関連する古海洋環境とその海洋構造の変 遷を示している.すなわち,石灰質ナンノ化石のサイズ, 生産量,上部/下部透光帯種の産出量などに基づく群集解 析から,水温変動とも密接に関係する水塊構造の変遷を詳 細に復元できる可能性を示唆している.

#### 謝辞

本論は、2008 年東北大学で開催された古生物学会シン ポジウムで講演した内容を一部修正してまとめたもので ある. 査読者の東北大学鈴木紀毅博士および1名の匿名査 読者から有益な御助言を頂いた.ここに記して感謝する. 研究に際し、日本学術振興会の科学基盤研究(B)(課題 番号19340155,代表:佐藤時幸)および基盤研究(A)(課 題番号17204043,代表:尾田太良)の一部を使用した.また、 研究試料には Ocean Drilling Program の試料を使用した.

#### 文献

- Aubry, M-P., 1992. Late Paleogene calcareous nannoplankton evolution: a tale of climate deterioration. *In* Prothero, D. R. and Berggren, W. A., *eds.*, Eocene-Oligocene Climatic and Biotic Evolution, 272-309, Princeton Univ. Press, New Jersey.
- Backman, J. and Hermelin, J. O. R., 1986. Morphometry of the Eocene nannofossil Reticulofenestra umbilicus lineage and its biochronological consequences. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 57, 103-116.
- Boeckel, B., Baumann, K-H., Henrich, R. and Kinkel, H., 2006.

Coccolith distribution patterns in South Atlantic and Southern Ocean surface sediments in relation to environmental gradients. *Deep-Sea Research I*, **53**, 1073-1099.

- Bown, P., Lees, J. A. and Young, J. R., 2004. Calcareous nannoplankton evolution and diversity through time. In Thierstein, H. R. and Young, J. R., eds., Coccolithophores from Molecular Processes to Global Impact, 481-508, Springer.
- Bukry, D., 1973. Coccolith and silicoflagellate stratigraphy, Tasman Seaand South eastern Pacific Ocean, Deep Sea Drilling Project Leg 21. In Burns, R. E., Andrew, J. E., et al., eds. Initial Reports of Deep Sea Drilling Project, 21, 885-893, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Chiyonobu, S., Sato, T., Narikiyo, R. and Yamasaki, M., 2006. Floral changes in calcareous nannofossils and their paleoceanographic significance in the equatorial Pacific Ocean during the last 500 000 years. *Island Arc*, **15**, 476-482.
- 千代延 俊・奥山貴夫・佐藤時幸,2000. 群馬県富岡地域 に 分布 する中新統富岡層群の石灰質ナンノ化石層序および西黒沢期古海 洋.石油技術協会春季講演会要旨集,60,石油技術協会.
- Falkowsky G. P., Schofield, O., Katz, M. E., Van de Schootbrugge, B. and Knoll, A. H., 2004. Why is land green and the ocean red? In Thierstein, H. R. and Young, J. R., eds., Coccolithophores from Molecular Processes to Global Impact, 429-453, Springer.
- Hagino, K. and Okada, H., 2000. Spatial dynamics of coccolithophore assemblages in the equatroial western-central Pacific Ocean. *Marine Micropaleontology*, **39**, 53-72.
- Henderiks, J. and Pagani, M., 2008. Coccolithophore cell size and the Paleogene decline in atmospheric CO<sub>2</sub>. *Earth and Planetary Science Letters*, **269**, 576-584.
- Margalef, R., 1978. Lifeforms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanologica Acta*, 1, 493-509.
- Sato, T., Saito, T., Yuguchi, S., Nakagawa, H., Kameo, K. and Takayama, T., 2002. Late Pliocene calcareous nannofossil

paleobiogeography of the Pacific Ocean : Evidence for glaciation at 2.75Ma. *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*, **19**, 175-189.

- 佐藤時幸・馬場 敬・大口健志・高山俊昭, 1996. 日本海側におけ る海成下部中新統の発見と東北日本の台島期-西黒沢期の環境変 動. 石油技術協会誌, 56, 263-279.
- 佐藤時幸・高山俊昭・加藤道雄・工藤哲朗・亀尾浩司,1988.日本 海側に発達する最上部新生界の石灰質微化石層序,その4:総括— 太平洋側および鮮新統/更新統境界の模式地との対比.石油技術 協会誌,53,475-491.
- Schmidt, D. N., Lazarus, D., Young, J. R. and Kucera, M., 2006. Biogeography and evolution of body size in marine plankton. *Earth-Science Reviews*, 78, 239-266.
- Stoll, H. M., Shimizu, N., Archer, D. and Ziveri, P., 2007. Coccolithophore productivity response to greenhouse event of the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Earth and Planetary Science Letters*, 258, 192-206.

- Takahashi, K. and Okada, H., 2001. The paleoceanography for the last 30,000 years in the southeastern Indian Ocean by means of calcareous nannofossil. *Marine Micropaleontology*, 40, 83-103.
- Wei, W. and Wise, S. W. Jr., 1990. Biogeographic gradients of middle Eocene-Oligocene calcareous nannoplankton in the South Atlantic Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 79, 29-61.
- Young, J. R., 1990. Size variation of Neogene Reticulofenestra coccoliths from Indian Ocean DSDP Cores. Journal of Micropalaeontology, 9, 71-86.
- Young, J. R., 1994. Functions of coccolith. In Winter, A. and Siesser, W., eds., Coccolithophores, 63–83. Cambridge University Press, New York.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E. and Billupt, K., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to Present. *Science*, **292**, 686-693.

