



統合国際深海掘削計画 (IODP)
— 2003 年から 10 年の成果 —

IODP Expedition 302 Arctic Coring Expedition (ACEX)

高橋孝三

IODP Expedition 302 Arctic Coring
Expedition (ACEX)

Kozo Takahashi

たかはし こうぞう : 北星学園大学/九州大学理学研究院
地球惑星科学部門

2004 年夏 IODP Exp 302 北極掘削航海は、総延長 399 m のコアを採取し、新生代北極海環境変動の概要を解明した。それまでの温暖な中期始新世気候は寒冷化開始・海水出現を経て、中新世以降の季節海氷・多年氷時代へと変化した。しかし、未だ新生代の > 2/3 相当時間の堆積物が不整合の為に未採取で今後の課題だ。

1. はじめに

現在の北極海は、地球表面のたった 2.6% と全海水容積の 1.0% を占めるに過ぎないにも拘らず、以下の理由のため気候変動に著しく貢献している。北極海は極地に位置する為、海水の生成に伴い低温高塩分ブラインの起源水を大西洋側深層に排出し、熱塩大循環に寄与する。また、海氷上の積雪は、アルベド効果を高め太陽輻射熱を反射するため寒冷な極地気候を作り出す。また最近では、急激に地球温暖化が進み海水融解によるアルベド効果の軽減で、さらなる温暖化加速が危惧されている。この様に、北極海の重要性は計り知れない。過去を含めた北極海の全容を理解することが大切である (Backman and Moran, 2009)。

多年氷で覆われた北極海でコアを取得することは、幾多の著しい困難を伴う。よって北極海の環境変動史については、Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Arctic Coring Expedition (ACEX) 302 以前では、鮮新世から漸新世までは該当堆積物コアが無く未知であった (Backman *et al.*, 2004)。始新世の環境に関しては、1970 年頃にアルファ海嶺で流氷島上から採取されたピストンコア USGS FL-422 によるところが大きい (Clark, 1974)。当コア中の珪質鞭毛藻、エプリア類、珪藻の解析研究により当時の海洋環境情報が得られている (Bukry, 1984; Ling, 1985; Dell'agnese and Clark, 1994)。しかしながら、暁新世のロモノソフ海嶺に関しては、堆積物は存在しないものと信じられていた (Jokat *et al.*, 1995)。この様に ACEX 掘削航海以前では、新生代の 98% にあたる時代の堆積物が入手出来ておらず、環境情報については殆ど未知の状態であった (Backman and Moran, 2009)。

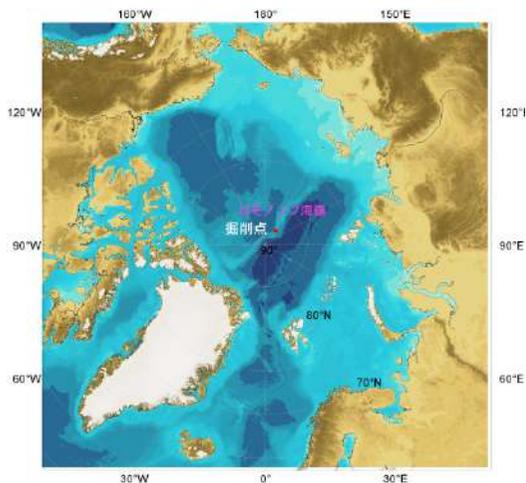


図1 北極海ロモノソフ海嶺付近の地形図と 88°N 付近の掘削点。

2. 2004年8-9月IODP ACEX 302実施

上記の背景のもとで、ODP 533 ロモノソフ海嶺掘削プロポーザルが、Backman らにより 1998 年 3 月に Ocean Drilling Program (ODP) に提出された。これを受けて ODP ではプロポーザル 533 を推進する為に、1999-2000 年に北極気候プログラム計画委員会 (APPG) を、さらに JOIDES 北極詳細計画委員会 (ADPG) を 2000-2001 年に招集し着実に準備を進めた (Backman, 2001)。これらの計画委員会には、筆者は日本代表として継続して出席する機会を得た。そして幾多の紆余曲折と地道な準備を経て、最終的には 2004 年 8-9 月白夜の中で、39 日間 3 船体制でのノルウェー・トロムソ→北極点付近→トロムソの IODP 北極掘削航海が実行された (図 1)。

ストックホルム大学 Jan Bachman 教授とロードアイランド大学 Kate Moran 博士を Co-Chief Scientists とする世界 7 か国の科学者チーム 16 名 (下記メンバーリスト参照) は、北極圏内に位置する北緯 69°41' のノルウェー・トロムソからスウェーデン・砕氷船オーデン号に乗船し、2004 年 8 月 7 日に出港した。このうち日本からは、九州大学・高橋孝三・

表 1 IODP Expedition 302 北極海掘削航海で得られたコアの概要 (Backman *et al.*, 2006)。

ホール ID	長さ(m)		回収率 (%)
	コアリング	取得	
M0002A	271.69	213.15	78.5
M0003A	15.00	14.85	99.0
M0004A	157.59	78.41	49.8
M0004B	11.00	7.31	66.5
M0004C	40.19	25.34	63.1
計	495.47	339.06	68.4

小野寺丈尚太郎、そして筑波大学・須藤斎の 3 名が乗船研究者として参加した。

オーデン号は、スウェーデン海事局 (Swedish Maritime Administration) に所属し、幾多の北極/南極遠征航海に活躍中の有能な砕氷船だ。大きさは、総トン数 9,438 GT, 108×31 m で、24,500 馬力のディーゼル発電エンジンと巨大な重油タンクを持つ。そして、北極掘削には多年氷を含む 2-3 m 氷厚の海水を、速度 3 ノットで連続砕氷出来る砕氷船が不可欠だ。75,000 馬力の原子力エンジン積載のロシア大型原子力砕氷船ソビエツキー・ソユーズ号 (23,000 GT, 148×30 m) は、この責務を見事に果たした。さらにこの航海の為、掘削船としての艤装工事が急遽施されたのは、バルト海仕様の貨物船ノルウェー/スウェーデン掘削船ビダール・ピキング号 (3,382 GT, 84×18 m) である。掘削用にムーンプールの開孔、ドリルリグ、ヘリポートの艤装を行った。3 船は 82°N の海水周縁部で集結し、ソビエツキー・ソユーズ、オーデン、ビダール・ピキング号の順に船隊を組み、海水域を 88°N のロモノソフ海嶺現場に向かった。

非常に困難と思われた前人未到の多年氷域・北極点付近のロモノソフ海嶺上での深海掘削・コアリングは、成功裡に完結した (表 1, 図 2-3)。この海域では、約 90% の海面が海水で被覆され、多年氷を含む 1-3 m 氷厚の海水が、毎時 0.3 ノットで進んでくるのを破砕しなければならない (図 3)。掘削船の位置は、掘削孔から最大でも半径 100 m 以内に保持しないと、ドリルパイプが破損

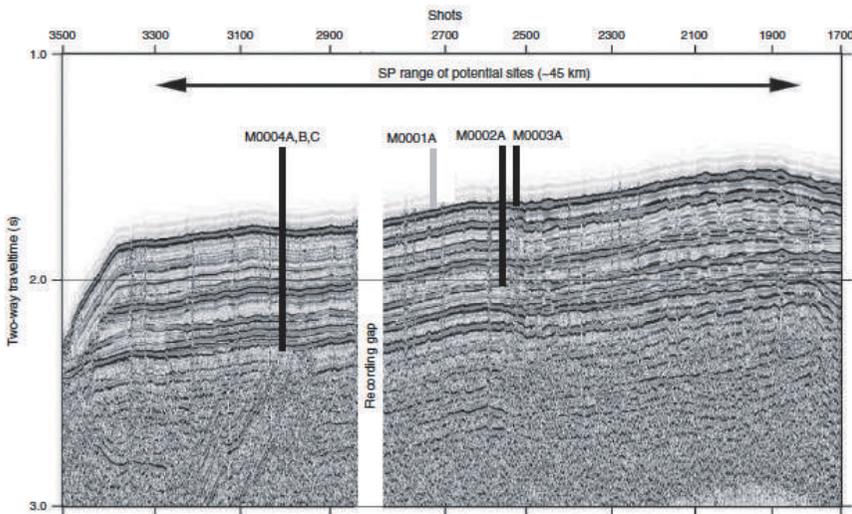


図2 ロモノソフ海嶺のマルチチャネル地震波断面図と掘削・コアリングサイト (Backman *et al.*, 2006).



図3 ACEX 北極海掘削航海中の上空よりの砕氷風景：数十枚の衛星画像集積コンポジットによる；黄色丸は左より順に、ソビエツキー・ソユーズ号、オーデン号、ビダール・ピキング号を示す。海水は、図左より右に約0.3ノットの速度で流れている (Moran *et al.*, 2006).

してしまう。このような条件下での成功の最大理由は、今までに例の無い原子力砕氷船を含む3船体制でのロジスティクス面での成功に尽きる。その中でも海水マネジメントチーム（後述のメンバーリスト参照）が果たした役割は、今 Expedition の最大のハイライトと言っても過言ではない。海水に関する海洋物理、気象、操船等のエキスパート集団の9名のチームは、衛星画像解析による海水の分布・動向の把握、ヘリコプター（オーデンに2機、ソビエツキー・ソユーズに1機艦載）による上空からの目視偵察、緊密な連絡により掘削

船周辺の適切な海水破碎を着実にこなした。適切砕氷とは、巨大（>数百m）な氷板を風上側を中心にソビエツキー・ソユーズ号が破碎し、更に下流側でオーデン号が再度破碎しより小破片にした海水がビダール・ピキング号に押し寄せる体制である。風向、水流の突然の変化により海水流向が急激に変化することもあり、砕氷は掘削船の下流側も含めて行わなければならない。過剰な海水圧力の為途中2度にわたる、掘削孔からドリルパイプ引き上げの一時的掘削中断イベントがあったものの、本航海ではサイト M0004 における連続9日間の掘削・コアリングを含む期待以上の成果を達成した (Moran *et al.*, 2006)。

掘削海域は北極点ま近の約88°N ロモノソフ海嶺上で、水深は1100から1300mまでの4サイトを掘削した（表1、図1-2）。そして、海底下層準428mまでの総延長399mのコアを取得した。殆どのコアは Extended Core Barrel (XCB) 工法で得られ、全体の平均回収率は68%であった。上記の様に期待以上の成果を出した海水マネジメントに比べ、掘削・コアリング自体は、Advanced Piston Coring (APC) 工法がうまく進まなかった事、そして回収率が低かった事を含め期待以下であった (Moran *et al.*, 2006)。

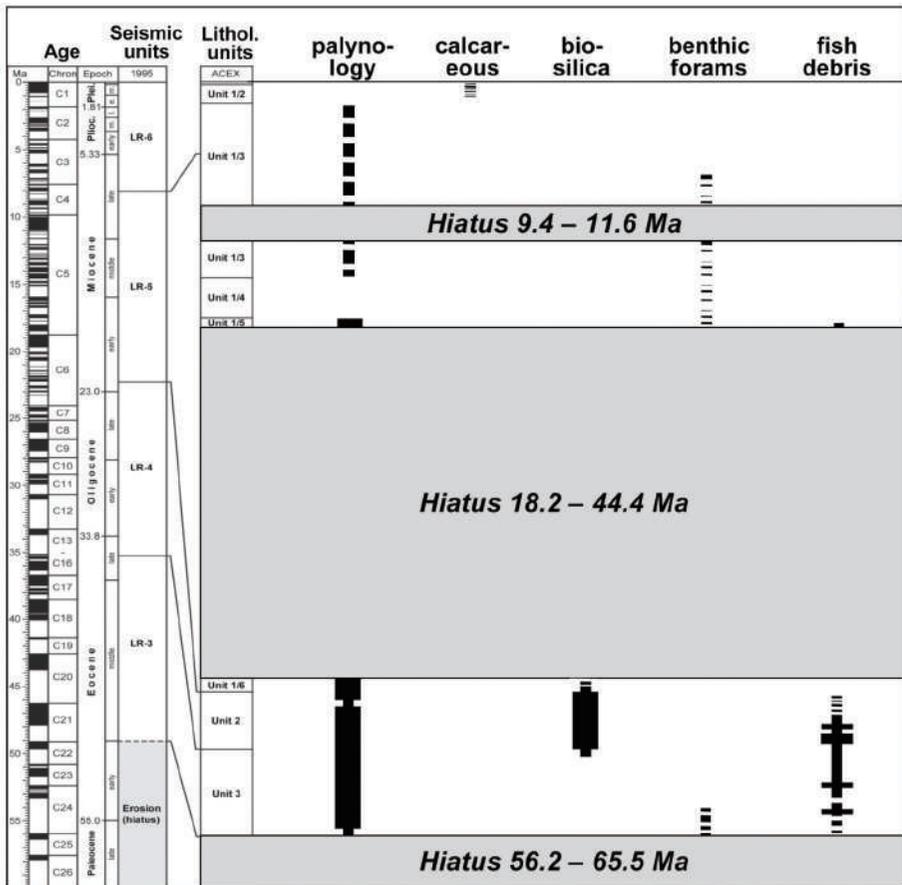


図5 新生代全体における3カ所の不整合を含む堆積層と産出化石群集 (Backman and Moran, 2009).

の微小ラミナ層を含む岩石源珪質の粘土堆積物で構成されており、渦鞭毛藻による年代は後期暁新世から前期始新世である (Sluijs *et al.*, 2008)。

Unit 2 (313.61 – 220.24 mbsf) は、泥を含む生物源珪質ウーズで珪質鞭毛藻およびエプリア類により中期始新世の年代 (Onodera and Takahashi, 2009a, b) が判明している。Unit 2 下部では、淡水性シダ類 *Azolla* を大量に含む層が見つかっている。また Unit 2 上部は、ACEX で最初に見られた Ice Rafted Debris (IRD) と砂層を含む。Unit 2 の全てと Subunit 1/6 の一部は、貧酸素状態で堆積しており、有機炭素含有量が高い。Unit 2 上部は、岩石源珪質堆積物の Unit 1 と顕著な境をなす。

Unit 1 (220.24 – 0 mbsf) は、色 縞層、砂層、IRD を含む岩石源珪質主体の堆積物で特徴付けら

れている。この Unit は、色、触感、TOC を含む諸成分、および小さなこのコンクリーション固結の変化により6つの sub-units に更に細分化されている。年代は、中期始新世から現世までである。Subunit 1/5 (198.70 – 192.94 mcd) の一部に始まり、Subunits 1/4 から 1/1 の海底面まで (0 – 192.94 mcd) までは、有機炭素含有量が少なく有酸素環境で堆積した (Backman *et al.*, 2006)。

後の第5項では、主として始新世の堆積物と環境変遷について記述する。始新世の研究に加え多くの研究者が、北極海中新世や更新世堆積物および環境変遷について研究を推進している。それらの結果については、以下に代表例を示すので、参照されたい (Backman *et al.*, 2008 ; Cronin *et al.*, 2008 ; Eynaud *et al.*, 2009 ; Kaminski *et al.*, 2009 ;

Matthiessen *et al.*, 2009; O'Regan *et al.*, 2008; Sakamoto *et al.*, 2007. Sangiorgi *et al.*, 2008a; Yamamoto *et al.*, 2008).

4. 北極域における新生代気候変動の概要

現在のロモノソフ海嶺掘削点の水深は、1100 – 1300 m であるが、基盤の上に堆積が始まった白亜紀カンパニアン期 (Unit 4 の) では、非常に浅い海洋環境であったと復元されている (Moore and Expedition 302 Scientists, 2006; Setoyama *et al.*, 2012). そして、始新世の数百 m の水深を経て更に深くなり、外洋域との水交換も徐々に増加し、現在に至る。詳細については、Moore and Expedition Scientists (2008) を参照されたい。

Unit 3 の後期暁新世から前期始新世では、約 55 Ma の Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM) を捉えることが出来た。コア回収率は悪かったが、渦鞭毛藻群集と無機化学の研究により、PETM では 18°C から 23°C を超えるそれ以前より 5 – 6°C 上昇の亜熱帯気候を示す事が分かった。

Unit 2 から Unit 1/6 の中期始新世堆積物は、多様度の高い珪質微化石を豊富に含んでいるため、細部に渡る海洋環境が分かった。詳細は、下記第 5 項に記載するが、概要は以下である。上層から下層へと、以下の様な水塊と環境の変化が復元された。表層には富栄養の淡水が、亜表層には汽水、有光層下部は貧酸素、そして有光層以深の海底までの無酸素の海水層は euxinic 還元環境であった。

本 ACEX における最大の発見は、始新世における北極域の寒冷化開始であろう (図 6)。それまで、南半球の南極氷床のみ 36 Ma 頃から発達し始め、北半球における氷床の発達が 2.75 Ma なので、夫々の南北半球で異なる気候変動が起きていたと見られて (或は誤解されて) いた (e.g., Zachos, 2001)。ところが ACEX では、前述の様に Unit 2 上部で IRD が見られ、45 Ma 頃には季節海水が出現した事が新たに分かった。これは、それまで一般に理解されていた南北双半球での寒冷化時期のミスマッチのパズルを一気に解決し、時期を同調させる原動力となった (図 6)。

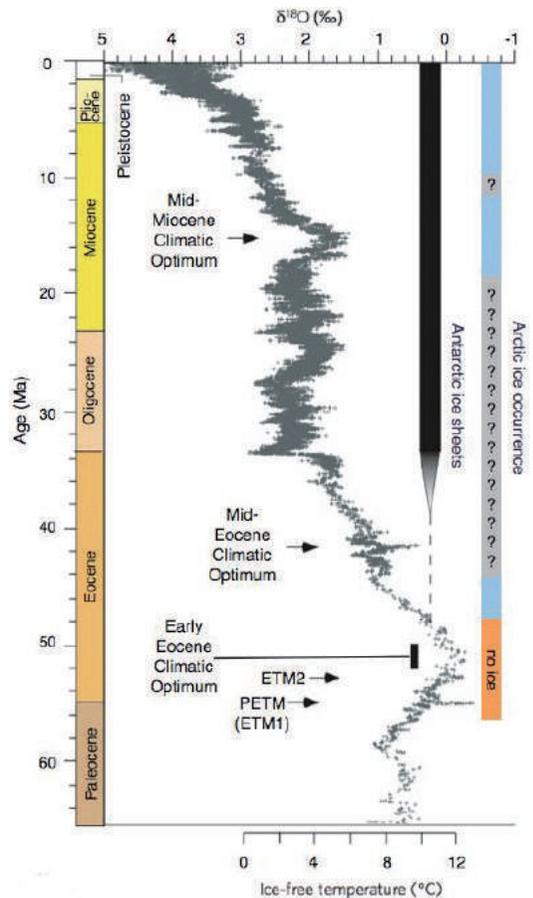


図 6 ACEX 研究により刷新された新生代における世界の寒冷化。左から順に、カーブは Zachos *et al.* (2008) $\delta^{18}\text{O}$ データのコンパイルーション、黒い帯は南極氷床の発達史、右のカラー帯は北極の海水発達史。カラー帯中の“?”は、不整合によりコア不在期間の未情報期 (Backman and Moran, 2009)。

では、新生代におけるより顕著な海水の発達はいつ頃から開始したのであろうか。中新世の 15 Ma ~ 13 Ma には多年氷のアイスパックが生成していたと考えられる (Backman and Moran, 2009)。これ以降多年氷が優占する時期が多かったが、季節海水が出現した時期もあった。渦鞭毛藻の研究によって、多年氷期には主として従属栄養群集がみられ、季節海水期には独立栄養群集が優占することが分かった (Sangiorgi *et al.*, 2008a)。

5. 中期始新世堆積物と珪質微化石群集

珪質微化石は、Unit 2 (223.56 – 198.70 mcd) の全体および下部 Unit 1/6 (223.56 – 198.70 mcd) で良く保存されている。ACEX 全体を通してこれ以外の層準で珪質微化石は、全く保存されていない (Ogawa *et al.*, 2008 ; Onodera and Takahashi, 2009a, b)。現在の夏白夜期での海水下および海中には、多様度の高い濃密度の珪藻・珪質鞭毛藻類ポピュレーションが生育している (Katsuki *et al.*, 2009 ; Takahashi *et al.*, 2009) にも拘らず、多年氷域の海底堆積物中には全く保存されていない (Backman *et al.*, 2006) ことから、海氷性の殻の薄いアイスアルジーは通常保存されないことも分かっている。

堆積物 Unit 2 (49.7 – 45.1 Ma) は、珪質微化石を豊富に含み微小ラミナ層 (< 1 mm) を伴う黒灰色生物源ウーズで構成されている。また、通常堆積物 Unit 1/6 は、暗黒灰色シルト質粘土ないし粘土質シルトで構成されている。これらの層準では、以下の珪質微化石群集が、非常に多様度の高い状態で連続して産出した：珪質鞭毛藻、エブリア類、珪藻、黄金色藻 (Stickley *et al.*, 2008 ; Suto *et al.*, 2008, 2009 ; Onodera and Takahashi, 2009a, b)。これらの高緯度且つ中期始新世の群集は、世界的にも稀で貴重であり、更なる分類学的研究が必要で今後の発展研究に期待したい。

これらの Unit の堆積物年代は、主として珪質鞭毛藻およびエブリア類により中期始新世とされている (Onodera and Takahashi, 2009a, b)。また僅少ではあるが、同じく珪質のレディオオラリア微化石も幾つかの限られた層準で産出した (Backman *et al.*, 2006)。レディオオラリアは、殆どが破片等の不完個体で、貴重な海洋環境情報を提示 (下記参照) したものの年代決定には寄与出来なかった (Backman *et al.*, 2006)。そして炭酸塩微化石は、ACEX 全体では僅か上部の更新世で有孔虫が産出したのみで (Cronin *et al.*, 2008)、始新世では全く産出しなかった。さらに、始新世における渦鞭毛藻化石は、少ないながら産出しており、珪質微化

石年代と調和的な年代を与えている (Sangiorgi *et al.*, 2008b)。

6. 中期始新世の浅海汽水性富栄養閉鎖的還元環境とその変動

主として珪質鞭毛藻とエブリア類による中期始新世の北極海環境は、次の様な状況であったと復元される。この時代の北極海環境は、半閉鎖的な水循環の悪い富栄養浅海で、外部の海洋域との接続はごく限られていた。Unit 2 下部では、前述の様に淡水性シダ類 *Azolla* を大量に含む比較的短期間 (約 80 万年間) の層準 (48.6 Ma ; Brinkhuis, *et al.*, 2006 ; Moran *et al.*, 2006 ; Sluijs *et al.*, 2006 ; Backman and Moran, 2009) があり、淡水が海洋表層を覆っていた事は間違いない。この時代の北極域は、降水と河川流入が蒸発量を上回る ($E < P + R$) 湿潤多雨型であったと復元されている (Pagani *et al.*, 2006)。そして、淡水性黄金色藻微化石は、表層の淡水存在を裏付ける (Stickley *et al.*, 2008)。表層淡水の下に汽水が存在したことは、珪質鞭毛藻とエブリア類による解析からも明らかである (Onodera *et al.*, 2008 ; Onodera and Takahashi, 2009a, b) (図 7)。また、低塩分を裏付ける魚の歯の酸素同位体比分析結果も示された (Waddell and Moore, 2008)。さらに、現世のエブリア類の鉛直分布から、貴重な環境情報もたらされた。エブリア類の特定種は、無酸素層直上の貧酸素層で光合成共生藻類 (symbiotic cyanobacteria) を保持し生息している (Onodera and Takahashi, 2009b)。当時の北極海は、現在の黒海を凌ぐ規模での無酸素環境 (= euxinic) であったことが、硫黄同位体 $\delta^{34}\text{S}$ の研究から判明している (Ogawa *et al.*, 2009)。前述の様に始新世試料にはパイライト (FeS_2) が存在するが、硫黄化合物の析出は海水の供給なしには起こらないプロセスである。よって、Unit 3 ~ Unit 1/6 の全層の時代で、常に海洋からの水塊流入があったことになる (Ogawa *et al.*, 2008)。海水流入の時系列変化に関しては、海水に生息が限定されるレディオオラリア化石についての下記記述を参照されたい。上記の海洋環境を、上層から下層

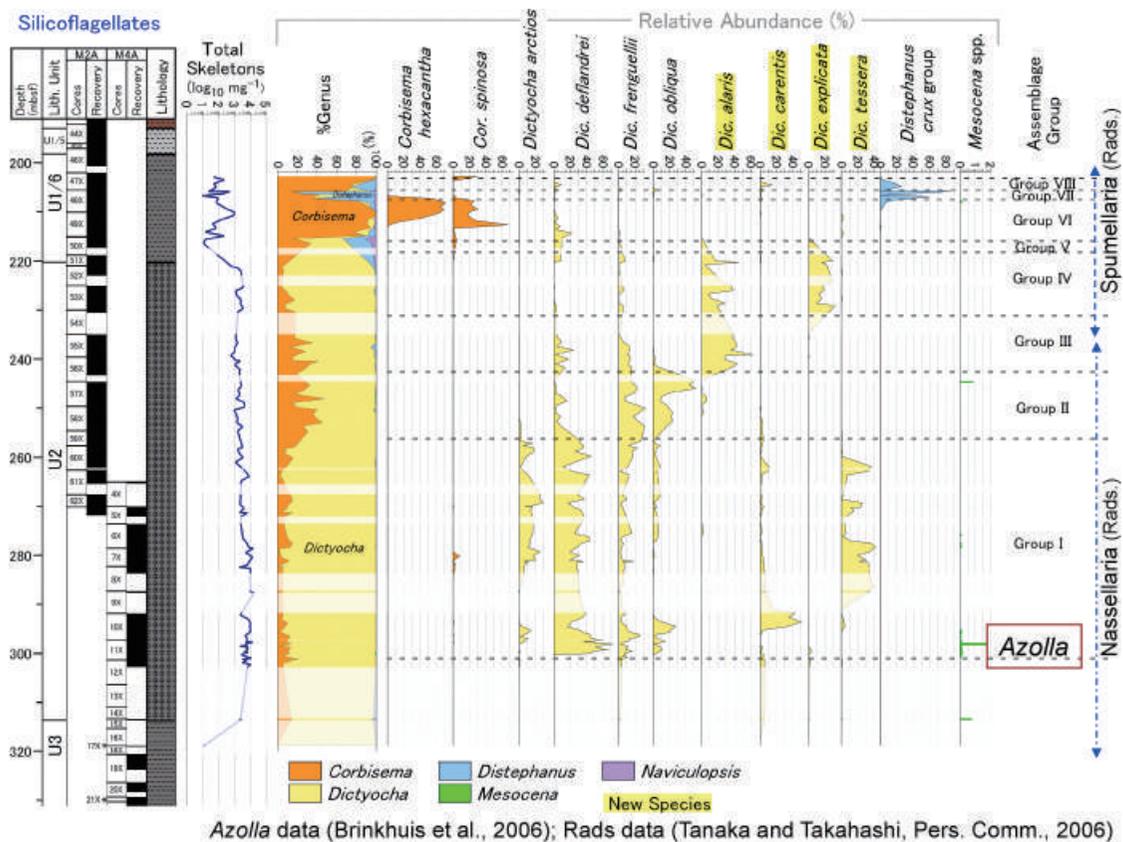


図7 Sites M0002, M0004 を併用した中期始新世における珪質鞭毛藻群集の変動 (Onodera and Takahashi, 2009a).

へ向けてまとめると次の様になる。表層には富栄養の淡水が、亜表層には汽水、有光層下部は貧酸素、そして有光層以深の海底までの無酸素の海水層は euxinic 還元環境であった。

現世のレディオラリア・プランクトンは、一例 (Boltovskoy *et al.*, 2003) を除き汽水には生息せず、通常は外洋種とされている。従って、ACEX 中期始新世のレディオラリア化石の出現が示す情報は貴重である。Unit 2 下部では Nasellaria 目 (ほぼ単一種) のみであったレディオラリア群集は、Unit 2 上部 (240 mcd, 約 45 Ma) 以浅で Spumellaria 目 (>数種) に変化した。これは、流入海水の質の変化を物語る。Unit 2 下部では Boltovskoy *et al.*

(2003) が記載した様な比較的陸に近い沿岸性ないし半外洋性のレディオラリア種が生息していたと考えられることから、比較的閉鎖的な中途海盆的な縁海の存在を考えた (Tanaka and Takahashi, unpublished)。海水の継続供給があった事から、その様な中途海盆のさらに外側に、真の外洋域があったと推測される (図8)。約 45 Ma では、この中途海盆環境が消滅し、外洋水が直接流入する環境に変化した (図8) ことが、数種を超える Spumellaria 目のレディオラリア群集解析結果より分かった。

一方、珪質鞭毛藻を用いた時系列解析と他地域との珪質鞭毛藻群集の比較検討結果から、以下の北極海とその外部との連携史が分かった

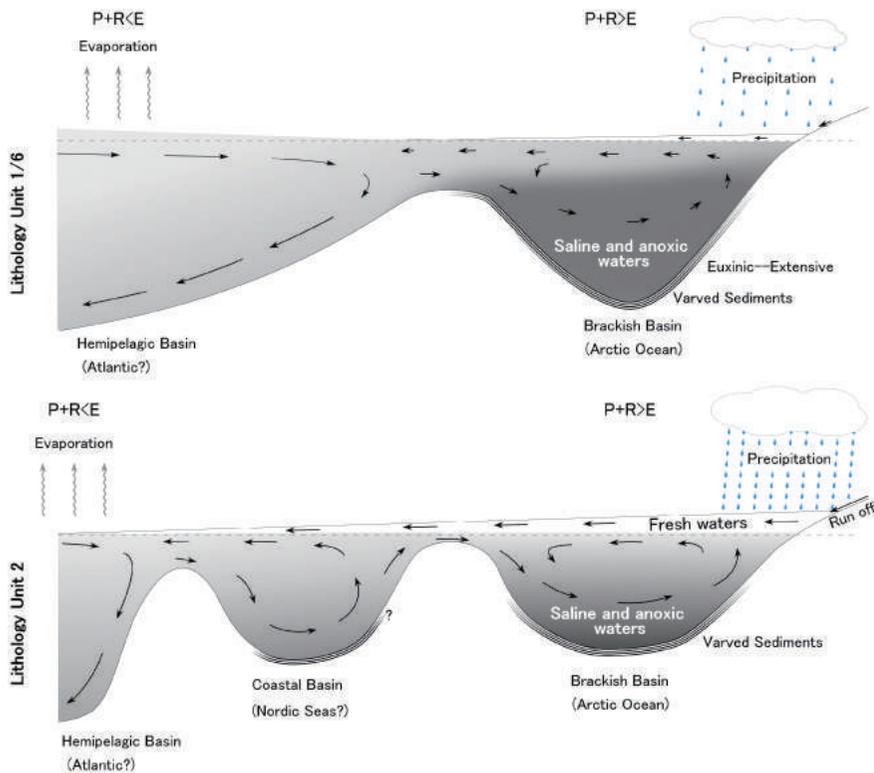


図8 中期始新世における北極海と外洋域の連繋 (Onodera *et al.*, 2008). 約 45 Maでは, 下図の中途海盆が消滅し, 上図の外洋水流入環境に変化した。

(Onodera and Takahashi, 2009a). 50.5 – 49.2 Maでは, それまでテーチス海から北極海まで繋がっていたツルゲイ海峡との連携が既に断たれており, 先行研究 (Akhmetiev and Beniamovski, 2004) の主張 (49 Ma ではまだ連携中) を年代的に改訂する結果を得た。また, 約 44 Ma には北極海が大西洋と繋がったことも, ノルウェー海 DSDP Leg 38 の珪質鞭毛藻群集 (Martini, and Müller, 1976) との比較により明らかになった。それまで一貫して長期間 *Dictyocha* 属が優占し *Corbisema* 属が付随していたが, 約 44 Ma では *Corbisema* 属優占で *Distephanus* 属付随の群集に変化した。また, 46 Ma から季節海氷が出現し徐々に増加し, この時代では既に北極海域が南極と同調して寒冷化したことが, IRD と砂粒子の解析から分かったが (St. John, 2008). 珪質鞭毛藻群集についても, *Distephanus* 属の出現で示される様に, IRD・砂粒子の寒冷化結果と調和的な環境変動を示した (図7)。

7. おわりに

IODP ACEX 北極海掘削研究は, それまで 98% 未知であり想像もつかない部分が多かった新生代の北極環境変化の情報を, 期待を上回るレベルで明らかにした。しかしながら, 依然として新生代の 2/3 以上の堆積物が未だ取得されておらず, 今後これらを少しでも多く入手して, 北極海環境変遷史の全貌を明らかにしたいものだ。幸いにも IODP では ACEX 航海完了後の過去 9 年間で, 多くの新たな北極掘削プロポーザルが提出され, 現在まで実施に向けての努力が積み重ねられて来た。また昨今, 日本国内では地質学を含めた北極研究の優れた専門家が着実に育ってきているので将来が楽しみだ。さらに, 2013 年 10 月から現行の IODP は, 新たに International Ocean Discovery Program (IODP) となる。引き続き国際協力のもとに, 精力的な北極環境変遷研究の発展を期待したい。

8. 謝辞

Expedition 302 ACEX を成功裡に導いてくれた Co-Chief Scientists のストックホルム大学 Jan Backman 教授およびロードアイランド大学 Kate Moran 博士には、厚く御礼申し上げる。乗船中、航海後のプレーメン大学でのサンプリングそしてその後の研究の多くの場面で協力頂いた Expedition 302 の乗船研究者 16 名および陸上研究者 13 名 (下記参照) には、心より感謝する。本研究は、IODP プレーメン大学コアレポジトリイに収納されている IODP コア試料を用いて成就した。ノルウエー・トロムソからトロムソまでの ACEX 航海参加およびイタリア・シシリー島での ACEX ポストクルーズ会議参加を含め、ACEX 研究推進に有用であった文部科学省および日本学術振興会の補助金交付に感謝する。

9. IODP Expedition 302 参加科学者 (乗船時所属研究機関, * 印は乗船科学者) :

Co-Chief Scientists : Jan Backman* (Stockholm U, Sweden) , and Kathryn Moran* (U Rhode Island, USA) . Staff Scientist : David McInroy* (British Geological Survey, UK) . Henk Brinkhuis* (Utrecht U, Netherlands) , Steve Clemens (Brown U, USA) , Thomas Cronin* (U.S. Geol. Survey, Reston, USA) , Gerald Roy Dickens (Rice U, USA) , Frédérique Eynaud, U Bordeaux, France) , Jérôme Gattacceca (CEREGE (CNRS)/U Aix-Marseille, France) , Martin Jakobsson*(Stockholm U, Sweden), Richard W. Jordan (Yamagata U), Michael Kaminski*(U College London, UK) , John King (U Rhode Island, USA) , Nalân Koc (Norwegian Polar Inst., Norway) , Nahysa C. Martinez (Boston U, USA) , Jens Matthiessen* (AWI, Germany) , Theodore C. Moore Jr.* (U Michigan, USA) , Matthew O'Regan* (U Rhode Island, USA) , Jonaotaro Onodera* (Kyushu U) , Heiko Pälike* (U Southampton, UK) , Brice Rea* (U Aberdeen, UK) , Domenico Rio*(U Padova, Italy), Tatsuhiko Sakamoto (JAMSTEC) , David C. Smith* (U Rhode Island,

USA) , Ruediger Stein (AWI, Germany) , Kristen E.K. St. John (James Madison U, USA) , Itsuki Suto* (U Tsukuba) , Noritoshi Suzuki (Tohoku U) , Kozo Takahashi* (Kyushu U) , Mahito Watanabe (AIST) , Masanobu Yamamoto (Hokkaido U) .

海氷マネージメントチーム : Arno Keinonen (Ice Management Director, AKAC Inc., Canada) , Göran Liljeström (Deputy Ice Management Director, Swedish Maritime Administ., Sweden) , Max Shirley (Ice Master, AKAC Inc., Canada) , Valentin Davidjan (Ice Master, Murmansk Shipping Co., Russia) , Roger Pilkington (Ice Observer/Forecaster, AKAC Inc., Canada) , Johan Söderqvist (Ice Observer/Forecaster, Swedish Meteorol. & Hydrolog. Inst., Sweden) , Andrei Masanov, Alexander Yulin, and Igor Sheikin (all: Ice Observers, Arctic & Antarctic Res. Inst., Russia) .

参考文献

- [1] Akhmetiev, M. A. and Beniamovskii, V. N. (2004) : Paleocene and Eocene of Western Eurasia (Russian sector) - stratigraphy, palaeogeography, climate. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen, 234: 137-181.
- [2] Backman, J. (2001) : Arctic Detailed Planning Group (ADPG) final report, 2001. JOIDES J., 27 (2) , 18-27.
- [3] Backman, J., Jakobsson, M., Løvlie, R., Polyak, L. and Febo, L. A. (2004) : Is the central Arctic Ocean a sediment starved basin? Quaternary. Sci. Rev., 2004, 23, 1435-1454.
- [4] Backman, J., Moran, K., McInroy, D., Mayer, L.A. and the Expedition 302 Scientists. (2006) : Proceedings IODP, 302. doi:10.2204/iodp.proc.302.101.2006.
- [5] Backman, J., Jakobsson, M., Frank, M., Sangiorgi, F., Brinkhuis, H., Stickley, C., O'Regan, M., Løvlie, R., Pälike, H., Spofforth, D., Gattacceca, J., Moran, K., King, J. and Heil, C. (2008) : Age model and core-seismic integration for the Cenozoic Arctic Coring Expedition sediments from the Lomonosov Ridge. Paleoceanography, 23, PA1S03, doi:10.1029/2007PA001476, pp. 1-15.
- [6] Backman, J. and Moran, K. (2009) : Expanding the Cenozoic paleoceanographic record in the central Arctic Ocean : IODP Expedition 302 synthesis. Central European Journal of Geoscience, 1, 157-175.
- [7] Boltovskoy, D., M. Kogani, V. A. Alder, and H. Mianzan. (2003) : First record of a brackish radiolarian (Polycystina) : Lophophaena rioplatensis n. sp. in the R'0 de la Plata estuary. J. Plankton Res., 25 (12), 1551-1559.
- [8] Brinkhuis, H., Schouten, S., Collinson, M.E., Sluijs, A., Sinninghe Damsté, J. S., Dickens, Huber, M., Cronin, T. M., Onodera, J., Takahashi, K., Bujak, J. P., Stein, R., van der Burgh, J., Eldrett, J. S., Harding, I. C., Lotter, A. F., Sangiorgi, F., van Konijnenburg-van Cittert, H., de Leeuw,

- J. W., Matthiessen, J., Backman, J., Moran, K. and the Expedition 302 Scientists. (2006) : Episodic fresh surface waters in the Eocene Arctic Ocean. *Nature*, 441, 606-609. DOI 10.1038/nature04692.
- [9] Bukry D. (1984) : Paleogene paleoceanography of the Arctic Ocean is constrained by the middle or late Eocene age of USGS Core FI-422 : Evidence from silicoflagellates, *Geology*, 12, 199- 201.
- [10] Clark D. L. (1974) : Late Mesozoic and early Cenozoic sediment cores from the Arctic Ocean, *Geology*, 2, 41-44.
- [11] Cronin, T., Smith, S. A., Eynaud, F., O'Regan, M. and King, J. (2008) : Quaternary paleoceanography of the central Arctic based on Integrated Ocean Drilling Program Arctic Coring Expedition 302 foraminiferal assemblages. *Paleoceanography* 23, PA1S18, doi:10.1029/2007PA001484, pp. 1-14.
- [12] Dell'agnese, D. J. and Clark, D. L. (1994) : Siliceous microfossils from the warm Late Cretaceous and Early Cenozoic Arctic Ocean. *Journal of Paleontology*, 68 : 31-47.
- [13] Eynaud, F., Cronin, T. M., Smith, S., Zaragosi, S., Mavel, J., Mary, Y., Mas, V. *et al.*, (2009) : Morphological variability of the planktonic foraminifer *Neogloboquadrina pachyderma* in the late Pleistocene of the ACEX cores, *Micropaleontology*, 55, 101-116.
- [14] Jokat W., Weigelt E., Kristoffersen Y., Rasmussen T. and Schöne T. (1995) : New insights into the evolution of the Lomonosov Ridge and the Eurasian Basin, *Geophys. J. Int.*, 122, 378-392.
- [15] Kaminski, M. A., Silye, L. and Kender, S. (2009) : Miocene deep-water agglutinated foraminifera from the Lomonosov Ridge and the opening of the Fram Strait. *Micropaleontology* 55, 117-135.
- [16] Katsuki, K., Takahashi, K., Onodera, J., Jordan, R. W. and Suto, I. (2009) : Living diatoms in the vicinity of the North Pole, summer 2004. *Micropaleontology* 55, 137-170.
- [17] Ling, H. Y. (1985) : Early Paleogene silicoflagellates and ebridians from the Arctic Ocean. *Trans. Proc. Palaeontol. Soc. Japan*, NS, 138, 79-93.
- [18] Matthiessen, J., Brinkhuis, H., Poulsen, N. and Smelror, M. (2009) : *Decahedrella martinheadii* Manum 1997 - a stratigraphically and paleoenvironmentally useful Miocene acritarch of the high northern latitudes. *Micropaleontology*, 55 (2-3), 171-186.
- [19] Martini, E. and C. Müller. (1976) : Eocene to Pleistocene silicoflagellates from the Norwegian-Greenland Sea (DSDP Leg 38), *Init. Rep. Deep Sea Drill. Proj.*, 38, 857-895.
- [20] Moore T.C. and Expedition 302 Scientists. (2006) : Sedimentation and subsidence history of the Lomonosov Ridge. In : Backman J., Moran K., McInroy D. B., Mayer L. A. (Eds.) , *Proc. IODP 302 : Edinburgh (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.)* , 2006, DOI:10.2204/iodp.proc.302.105.2006
- [21] Moran, K., J. Backman, and J. W. Farrell. (2006a) : Deepwater drilling in the Arctic Ocean's permanent sea ice. In : Backman, J., Moran, K., McInroy, D. B., Mayer, L. A., and the Expedition 302 Scientists, *Proc. IODP, 302*, 1-13. doi:10.2204/iodp.proc.302.106.2006.
- [22] Moran, K., Backman, J., Brinkhuis, H., Clemens, S. C., Cronin, T., Dickens, G. R., Eynaud, F., Gattacceca, J., Jakobsson, M., Jordan, Michael Kaminski, M., King, J., Koc, N., Krylov, A., Martinez, N., Matthiessen, J., McInroy, D., Moore, T. C., Onodera, J., O'ÁfRegan, M., Pálike, H., Rea, B., Rio, D., Sakamoto, T., Smith, D. C., Stein, R., St John, K., Suto, I., Suzuki, N., Takahashi, K., Watanabe, M., Yamamoto, M., Farrell, J., Frank, M., Kubik, P., Jokat, W. and Y. Kristoffersen. (2006b) : The Cenozoic palaeoenvironment of the Arctic Ocean. *Nature*, 441, 601-605.
- [23] Ogawa, Y., Takahashi, K. and Yamanaka, T. (2008) : Paleoceanography of the middle Eocene Arctic Ocean based on geochemical measurements of biogenic matter. *Memoirs of the Faculty of Sciences, Kyushu University, Series D, Earth and Planetary Sciences*, 32 (1), 31-48.
- [24] Ogawa, Y., K. Takahashi, T. Yamanaka, and J. Onodera. (2009) : Significance of euxinic condition in the middle Eocene paleo-Arctic basin : A geochemical study on the IODP Arctic Coring Expedition 302 sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 285, 190-197.
- [25] Onodera, J., K. Takahashi, and R. W. Jordan. (2008) : Eocene silicoflagellate and ebridian paleoceanography in the central Arctic Ocean, *Paleoceanography*, 23, PA1S15, doi:10.1029/2007PA001474.
- [26] Onodera, J. and K. Takahashi. (2009a) : The middle Eocene ebridians in the central Arctic Ocean, IODP Expedition 302 (ACEX) . *Micropaleontology*, 55 (2-3), 187-208.
- [27] Onodera, J. and K. Takahashi. (2009b) : Taxonomy and biostratigraphy of silicoflagellates in the middle Eocene Arctic Ocean. *Micropaleontology*, 55 (2-3), 209-248.
- [28] O'Regan, M., King, J., Backman J., Jakobsson M., Pálike, H., Moran, K. *et al.* (2008a) : Constraints on the Pleistocene chronology of sediments from the Lomonosov Ridge, *Paleoceanography*, 23, 1-18, PA1S19, DOI:10.1029/2007PA001551.
- [29] Pagani, M., Pedentchouk, N. and the Expedition 302 Scientists *et al.* (2006) : Arctic hydrology during global warming at the Palaeocene/Eocene thermal maximum. *Nature*, 442, 671-675. DOI 10.1038/nature05043.
- [30] Sakamoto, T., Sugisaki, S., Iijima, K., Yamamoto, M., O'Regan, M, King, J. and Moran, K. (2007) : High-resolution reconstruction of the Arctic history and origin of Mn-rich brown color layers during 2 Ma in the central Arctic Ocean (IODP Expedition 302: ACEX) by non-destructive sediment-scanning techniques, TATSCANs. *Marine Geology*, 56, p. 12.
- [31] Sangiorgi, F., Brumsack, H.-J., Willard, D.A., Schouten, S., Stickley, C., O'Regan, M., Reichart, G.-J., Sinnighe Damsté, J.S. and Brinkhuis, H. (2008a) : A 26 million year gap in the central Arctic record at the greenhouse-icehouse transition : Looking for clues. *Paleoceanography* 23, PA1S04, doi:10.1029/2007PA001477, pp. 1-13.
- [32] Sangiorgi, F., van Soelen, E. E., Spofforth, D. A. J., Pálike, H., Stickley, C., St. John, K. *et al.* (2008b) : Cyclicity in the middle Eocene central Arctic Ocean sediment record: Orbital forcing and environmental response. *Paleoceanography*, 23, 1-14, PA1S08, DOI:10.1029/2007

PA001487.

- [33] Setoyama, E., M. A. Kaminski, and J. Tyszka. (2012) : Campanian agglutinated foraminifera from the Lomonosov Ridge, IODP Leg 302 (ACEX) : implications for Arctic Late Cretaceous paleogeography. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 14, EGU2012-4757, EGU General Assembly 2012.
- [34] Sluijs, A., Schouten, S. and the Expedition 302 Scientists. (2006) : Subtropical Arctic Ocean temperatures during the Palaeocene/Eocene thermal maximum. *Nature*, 441, 610-613. DOI 10.1038/nature04668.
- [35] Sluijs A., Röhl U., Schouten S., Brumsack H.-J., Sangiorgi F., Sinninghe Damsté J.S. *et al.* (2008) : Arctic late Paleocene-early Eocene paleoenvironments with special emphasis on the Paleocene-Eocene thermal maximum (Lomonosov Ridge, Integrated Ocean Drilling Program Expedition 302), *Paleoceanography*. (2008) : 23, 1-17, PA1S11. DOI:10.1029/2007PA001495.
- [36] Stickley, C.E., Koç, N., Brumsack, H.-J., Jordan, R. W. and Suto, I. (2008) : A siliceous microfossil view of middle Eocene Arctic paleoenvironments: A window of biosilica production and preservation. *Paleoceanography* 23, PA1S14. doi:10.1029/2007PA001485, pp. 1-19.
- [37] St. John K. (2008) : Cenozoic ice-rafting history of the central Arctic Ocean : Terrigenous sands on the Lomonosov Ridge, *Paleoceanography*. 23, 1-12, PA1S05, DOI:10.1029/2007PA001483.
- [38] Suto I., Jordan R. W. and Watanabe M. (2008) : Taxonomy of fossil marine diatom resting spore genus *Gonitochium* Ehrenberg and its allied species, *Diatom Res.* 23, 445-469.
- [39] Suto, I., Jordan, R. W. and Watanabe, M. (2009) : Taxonomy of middle Eocene diatom resting spores and their allied taxa from the central Arctic Basin. *Micropaleontology* 55, 259-312.
- [40] Takahashi, K., J. Onodera, and K. Katsuki. (2009) : Significant populations of seven-sided *Distephanus* (Silicoflagellata) in the sea-ice covered environment of the central Arctic Ocean, summer 2004. *Micropaleontology*, 55 (2-3), 313-325.
- [41] Waddell L. M. and Moore T. C. (2008) : Salinity of the Eocene Arctic Ocean from oxygen isotope analysis of fish bone carbonate, *Paleoceanography*. 23, 1-14, PA1S12, DOI:10.1029/2007PA001451.
- [42] Yamamoto, M., Okino, T., Sugisaki, S. and Sakamoto, T. (2008) : Late Pleistocene changes in terrestrial biomarkers in sediments from the central Arctic Ocean. *Organic Geochemistry*, 39, 754-763.
- [43] Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E. and Billups, K. (2001) : Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present, *Science*, 292, 686-693. DOI:10.1126/science.1059412.
- [44] Zachos, J. C., Dickens, G. R. and Zeebe, R. E. (2008) : An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics, *Nature*. 451, 279-283, DOI:10.1038/nature06588.

