

石灰質ナンノ化石群集からみた北極海および北半球中—高緯度海域の後期鮮新世寒冷化

佐藤時幸

秋田大学工学資源学部地球資源学科

Late Pliocene climate change in the middle to high latitude region of northern hemisphere as seen from calcareous nannofossil assemblages

Tokiyuki Sato

Institute of Applied Earth Sciences, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University, Tegata-Gakuencho 1-1, Akita, 010-8502 (toki@keigo.mine.akita-u.ac.jp)

Abstract. I reconstruct the late Pliocene to Quaternary paleoceanography of the north Pacific, Arctic, and north Atlantic Ocean based on geographical distribution of cold water nannofossil *Coccolithus pelagicus* (Wallich) Schiller. Since the species drastically increased at 2.75 Ma in the Arctic Ocean and high latitude regions of western marginal sea of both Pacific and Atlantic Oceans, it decreased at the central to eastern north Atlantic Ocean at 2.9-2.8 Ma just before 2.75 Ma event. This indicates that strengthening of north Atlantic thermohaline circulation just before 2.75 Ma induced an intensified moisture supply to northern high latitude, and resulted in drastically increase of Northern Hemisphere glaciation at 2.75 Ma. Although the abundance of *C. pelagicus* in the central to eastern north Atlantic Ocean is low until 2.38 Ma, it suddenly increased just after the time. The same characteristics are also found in the middle latitude region of eastern Pacific Ocean at that time. These results indicate that the influence of the late Pliocene glaciation increased in two steps at 2.75 Ma and 2.38 Ma in the Northern Hemisphere.

Key words: nannofossil, Late Pliocene, climate, Paleoceanography

はじめに

ミランコヴィッチサイクルなどで代表される極地域の氷床変化が，地球環境に大きな影響を与えてきたことは広く知られているが，極地域の環境変動がどのような過程を経て他地域に影響を与えたのか，また，そのシステムなどの問題は未だ十分に解明されておらず，様々な観点から研究が進められてきている（例えば Crowley, 1996; Raymo *et al.*, 1997; Stocker, 2000）。

後期鮮新世初めの約 2.75 Ma に発生した北極海域の急激な氷床拡大は，新生代後期の極めて大きな環境変動として注目され，パナマ地峡の成立と関連づけて議論されてきている（例えば Sato *et al.*, 2004）。著者は，これまで北極海，北大西洋，および北太平洋で採取された深海底コアの石灰質ナンノ化石群集解析から鮮新世以降の中—高緯度海域の石灰質ナンノ化石生物地理変化について検討を行ってきた（Sato *et al.*, 2002, 2004）。その中で 2.75 Ma における環境変動が石灰質ナンノ化石生物地理に大きな影響を与えた事を指摘したが，その変動様式までは言及せずに至っている。

著者は，寒流系石灰質ナンノ化石種 *Coccolithus pelagicus*

の分布様式の変化を北極海を含む北半球中—高緯度海域で検討を行った。その結果，2.75 Ma に発生した極地域の氷床拡大（Thiede and Myhre, 1996; Sato and Kameo, 1996）と中—高緯度海域の環境変動様式との関係に新知見を得た。本稿ではその内，石灰質ナンノ化石群集から推定される環境変動の伝搬様式について議論する。

調査試料

本研究では，カムチャッカ半島からアラスカ沖を含む中—高緯度太平洋海域の 11 地点，ノルウェー—グリーンランド海域から北極海の 4 地点，北大西洋海域からの 4 地点の合計 19 地点の ODP 試料，秋田県峰浜および五城目地域，富山県灘浦地域，沖縄県宮古島地域の地表試料，および常磐沖石油坑井試料で検討を行った（図 1）。調査結果の一部はすでに Sato and Kameo (1996), Sato *et al.* (1998, 2002, 2004), 亀尾・佐藤 (1999), 佐藤ほか (2003), 高山ほか (1988), および Sato *et al.* (2002) で報告したが，本報告では，秋田県峰浜地域，五城目地域，中部太平洋に位置する Hole 782A, 1010A の調査結果と，Gartner and Shyu (1996) によるニュージャージー沖，905 地点のデー

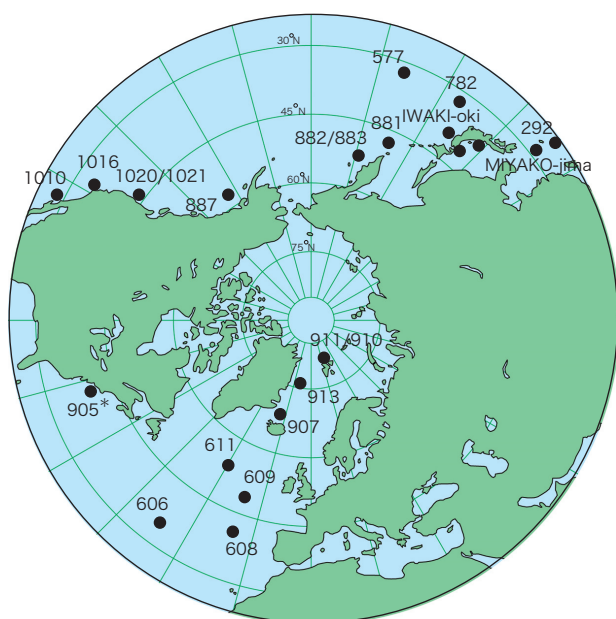


図1. 調査試料の採集地点. Site 905 は Gartner and Shyu (1996) のデータによる.

タを加え、古海洋変動システムの総合的な検討を行った。

Coccolithus pelagicus (Wallich) Schiller の形態と分類

Coccolithus pelagicus は典型的な寒流系種として考えられてきた (例えば Samtleben *et al.*, 1995; Roth, 1994). しかし、同種の発生は暁新世初めの赤道域であり (Haq and Lohmann, 1976), 現在のように高緯度海域での多産が特徴的となったのは新第三紀になってからである (Haq, 1980). 近年、イベリア半島沖の湧昇流海域でも比較的大型の *Coccolithus pelagicus* が生息する事が報告された (Cachao and Moita, 2000) ことから、*C. pelagicus* はこれら生息環境と長径サイズに注目して、長径が 10 ミクロンより小さな *C. pelagicus pelagicus* とそれより大きい *C. pelagicus braarudi* の 2 亜種で議論されるようになった (Baumann *et al.*, 2000; Geisen *et al.*, 2002; Narciso *et al.*, 2006).

このように、新たにイベリア半島沖の湧昇流海域に大型の *C. pelagicus braarudi* が報告されたが、問題は同亜種がどの時代にその生態を獲得したかであろう。しかし、Sato *et al.* (2004) によると、*C. pelagicus* は前期鮮新世末から第四紀にかけての期間、主に中・高緯度海域で多産し、寒流系種の典型的特徴を持っており、本稿で対象とする時代においては *C. pelagicus* を寒流系集として一括し議論する事に大きな問題はないと考えられる。なお、本種の生態変化や分類学的問題は別途議論を行うことにする。

各海域における *Coccolithus pelagicus* の 産出量変化

調査はいずれも下部鮮新統上部から第四系までを対象に行い、各セクションの地質年代を Sato *et al.* (1992), および佐藤ほか (1999) の石灰質ナノ化石対比基準面から決定した。それと平行し、*Florisphaera profunda* を除いた石灰質ナノ化石 500 個体中に占める *Coccolithus pelagicus* の個体数を求め、同種の層位的変化を検討した (図 2, 3)。

北大西洋～北極海

北緯 37° から 53° 間の中緯度大西洋海域に位置する DSDP Hole 606 と 608 では *C. pelagicus* の産出個体数は少ない (図 2)。北緯 37° の中央大西洋に位置する Hole 606 では、上部鮮新統の 3.4 Ma から 2.0 Ma 間で 15 個体前後、多い時に 25 個体近く産するが、下部鮮新統上部から上部鮮新統最下部の間で 10 個体以下、第四系ではほとんど産しない。同様に、やや北に位置する Hole 608 では上部鮮新統の 3.4 Ma から 2.0 Ma 間で 30 個体前後産するのに対し、下部鮮新統上部から上部鮮新統最下部の間で 10 個体前後、第四系では最上部で 20 個体であるのを除けばほとんど産しない (図 2)。

これに対し、北緯 50° の東大西洋に位置する Hole 609 では下部鮮新統から上部鮮新統の 2.8 Ma 間で 50 個体から 70 個体産するのに対し、上部鮮新統の 2.8 Ma から 2.38 Ma 間では 10 個体前後と急激に減少する。しかし、上部鮮新統上部から最下部更新統の 2.38 Ma から 1.3 Ma 間では 10 個体から 100 個体以上の間を繰り返し大きく変動する。その上位の第四系はほとんど産しないか、多くても 20 個体前後と少ない。Hole 609 の北側で北緯 53° の中央北大西洋に位置する Hole 611 では、下部鮮新統から上部鮮新統の 2.9 Ma 間で 50 個体から 100 個体前後、上部鮮新統の 2.9 Ma から 2.38 Ma 間では 50 個体前後へと減少する。しかし、上部鮮新統上部から最下部更新統の 2.38 Ma から 1.3 Ma 間では 20 個体から 200 個体以上の間を大きな変動幅で細かく変化する。その上位の第四系は、更新統中部で 100 個体を越えるのを除けば、ほとんど産しない (図 2)。

アイスランドの北方、ノルウェーグリーンランド海に位置する Hole 907A では第四系上部の 1 試料にわずかの *C. pelagicus* と *Gephyrocapsa oceanica*, *G. parallela* などが、上部鮮新統の 1 試料で *C. pelagicus* が多産するのみである。同じ海域の Hole 913A では、数試料にわずかの石灰質ナノ化石個体を認めたにすぎず、ほぼ無化石である。

一方、北極海の Yermak 海台南部に位置する Hole 910C と 911A では、石灰質ナノ化石の産出個体数が少なく正確な定量は出来なかったものの、いずれも 2.75 Ma を境に下位で *Reticulofenestra* spp. (small) を主体に *C. pelagicus* をわずかに伴うのに対し、上位では無化石か

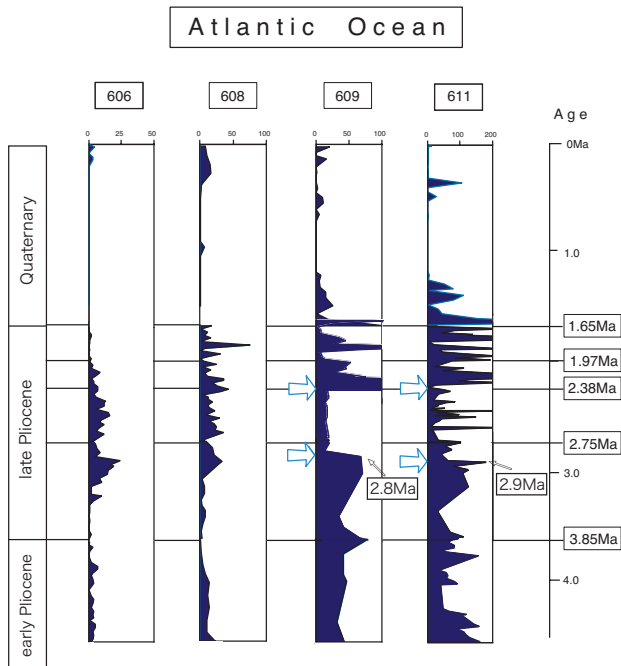


図 2. 大西洋海域、深海底コア各試料の石灰質ナノ化石 500 個体中に含まれる *Coccolithus pelagicus* の個体数変化。図中の矢印は *C. pelagicus* の減少および増加層準を示す。

C. pelagicus のみの群集で特徴づけられる (Sato and Kameo, 1996)。なお、北西大西洋のニュージャージー沖で掘削された Hole 905A では (Gartner and Shyu, 1996)、2.75 Ma (*Discoaster tamalis* の産出上限) 付近を境に上位で *C. pelagicus* が 90% 以上を占める最優占種となる。

本邦および北太平洋海域

千島列島からアラスカ沖に至る高緯度太平洋海域の地点では、高緯度海域に特徴的な多様性の低い群集組成を示す。カムチャッカ半島沖の Hole 883C およびアラスカ沖 Hole 887A では、*C. pelagicus* の産出個体数は 2.75 Ma 以前で 50 個体前後であるのに対し、以後は Hole 887A ではほぼ 100% の 500 個体近く、Hole 883C で常に 250 個体以上を占める最優占種となる (図 3)。第四系も同様にいくつかの無化石層準を挟みながら多産する特徴を持つ。カムチャッカ半島沖の Hole 882A でも、2.75 Ma 以前で *C. pelagicus* は 100 個体以下であったのに対し、2.75 Ma 以後増加へと転じる。しかし、その変化は他の海域に比べ緩やかで、2.75 Ma で 250 個体へ増加した後、2.38 Ma までの間に 350 個体前後へと一段と増加する。千島列島北部の Holes 881B, D では上部鮮新統下部と第四系上部の一部層準に石灰質ナノ化石が産出するが、他の層準では全く認められなかった。

一方、カリフォルニア沖の Hole 1020C では (図 3)、*C. pelagicus* の個体数は 2.75 Ma 以前では 10 個体前後で推移するのに対し、2.75 Ma 以降では他の海域と同様に多産するようになる。ただし、本 Hole では 10 個体と 100 個

体以上の大きな変動幅で変動する特徴を持つ。第四紀初めの 1.65 Ma から 0.8 Ma 間では 10 個体前後に減少し安定するが、その上位の 0.5 Ma までの層準は無化石層準を頻繁に挟在する。より南方の東太平洋に位置する Hole 1016A は (図 3)、下部鮮新統から上部鮮新統下部の 2.38 Ma までは 20 個体以下で少ないものの、それより上位、1.2 Ma までの間では 20 から 100 個体以上の間を、細かく変動する。それより上位では無化石層準を頻繁に挟みながら 20 個体前後の産出となる。同じく東太平洋で Hole 1016A のさらに南、北緯 30 度に位置する Hole 1010C では、全層準で 10 個体前後と *C. pelagicus* の産出が極めて少ないが、2.38 Ma 付近でのみ 100 個体前後に急増する。

本邦では、日本海側の秋田県峰浜地域および五城目地域 (図 3) および北陸地域 (高山ほか, 1988) の群集が北極海域や北太平洋高緯度海域と極めて類似する。すなわち、群集は単調な群集で構成されるだけでなく、2.75 Ma を境に *Reticulofenestra* spp. (small) 群集から *C. pelagicus* 群集への特徴的な変化を示し (佐藤ほか, 2003; Sato et al., 1998, 2002)、特に 2.75 Ma 以降の *C. pelagicus* の産出割合は峰浜地域、五城目地域いずれも全体の 60 ~ 90 % を占める特徴を持つ。これに対し、太平洋側の磐城沖坑井では (図 3)、*C. pelagicus* の産出量に際立った変化は認められない。本邦の南西端に位置する宮古島海域は、現在黒潮の影響下にある典型的な温暖な海域である。この地域の 2.75 Ma 以前では暖海の指標種である *Discoaster* 属を多産するが、2.75 Ma 以降の上部鮮新統では、*Discoaster* 属はほとんど産しなくなると同時に *C. pelagicus* が急増し、多いところでは 100 個体近くを占める (図 3; Sato et al., 2002)。

中部太平洋海域、北緯 30° および 32° に位置する Hole 782A と 577A では、*C. pelagicus* はほとんど認められず、いずれも 10 個体から 20 個体の間を変動する程度で、後期鮮新世を通じて大きな変化は認められない。

考察

Coccolithus pelagicus の時空分布様式からみた後期鮮新世の寒冷化の進行

これまで述べた各海域における *C. pelagicus* の時空分布を、北極海を中心に見てみる。図 4 に示した如く、*C. pelagicus* 産出量の層位変化は北太平洋、北大西洋いずれも海域によって異なっている。すなわち、北極海域の Holes 910A, C, 911A と同様に、極の氷床拡大時期の 2.75 Ma を境に *C. pelagicus* 卓越群集へと変化するの、北太平洋のアラスカおよびカムチャッカ半島沖の Hole 887A と Hole 883C、日本海側の秋田と北陸地域、および北大西洋の Hole 905A である。同様のタイミングで *C. pelagicus* の割合が急増する特徴を持つのが北太平洋の Hole 1020C と Hole 882A、中緯度太平洋海域に位置する宮古島である。逆に、北大西洋の Site 609 と 611 ではそれぞれ 2.9 Ma および 2.8 Ma に *C. pelagicus* の割合が急減する。

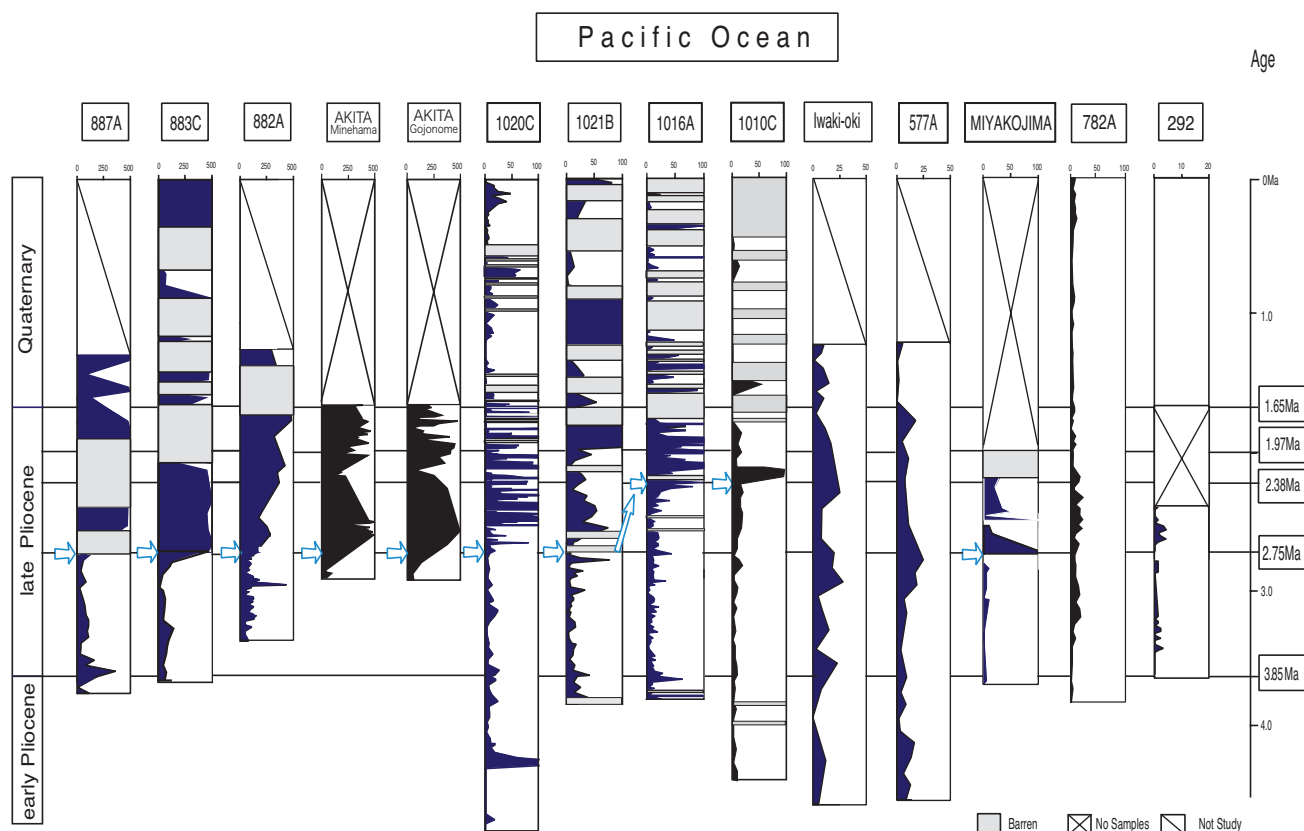


図3. 太平洋海域、地表、石油坑井、および深海底コア、各試料の石灰質ナノ化石 500 個体中に含まれる *Coccolithus pelagicus* の個体数変化。図中の矢印は *C. pelagicus* の増加層準を示す。

一方、これらの地域にやや遅れて 2.38 Ma に *C. pelagicus* の急増が認められるのは、中緯度東太平洋に位置する Hole 1016A、および北大西洋海域の Hole 609 と 611 であり、Hole 609 と 611 は 2.9 Ma または 2.8 Ma に一旦減少した後で急増する特徴を持つ。

このように *C. pelagicus* 産出個体数の変動が顕著な海域に対し、ノルウェー—グリーンランド海の Hole 907A と 913A, B、北西太平洋千島列島沿いの Hole 881B, D では石灰質ナノ化石がほとんど産しない。一方、中緯度太平洋海域の 577A, 782A, 292B および中緯度大西洋の Hole 606 と 608 では後期鮮新世を通じて顕著な群集変化は認められず、暖海種が比較的多い群集組成のままである。唯一、中緯度東太平洋の Hole 1010C では 2.38 Ma 層準で *C. pelagicus* の急増が認められたが、それ以外の層準では大きな増加は認められない。

このような *C. pelagicus* の産出量変化を北極を中心に見てみると、2.75 Ma での急激な変動があるのは大西洋、太平洋いずれも高緯度海域か、日本海を含む大洋の西側縁海域であり（図4）、中緯度東側縁海域は 2.38 Ma に至るまで認められない。このことは、後述の 2.75 Ma における極における氷床の拡大（Thiede and Myhre, 1996 など）の影響が、極を中心に高緯度から中—高緯度西側縁海域に及んだが、中緯度東部縁海域への影響は、やや遅れて 2.38 Ma で発生しことを示唆している（図5）。しかし、

本邦の日本海側地域を除く太平洋側磐城地域以南、中央から東大西洋の北緯 50° 以南では全く変化せず、極地域の寒冷化の影響を全く被らなかったことを示している（図5）。

後期鮮新世 2.75 Ma を境とした環境変動の原因と伝達様式

鮮新世中期の環境変動は、Keller (1979) を初めとして様々な観点から検討されてきた。とくに 1980 年代後半以降、酸素同位体比や堆積物中の IRD (ice rafted debris) 量変化から、後期鮮新世初めの温暖化（Gladenkov *et al.*, 1991; Dowsett *et al.*, 1996; Crowley 1996; Raymo *et al.*, 1996 など）とそれに引き続く急激な寒冷化（Jansen *et al.*, 1988; Whitman and Berger, 1992; Rea *et al.*, 1995; Thiede and Myhre, 1996; Sato and Kameo, 1996; Sato *et al.*, 2002, 2004; Bartoli *et al.*, 2005 など）が大きな事件として注目されている。前者の温暖化は北半球で現在よりも水温が 3℃ 以上高かったと言われるが、原因の一つとしてあげられている二酸化炭素濃度変化は、その濃度変化から見て温暖化に寄与したとは考えにくいと言われている（Crowley, 1996; Raymo *et al.*, 1996）。

このような温暖化とそれに引き続く急激な寒冷化の原因は、パナマ地峡の成立と密接に関連することが指摘されている（Haug and Tiedmann, 1998; Sato *et al.*, 2004; Bartoli *et al.*, 2005 など）。すなわち、パナマ地峡の成立によって分断された大西洋の暖流は大西洋を北上し、高緯度海域の熱塩循

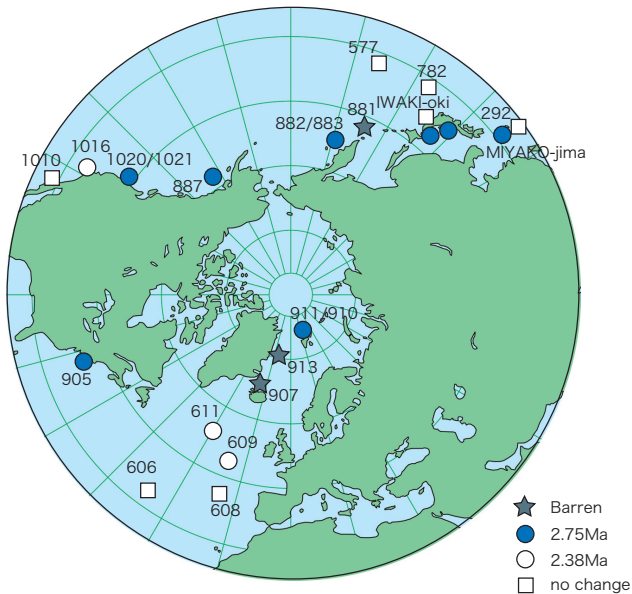


図4. 各調査地点における寒流系種 *Coccolithus pelagicus* の増加時期。図では増加時期を記号で記している。☆：無化石，●：2.75 Ma での増加，○：2.38 Ma での増加，□：変化なし

環を活性化させた。これによって北極氷床の溶解とアルベドの縮小を招き、現在よりも3℃以上も高い温暖化を導いた (Crowley, 1996)。しかし、暖流の極地域への北上は極への水分供給を促進したことから、引き続く北極域での急激な氷床拡大を招いた (Bartoli *et al.*, 2005)。とくに Bartoli *et al.* (2005) は、最も熱塩循環が強かったのが 2.95 Ma から 2.82 Ma の間で、それが2℃から3℃の水温上昇を招いたと推定している。

ここで改めて今回の調査結果から鮮新世の環境変動を考察する。2.75 Ma に発生した極地域における氷床拡大の影響海域は、太平洋、大西洋いずれも高緯度ないし中緯度西側縁海域である (図5)。大西洋における東側海域は、むしろ 2.9 Ma または 2.8 Ma における *C. pelagicus* の急減で特徴づけられ、その後の 2.38 Ma まで継続する (図5)。これは、この間にメキシコ湾からの暖流が北大西洋東側のイギリス、スカンジナビア半島沿いに北上したため (Sato *et al.*, 1998)、その通路にあたる北東大西洋海域は熱の供給を被った。すなわち、北大西洋海域を経由した暖流の極への北上は 2.9 Ma から 2.8 Ma の間に始まり、それによる水分の供給から 2.75 Ma に極の氷床拡大を招いたが、暖流の北上は 2.38 Ma 付近まで継続したことを示唆する。しかし、暖流北上の継続による水分の供給は、2.38 Ma を境にしたより急激な寒冷化を招き、結果として暖流の北上が停止した。すなわち、極地域への熱塩循環による水分の供給は、Bartoli *et al.* (2005) が指摘したような 2.95 Ma から 2.82 Ma の短期間で終了したわけではなく、むしろ 2.38 Ma まで継続した。また、2.38 Ma での暖流の北上の停止 (図5) は氷床拡大の最大期を迎え、寒冷化の影響は中緯度東側縁海域まで広がったことを示す。

本邦の鮮新世環境変動

本邦における鮮新世の環境変動は、Kitamura and Kimoto (2006) のように、後期鮮新世の 3.5 Ma 以降 1.9 Ma まで5回にわたって対馬海流が断続的に日本海へ流入したと推定する報告もあるが、多くの地域では 2.75 Ma を境に急激な寒冷化と浅海化が発生したことが認められている (Sato and Kameo, 1996; Sato *et al.*, 2002, 2004; 佐藤ほか, 2003; Cronin *et al.*, 1994; Yamada *et al.*, 2005)。また、貝化石はこの時期を境に中新世型の残存種が消滅し、新たな寒流系種が出現した (天野, 2001)。このような日本海側地域に見られる寒冷化は、2.75 Ma に発生した極地域の急激な氷床拡大の影響を直接受けたことが明らかで、結果として各地域の浅海化を招いた (佐藤ほか, 2003)。

本邦日本海側地域の鮮新世石灰質ナンノ化石群集は、その種構成や 2.75 Ma を境とした群集変化においてアリューシャン海域および北極海域と極めて強い類似性を示し、同一の生物地理区に含まれる (Sato *et al.*, 2002)。一方、太平洋側では房総半島南部地域 (亀尾ほか, 2003) や宮古島地域などの一部地域で寒冷化の影響が認められるものの、磐城沖や 782, 577 地点など多くの地域では、本論で指摘したような中—高緯度海域にみられる 2.75 Ma を境とした群集変化は生じていない (図5)。

これらの結果は、新生代の中でも特に注目される北極海域の急激な氷床拡大の影響が地球の広範囲に及んだわけではなく、高緯度海域から中緯度西側縁海域に限られたこと、中緯度東側縁海域はやや遅れて 2.38 Ma で影響が現れるものの、日本海側地域を除く北緯 40° 以南の海域では全く影響を受けていないことを示唆する。

おわりに

本稿では石灰質ナンノ化石の中でも典型的寒流系種である *Coccolithus pelagicus* の鮮新世から第四紀における分布様式を、北極から高緯度大西洋—太平洋海域で検討した。群集変化は、後期鮮新世の特徴的温暖化に引き続く 2.75 Ma と 2.38 Ma の2段階での寒冷化を詳細に示しているばかりでなく、環境崩壊の伝達様式とその影響海域に大きな差があることを示している。これらの結果は、新生代後期の大きな事件である北極海域の急激な氷床拡大においても、その環境変動の影響が必ずしも広範囲に及んでいないこと、およびその伝達様式に地域差があることを示している。

ところで、近年ミランコビッチサイクルとは別に低—中緯度を中心としたモンスーン地域特有の環境変動サイクルが指摘されている。このことは、低—中緯度地域の環境変動をミランコビッチサイクルなどの「極の環境変動周期」にともすれば直接対比しがちな傾向に対し、慎重であるべきことを示唆している。すなわち、各地域の環境変動解明には、発生した環境変動の起源とその影響範囲および伝達

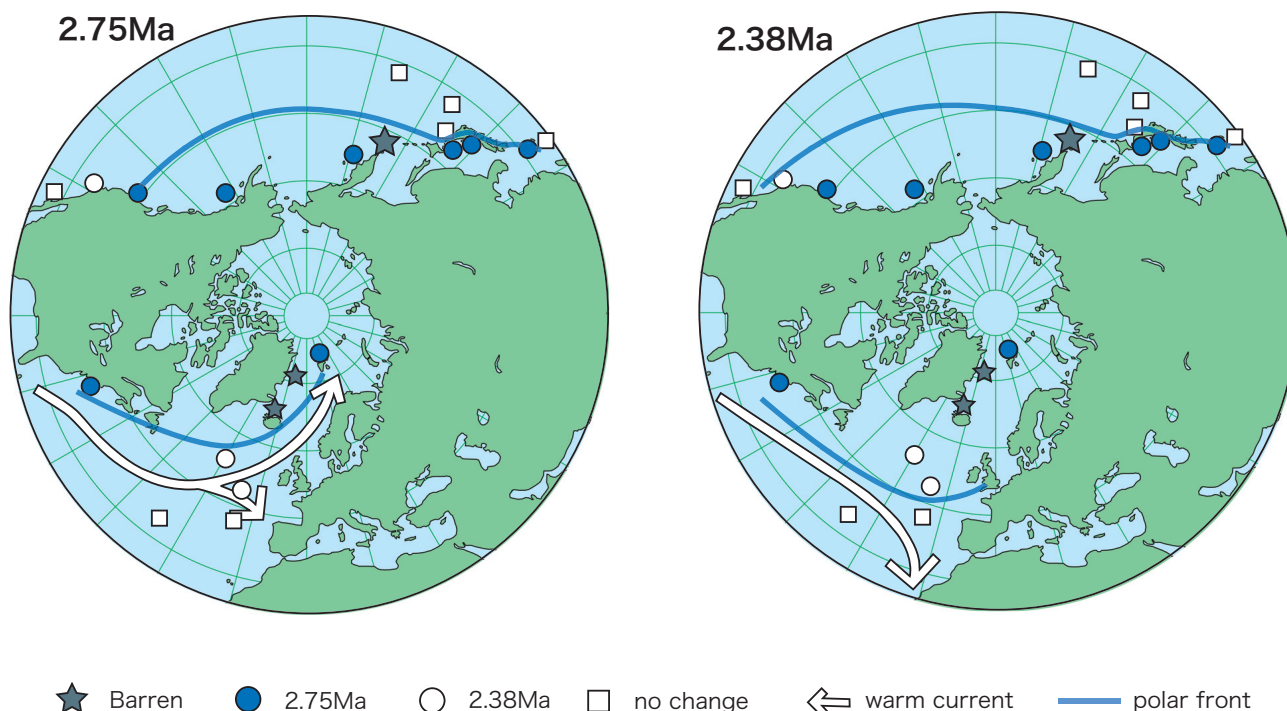


図5. *Coccolithus pelagicus* の個体数変化から見た 2.75Ma および 2.38 Ma における寒冷化影響地域（極前線）の拡大様式と北大西洋における暖流の流路変化。記号は図4に同じ。

様式の解明が必要である事を示している。

謝辞

本論文は、2006 年島根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まとめたものである。シンポジウムを企画された上越教育大学天野和孝博士に深く感謝する。また、査読者の千葉大学亀尾浩司博士および 1 名の匿名査読者からは有益な御助言を頂いた。記して感謝する。

文献

- 天野和孝, 2001. 日本海側における鮮新世の軟体動物群と古海況. 生物科学, **53**, 178-184.
- Bartoli, G., Sarnthein, M., Weinelt, M., Erlenkeuser, H., Garbeschönberg, D., and Lea, D. W., 2005. Final closure of Panama and the onset of northern hemisphere glaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, **237**, 33-44.
- Baumann, K.-H., Young, J. R., Cachao, M., and Ziveri, P., 2000. Biometric study of *Coccolithus pelagicus* and its paleoenvironmental utility. *Journal of Nannoplankton Research*, **22**, 82.
- Cachao, M. and Moita, M.T., 2000. *Coccolithus pelagicus*, a productivity proxy related to moderate fronts off Western Iberia. *Marine Micropaleontology*, **39**, 131-155.
- Cronin, T. M., Kitamura, A., Ikeya, N., Watanabe, M., and Kamiya, T., 1994. Late Pliocene climate change 3.4-2.3Ma: paleoceanographic record from the Yabuta Formation, Sea of Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **108**, 437-455.
- Crowley, T. J., 1996. Pliocene climate: The nature of the problem. *Marine Micropaleontology*, **27**, 3-12.
- Dowsett, H., Barron, J., and Poore, R., 1996. Middle Pliocene sea surface temperatures: a global reconstruction. *Marine Micropaleontology*, **27**, 13-25.
- Gartner S. and Shyu, J. -P. 1996. Aspects of calcareous nannofossil biostratigraphy and abundance in the Pliocene and late Miocene of Site 905. In Mountains et al. (eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **150**, 53-62 College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Geisen, M., Billard, C., Broerse, A. T. C., Cros, L., Probert, I., and Young, J. R., 2002. Life-cycle associations involving pairs of holococcolithophorid species: intraspecific variation or cryptic speciation? *European Journal of Phycology*, **37**, 531-550.
- Gladenkov, Y. B., Barinov, K. B., Basilian, A. E., and Cronin, T. M., 1991. Stratigraphy and Paleocyanography of Pliocene deposits of Karaginsky Island, eastern Kamchatka, U. S. S. R. *Quaternary Science Reviews*, **10**, 239-245.
- Haq, B. U., 1980. Biogeographic history of Miocene calcareous nannoplankton and paleoceanography of the Atlantic Ocean. *Micropaleontology*, **26**, 414-443.
- Haq, B. U. and Lohmann, G. P., 1976. Early Cenozoic calcareous nannoplankton biogeography of the Atlantic Ocean. *Marine Micropaleontology*, **1**, 119-194.
- Haug, G. H. and Tiedmann, R., 1998. Effect of the formation of the Isthmus of Panama on Atlantic Ocean thermohaline circulation, *Nature*, **393**, 673-676.
- Jansen, E., Bleil, U., Henrich, R., Kringstad, L. and Slettemark, B., 1988. Paleoenvironmental changes in the Norwegian Sea and the Northeast Atlantic during the last 2.8 m.y.: Deep Sea Drilling Project / Ocean Drilling Program Sites 610, 642, 643 and 644. *Paleoceanography*, **3**, 563-581.
- 亀尾浩司・斎藤敬二・小竹信宏・岡田 誠, 2003. 房総半島南端, 千倉層群下部の石灰質ナンノ化石に基づく本邦中部太平洋側の後期鮮新世表層海洋環境. 地質学雑誌, **109**, 478-488.
- 亀尾浩司・佐藤時幸, 1999. 石灰質ナンノ化石層序の最近の知見とその応用—とくに常磐海域坑井の新第三系・第四系層序について—.

- 石油技術協会誌, **64**, 16-27.
- Keller, G., 1979. Late Neogene planktonic foraminiferal biostratigraphy and paleoceanography of the northwest Pacific DSDP Site 296. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **27**, 129-154.
- Kitamura, A. and Kimoto, K. 2006. History of the inflow of the warm Tsushima Current into the Sea of Japan between 3.5 and 0.8Ma. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **236**, 355-366.
- Narcis, A., Cachao, M., and de Abreu, L., 2006. *Coccolithus pelagicus* subsp. *braarudii* (Coccolithophore, Haptophyta): A proxy for surface subarctic Atlantic waters off Iberia during the last 200kyr. *Marine Micropaleontology*, **59**, 15-34.
- Raymo, M. E., Grant, B., Horowitz, M., and Rau, G. H., 1996. Mid-Pliocene warmth: stronger greenhouse and stronger conveyor. *Marine Micropaleontology*, **27**, 313-326.
- Raymo, M. E., Oppo, D. W., and Curry, W., 1997. The mid-Pleistocene climate transition: A deep sea carbon isotope perspective. *Paleoceanography*, **12**, 546-559.
- Rea, D. K., Basov, I. A., Krissek, L. A. and Leg 145 Scientific party, 1995. Scientific results of drilling the north Pacific transect. In Rea, D. K., Basov, I. A., Scoll, D.W. and Allan, J. F., eds., *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **145**, 577-596 College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Roth, P. H., 1994. Distribution of coccolith in oceanic sediments. In Winter, A. and Siesser, W. G., eds., *Coccolithophores*, 199-218 Cambridge Univ. Press.
- Samtleben C., Schafer, P., Andruleit, H., Baumann, K.-H., Kohly, A., Matthiessen, J., Schroder-Ritzrau, A. and 'Synpal' Working Group, 1995. Plankton in the Norwegian- Greenland Sea : from living communities to sediment assemblages - an actualistic approach. *Geologische Rundschau*, **84**, 108-136.
- Sato, T. and Kameo, K., 1996. Pliocene to Quaternary calcareous nannofossil biostratigraphy of the Arctic Ocean, with reference to late Pliocene glaciation. In Thiede, J., Myhre, A. M., Firth, J. V., Johnson, G. L. and Tuddiman, W. F., eds., *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **151**, 39-59 College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Sato, T., Takayama, T. and Kameo, K., 1992. Coccolith biostratigraphy of the Arabian Sea. In Prell, W. L., Niitsuma, N. et al., eds., *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **117**, 37-54, College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Sato, T., Saito, T., Takahashi, H., Sato, Y., Osato, C., Goto, T., Hibino, T., Higashi, D. and Takayama, T., 1998. Preliminary report on the geographical distribution of the cold water nannofossil *Coccolithus pelagicus* (Wallich) Schiller during the Pliocene to Pleistocene. *Journal of Mining College, Akita University, Series A*, **8**, 32 - 46.
- 佐藤時幸・亀尾浩司・三田勲, 1999. 石灰質ナンノ化石による後期新生代地質年代の決定精度とテフラ層序. 地球科学, **53**, 265-274.
- 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 2.75 Ma. *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*, **19**, 175-189.
- 佐藤時幸・樋口武志・石井崇暁・湯口志穂・天野和孝・亀尾浩司, 2003. 秋田県北部に分布する上部鮮新統～最下部更新統の石灰質ナンノ化石層序ー後期鮮新世古海洋変動と関連してー. 地質学雑誌, **109**, 280-292.
- Sato, T., Yuguchi, S., Takayama, T., and Kameo, K., 2004. Drastic change of the geographical distribution of the cold water nannofossil *Coccolithus pelagicus* (Wallich) Schiller during the late Pliocene -with special reference to increase of ice sheet in the Arctic Ocean-. *Marine Micropaleontology*, **52**, 181-193.
- Stocker, T. F., 2000. Past and future reorganizations in the climate system. *Quaternary Science Reviews*, **19**, 301-319.
- 高山俊昭・加藤道雄・工藤哲朗・佐藤時幸・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2: 北陸堆積盆地. 石油技術協会誌, **53**, 9 - 27.
- Thiede, J. and Myhre, A. M., 1996. Introduction to the north Atlantic-Arctic gateways: Plate tectonic -paleo-ceanographic history and significance. In Thiede, J., Myhre, A. M., Firth, J.V. et al., eds., *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **151**, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 3-23.
- Whitman, J. M. and Berger, W. H., 1992. Pliocene-Pleistocene oxigen isotope record site 586, Ontong Java Plateau. *Marine Micropaleontology*, **18**, 171-198.
- Yamada, K., Tanaka, Y. and Irizuki, T., 2005. Paleocceanographic shifts and global events recorded in late Pliocene shallow marine deposits (2.80-2.55Ma) of the Sea of Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **220**, 255-271.

