



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

IODP Expedition 323 Bering Sea Paleoceanography

高橋孝三

IODP Expedition 323 Bering Sea
Paleoceanography

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

2009 年夏の IODP Exp 323 ベーリング海古海洋掘削航海で、7 サイト計 660 本、総延長 5741 m のコアを採取した。最大深度 745 m、最古年代 500 万年を含む主に APC 工法による高品質堆積物試料を得た。鮮新世～更新世にかけての緩やかな生物生産性低下、寒冷化・海氷の発達、陸源物質流入増加が見られた。

1. はじめに

ベーリング海は 230 万 km² の面積を保有し、縁辺海としては南シナ海、地中海に次ぐ世界第 3 の大きさである。この縁辺海は、太平洋北部の周縁部に位置し、北西にシベリア大陸、北東に北アメリカ大陸アラスカ、そして南にアリューシャン列島と周囲を陸地で囲まれ半閉鎖的である (図 1)。水循環の観点としては、北縁のベーリング海峡を經由し北極海と繋がっており、南側のアリューシャン列島間の多くの海峡を經由して太平洋とは水塊の出入りがある (図 1)。また、ベーリング海北部は北極圏内に位置し、現在冬期では季節海氷に覆われる。地球規模でのベーリング海の重要性は、「ポーラーアンプリフィケーション」にある。この「高緯度特有の鋭敏に反応する増幅されたシグナルは、全球気候変動の詳細理解に不可欠である」と言っても過言でなからう。更に、世界最大海盆の太平洋と第二の大西洋を北極海経由で連繋するベーリング海は、水循環の鍵となる地理的重要性を持つ。水深約 50 m のベーリング海峡開閉動向の理解は、氷期・間氷期の海水準変動に伴い地球規模の気候変動の詳細解明に欠かせない。

ベーリング海では 1971 年に DSDP Leg 19 により掘削が行われた。しかし、基盤到達目的の当時の掘削では、連続コアをほとんど採取しておらず、またコア回収率も低く、堆積学や化石群集記載を主とする基礎研究が行われたのみである。従って古海洋研究は、近年のピストンコア採取を待つ結果となった (e.g., Takahashi *et al.*, 2005)。このような視点で IODP 研究グループでは、以下の主目的を基に古海洋研究の為のベーリング海掘削を計画した (Takahashi *et al.*, 2009a)。目的 : (1) 270

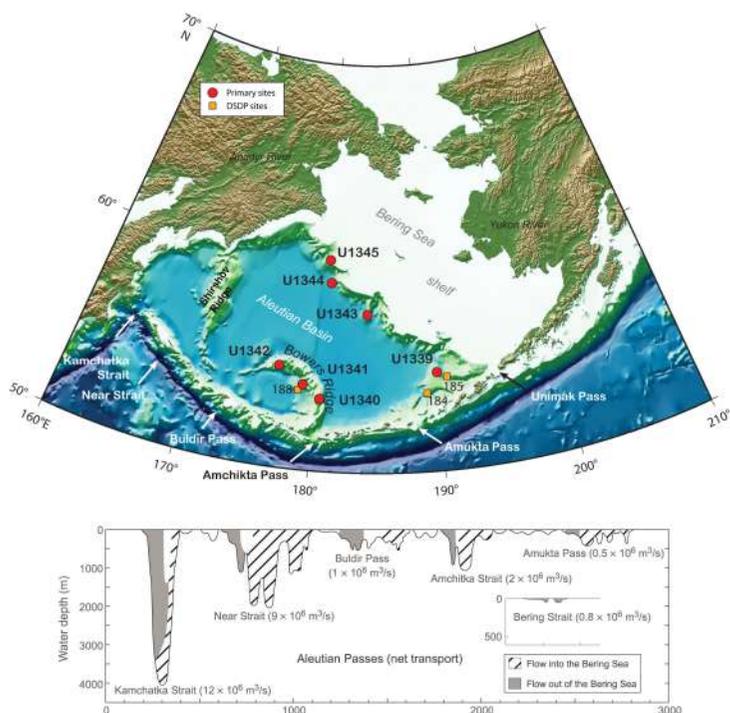


図1 ベーリング海の地形とIODP Expedition 323 で掘削された7つのサイト。ベーリング海峡とアリューシャン列島間を通しての北極海と北太平洋との水塊の出入収支 (Stabeno *et al.*, 1999 ; Takahashi *et al.*, 2011a, b).

万年前の北半球氷床の発達や100万年前の4.1万年から10万年周期に移行する世界規模の気候変動が、ベーリング海ではどのような形で起きたのか。(2) 過去500万年間では、全球的には鮮新世の温暖期から更新世の氷期・間氷期サイクルを繰り返す気候変動に転じたが、海水の発達史を精査する必要がある。(3) 海水の発達史は、北太平洋中層水(NPIW)と連動しており、中層水で生育する放散虫 *Cycladophora davisiana* や底層水の酸素濃度で種組成が変化する底生有孔虫群集の動向を精査する。(4) また、大陸起源の堆積物の流入規模や起源、特性等を調べることで大陸の植生、氷河等の復元も可能である。

2. ベーリング海掘削航海 Expedition 323 実施

Expedition 323 は、2009年7月5日カナダ・ヴィクトリア～9月4日横浜の61日間の航海で、計7サイト(U1339, U1340, U1341, U1342, U1343, U1344, U1345)で掘削・コアリングを行った(図1, 表1)。

表1 ベーリング海におけるIODP Expedition 323で得られたコアの海域、ID、水深、掘削・コアリング深度、年代、堆積速度の情報。

Area	Water depth	Depth DSF	Age	Average sedimentation rate
IODP site number	(mbsl)	(m)	(Ma)	(cm/k.y.)
Umnak Plateau				
U1339	1911	200	0-0.8	28
Bowers Ridge				
U1340	1324	600	0-5	12
U1341	2177	600	0-5	12
U1342	848	45	0-1.2*	4.5
Bering slope				
U1343	1986	745	0-2.1	35
U1344	3220	745	0-1.9	45
U1345	1020	150	0-0.5	29

一部、予定していたロシア海域へ入ることが出来なかった為掘削出来なかったサイトを残す他は、成功裡に十分なコア収集を完了した。天候にも恵まれ、JOIDES Resolution 号の長年蓄積された卓越したコアリング技術に助けられ、総延長5741mに及ぶ計660本の上質なコアを取得した。縁辺海の本海域では、比較的高い堆積速度12～45cmky⁻¹

のコアが得られた（例外の U1342 を除く）(表 1)。最長掘削孔は 745 m (Sites U1343, U1344) , 最古年代は U1340 の 500 万年前 (600 m) であった (表 1 ; 図 2-3 ; Takahashi *et al.*, 2011a, b)。

3. 堆積物の特徴

今回の掘削・コアリングにより得られたベーリング海堆積物は、その多くを Advanced Piston Coring (APC) 工法により取得したため、コア採取による乱れも少なく高品質な試料を提供出来た。また、ほとんどのサイトにおいて 3 ホール (> 200 m, 時間の許す限りの範囲)でのコア採取をした結果、上部~200 m でコアギャップをほぼ全てのサイトで埋めることが出来た。深部掘削を行ったほとんどのサイトで、約 300~400 m の深度まで APC 工法で突き進むことが出来た事は、良質のコア採取の観点から良い結果であった。ホール U1341B では、APC 工法により 458.4 m まで掘削・コアリングをすることが出来、ODP/IODP の APC 最深掘削記録を樹立した。APC 工法では効率良く掘削を継続出来ない硬化堆積物の出現深度においては、Extended Core Barrel (XCB) 工法に変換した。幸いなことに Rotary Core Barrel (RCB) を用いる程硬化した堆積物には遭遇せず、全ては APC と XCB で掘削・コアリングが完了した。サイト U1342 では、基盤玄武岩を含む比較的固い火成堆積物を掘削・コアリングする機会を得たが、ここでも全て XCB 工法で対応することが出来た (Kawabata *et al.*, 2011 ; Takahashi *et al.*, 2011a)。

また、コアの回収率は非常に良く、航海全体の 660 本、合計 5741 m の平均では 97% の高い数値を得た。この理由の一部は、ガスを多量に含んだ堆積物の船上引き上げ後の膨張に起因する。例えば、サイト U1339 の平均回収率は 103% であった。

Expedition 323 で得られたコアの特徴は、船上での解析により主として以下の特性を持つことが分かった：(1) 高生物生産下での珪藻微化石を主とする堆積物；(2) 高解像変動を明らかに出来るレベルでの高堆積速度；(3) 間氷期の珪藻微化石の高い含有量および氷期の粘土鉱物の高い含有

量；(4) 年代が進むにつれて気候の寒冷化に伴う陸源物質流入の増加；(5) 頻繁なラミナ層の存在；(6) 鮮新世の温暖富栄養環境および更新世の寒冷環境を示す微化石や海水を示すドロップストーン の存在；(7) 周辺のアリューシャン列島、アラスカ半島、カムチャッカ半島等の火山噴火によるテフラ層の存在。詳細に関しては、IODP Expedition 323 Proceedings (Takahashi *et al.*, 2011a) の summary ならびに各 site chapters を参照されたい。

さらに上記 (1) に挙げた項目と関連するが、微生物介在の属性作用を論じた化学的研究 (Wehrmann *et al.*, 2011) は注目に値する。ベーリング海自体が、世界でも名高い高生物生産海域の一つである。当海域には多量の有機炭素を含む堆積物が集積しており、微生物活動の詳細を見極める事は、Expedition 323 の使命の一つでもある。実際、通常の乗船科学者に加え、本航海には microbiologists として 3 名の乗船研究者が参加した (文末の乗船者リスト参照)。研究の対象は、ベーリング海の中でも極めて生物生産力の高いグリーンベルトと呼ばれるベーリング陸棚スロープに沿った海域のサイト U1343, U1344, U1345 に絞られた。微生物介在の堆積物中の諸々の連鎖状に起こっている属性作用は、海底下 700 m 以深にまで及ぶことが明らかになった。堆積物上部での極めて高い有機物の分解は、高レベルのアンモニア生成のデータでも示された。無酸素状態で起きる有機炭素の嫌氣的酸化 (AOM) 過程は、有機物と鉱物による硝酸塩還元とメタノジェネシスと呼ばれるメタンの生成を伴う。硝酸塩-メタン遷移帯 (SMTP) は、サイト U1343, U1344, U1345 においては、深度 6~9 m の深さで起こっていた。以上が概略であるが、更なる詳細については当論文 (Wehrmann *et al.*, 2011) を参照されたい。

4. 珪質微化石による鮮新世から更新世への環境変動復元

以下は、主として珪藻および珪質鞭毛藻を使用したベーリング海バウアーズ海嶺上のサイト U1341 における 500 万年前以降の環境変動復元の

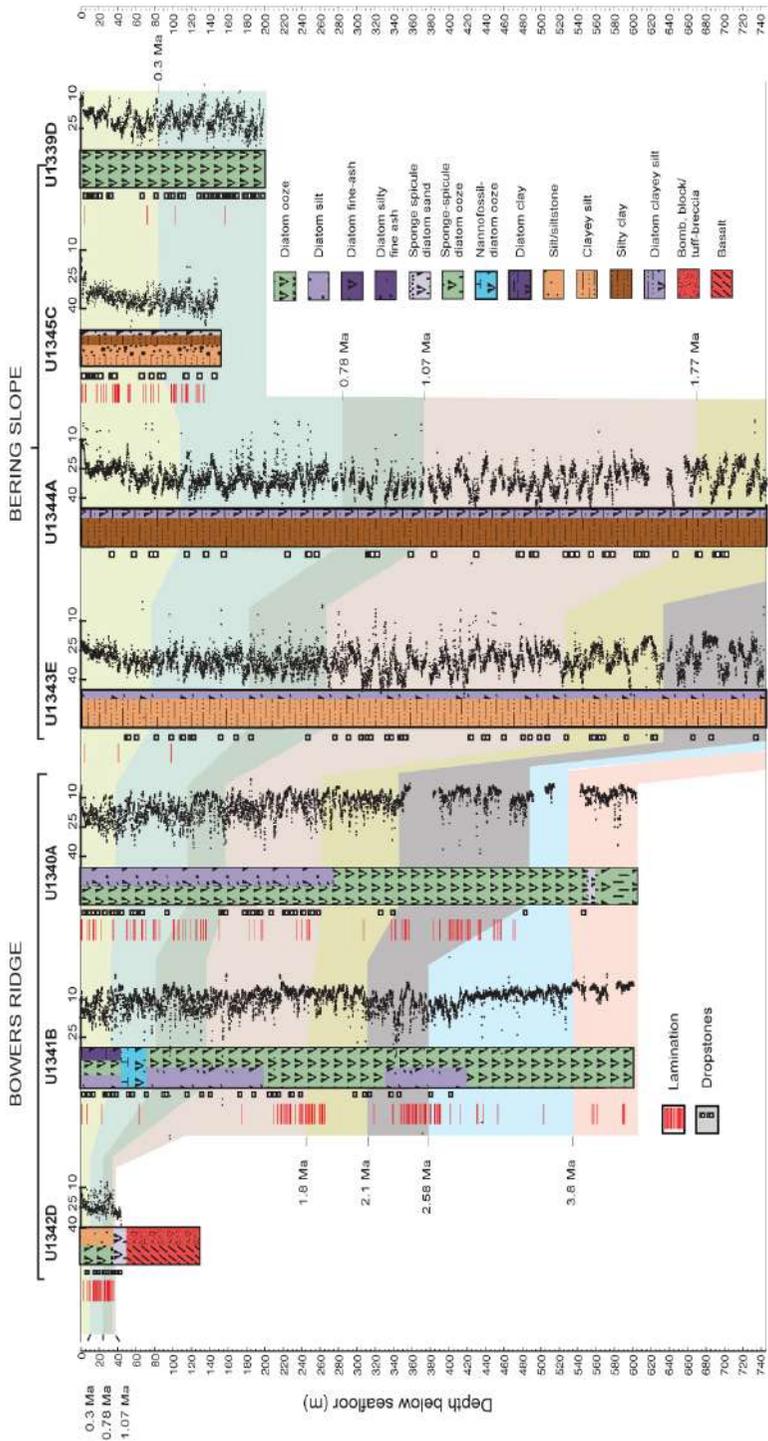


図 2 Expedition 323 の 7 サイトで採取されたコアの堆積学的サマリー (Takahashi *et al.*, 2011a, b).

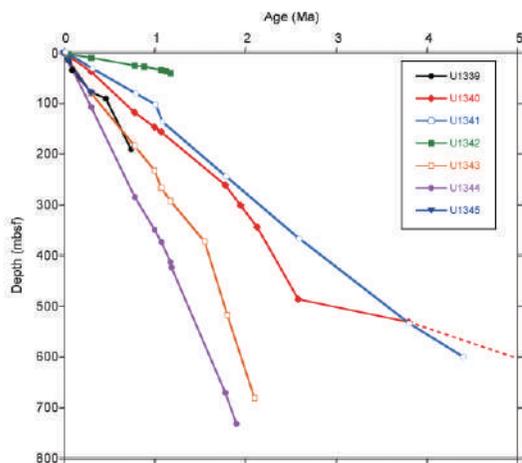


図3 Expedition 323 の7サイトにおける堆積速度の概要 (Takahashi *et al.*, 2011b).

概略である (Onodera *et al.*, in press). サイト U1341 の最下部年代は 500 – 410 万年前と見積もられている。鮮新世のベーリング海は、水塊の鉛直混合が激しく栄養塩が豊富な極めて生産力の高い比較的温暖な海洋であった。これは、珪藻種 *Coscinodiscus marginatus* で代表されるような極めて殻の厚い高栄養塩志向の温暖種の優占からも裏付けられる。また、このような高生産海洋環境は、生物源オパール含有量も 50 – 60% と著しく高いことから疑いない (Iwasaki *et al.*, submitted)。比較的温暖であった初期鮮新世から、徐々に進んだ寒冷化を経てやがては 100 万年前以降の氷期・間氷期 10 万年周期を持つミランコビッチ気候変動の時代へと突入する。ミランコビッチ周期の時代では、生物源オパール含有量も約 20 ~ 50% と初期鮮新世と比べて低下したことが分かる (Iwasaki *et al.*, submitted)。

鮮新世における最初の寒冷化のシグナルは、珪藻分析結果によると 360 – 350 万年前に見られた。これは、サイト U1341 における全珪藻群集中の *Thalassiosira trifulta* group の % 上昇による解釈である。世界の有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ データによると、時を同じくして 360 万年前には、北半球の氷床発達が始まった (Mudelsee and Raymo, 2005)。また、同じ

くサイト U1341 では約 360 万年前以降、*Stephanopyxis* の % 上昇が見られている。この変動の解釈としてこの珪藻属の現在の分布から、北太平洋水のベーリング海への流入が増加し、更にベーリング海峡で北方への流れが卓越したことが示唆された。

珪藻寒冷種で海水とも密接に関係する *Thalassiosira antarctica* (resting spore) の最初の継続出現は、サイト U1341 では約 346 – 334 万年前に見られた。これは、MIS Stage MG2 の寒冷期に相当する。僅かではあるが 290 – 286 万年前以降、海水珪藻種 *Fragilariopsis cylindrus* が出現した。珪質鞭毛藻 *Distephanus medianoctisol* の最初の優占的出現は、266 万年前に見られた。現在の夏期における北極点での同種の優占的出現の情報 (Takahashi *et al.*, 2009b) とも合わせると、266 万年前には春から秋にかけての珪質鞭毛藻の高活性期に部分的にはあったとしても、海水が被覆していたと復元できる。また、Seki *et al.* (in prep.) によるアルケノン SST 海洋表層水温の復元結果でも、この時代には著しい水温低下が観察されている。更に、掘削航海中に得られた海水指標の渦鞭毛藻種データでも 260 万年前の出現 (Takahashi *et al.*, 2011a, b) が確認されており、上記の最新情報とも一致する。全球的には顕著な北半球氷床発達の開始時期は、275 万年といわれているが (Lisiecki and Raymo, 2005)、これらのベーリング海でのイベントと調和的である。

265 – 200 万年前には、珪藻は *Neodenticula* spp. and *Actinocyclus* spp. が卓越した。これは、季節的な海水融解による夏期の低塩分表層水塊の生成による成層化を物語る。240 – 200 万年前には、珪質鞭毛藻の *Distephanus speculum* が優占することから、無海水の温暖期が継続したことが分かった。

200 万年前以降では、*T. antarctica* (resting spore) が高い % で出現することから、ベーリング海陸棚周辺海域での海水形成があったと考えられる。また、200 – 160 万年前の珪質鞭毛藻 *D. medianoctisol* 優占は、同様に海水の存在を裏付ける。

80 万年前以降では環境が更に寒冷化したことが、%*Neodenticula seminae*, %*Thalassiosira trifulta*

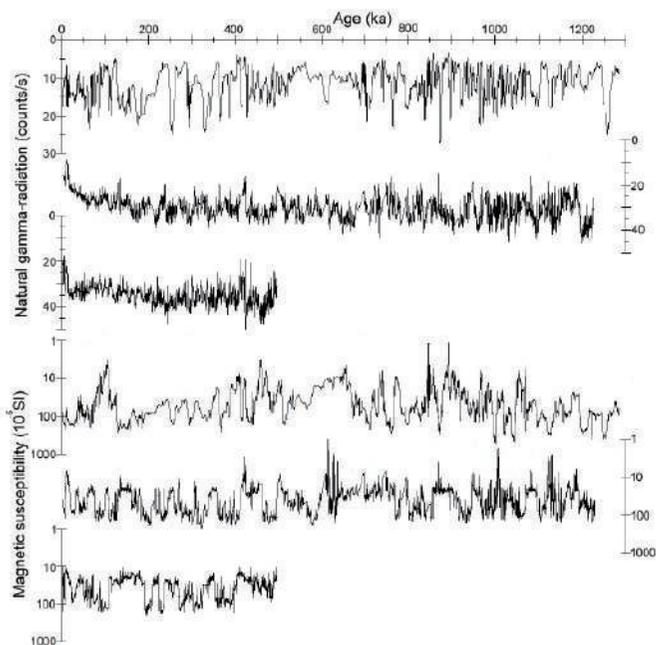


図4 サイトU1341, U1343, U1345 (順に上より下)における過去130万年間のNGRおよびMSの変動 (Kanematsu *et al.*, 2013).

group の減少や、海水指標の *T. antarctica* や *D. medianoctisol* の%上昇からも読み取れる。海水は現地性ではなく、北部のベーリング陸棚付近で生成されたものが南下してサイト U1341 までたどり着いたものと考えられる。これは、典型的な海水指標珪藻の *F. cylindrus* は海水域のコアトップで10%程度見られること (Sancetta, 1982)、そしてサイト U1341 ではわずか1%以下であったことから分かる。先行研究でも示された (Katsuki and Takahashi, 2005) 様に、バウアーズ海嶺付近での海水の存在は、最終氷期極大時でさえも可成り限られていたことが分かった。図面を含む更なる詳細は、同論文 (Onodera *et al.*, in press) を参照されたい。

5. ミランコビッチ気候変動期の高解像環境変動

過去約100万年間では、全球的に氷期・間氷期の周期が10万年毎に繰り返されるミランコビッチ気候変動が卓越したとされる (Lisiecki and Raymo, 2005)。では、ベーリング海においては実際の様な気候変動が見られたのか？現在までに公表されている高解像のデータ (例えば, Kanematsu

et al., 2013) を使って検証してみよう。ここでは過去130万年間のサイト U1341, U1343, U1345 における自然放射ガンマ線 (natural gamma-radiation : NGR), 帯磁率 (magnetic susceptibility : MS), 生物源オパール含有量 (以下, 生物源オパール%) の変動 (Kanematsu *et al.*, 2013) を見て行こう。NGR値は、カリウムを豊富に含む粘土鉱物等の細粒堆積物が多いと高く、MSは磁性鉱物に富む陸源物質が多いと高くなる傾向がある。従って、一般に氷期/寒冷期にはこれらの数値が上昇することが広く知られている。実際、ベーリング陸棚スロープに位置するサイト U1343, U1345 では、NGR, MS共にバウアーズ海嶺のサイト U1341 に比べ高い傾向がある (図4)。これは、氷期には海水準低下と共にサイト U1343, U1345 はより海岸に近くなり、アラスカからの粘土鉱物等の陸源物質が豊富に堆積するために起こる現象で、大陸棚からより遠いバウアーズ海嶺のサイト U1341 と比べると著しく高い。

生物源オパールは、珪藻等の珪質殻を持つプランクトンの遺骸が堆積したもので、その%変動は海洋表層付近での光合成による生物生産の変化を

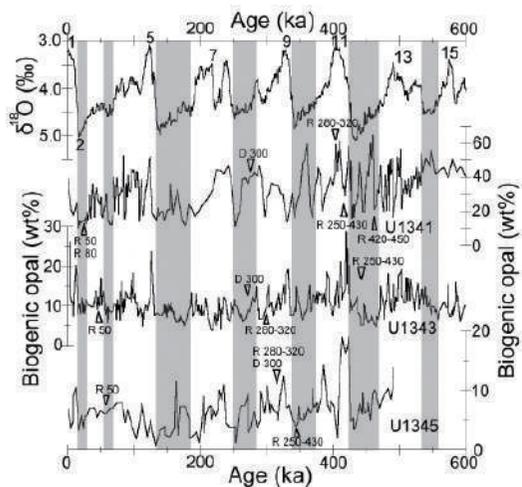


図5 過去60万年間の底性有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ (LR04: Lisiecki and Raymo, 2005) およびサイトU1341, U13423, U1345 (順に上より下)における生物源オパール%の変動 (Kanematsu *et al.*, 2013).

示す。堆積物中の珪藻自体の累積率は、陸棚スロープ (U1343, U1345) とバウアーズ海嶺 (U1341) でそれほど大差は無いが、生物源オパール%は明らかにバウアーズ海嶺で高い傾向が見られた (図5)。つまり陸棚スロープでは、珪藻等の珪質微化石がより近傍のアラスカからの陸源物質により希釈されて堆積している状況が良くわかる。この傾向は、特に氷期で著しい。半遠洋性のバウアーズ海嶺では、陸源物質希釈の効果は小さく、生物生産の変動度合いが顕著に生物源オパール%の変動として表現されており、陸源物質の影響は比較的少ない。

氷期には、陸棚スロープ (U1343) では珪藻・生物源オパール%が低い数値を示す傾向にある (図5-6)。この海域では氷期における海水被覆により、珪藻等の生物源オパール生産は著しく減少したからだ。氷期・間氷期の比較として、一般に間氷期では、生物源オパール値は氷期よりも高い傾向にあり、統計的にも顕著である。この傾向は、共にサイトU1341とU1343で見られた。しかしながら、例えば間氷期であっても生物源オパール値が常に高い訳ではなく、例外も頻繁に見受け

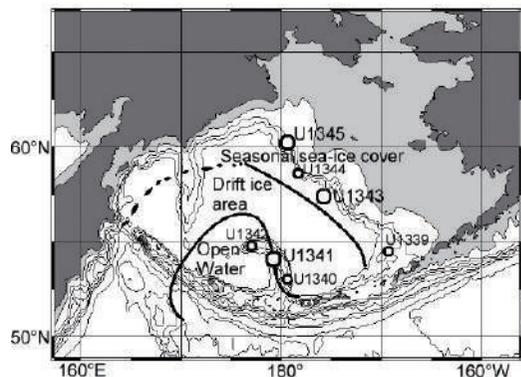
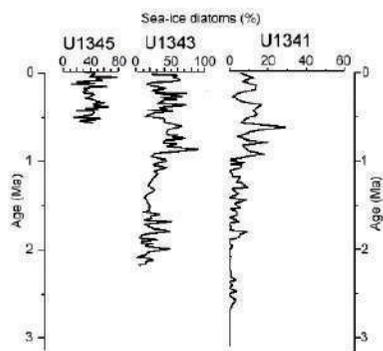


図6 サイトU1341, U13423, U1345における海水指標珪藻%の変動 (Takahashi *et al.*, 2011a; Kanematsu *et al.*, 2013). 珪藻を用いたLGMにおける海水分布図 (Katsuki and Takahashi, 2005).

られる。例として、33.0万年前 [MIS Stage 9, 13.6 wt%], 49.1万年前 [MIS Stage 13, 16.3 wt%] が挙げられる (Kanematsu *et al.*, 2013)。

生物源オパール%やNGR, MS変動は、短周期で変動したことがデータから見てとれる (図4-5)。時系列周期解析の結果は、バウアーズ海嶺 (U1341) で16, 4, 3万年周期で、また陸棚スロープ (U1343) では33, 10, 4, 2万年周期で変動したことが示された (Kanematsu *et al.*, 2013)。特に4万年周期は、北緯65°の夏期日射量の変動が4.1万年周期 (Huybers, 2006) で変動することと近似であり、主要な原因と考察される。

前述の様に、氷期における海水被覆のレベルに関しては、ベーリング海南部に位置するバウアーズ海嶺よりもより北部に位置するベーリング陸棚

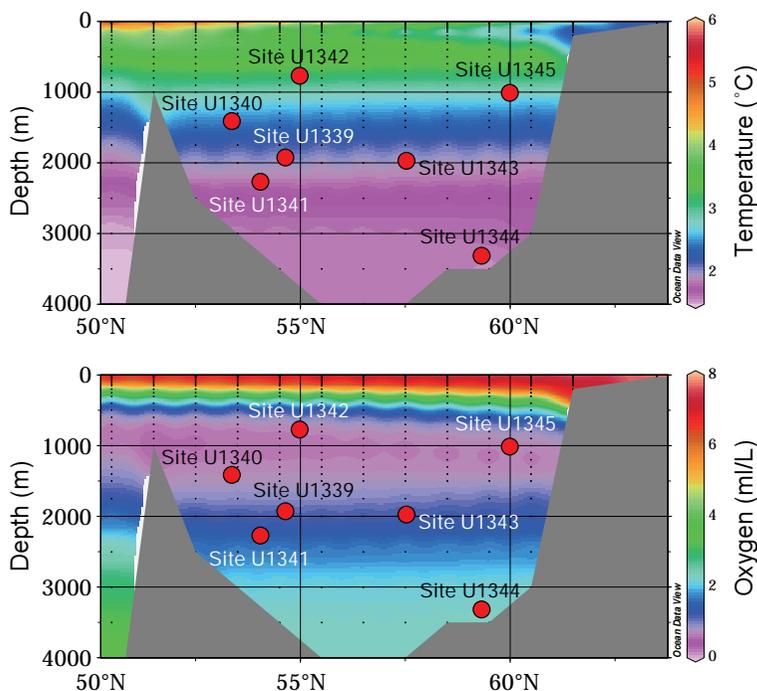


図7 夫々のベーリング海掘削水深相当の180°子午線を横切る現在の溶存酸素濃度の鉛直断面図(データはWorld Ocean Atlas (2005a,b)を使用; 図はOcean Data Viewを用いた) (Takahashi *et al.*, 2011a,b).

スロープの方が高いことが期待される。ミランコビッチ周期の過去約100万年間での3つのサイト(U1341, U1343, U1345)の比較を、海水指標の珪藻種を用いて見てみよう。陸棚スロープでは海水指標珪藻種が全珪藻の約20~70%なのに対し、パウアーズ海嶺では約5~30%の幅で変動した(図6)。最終氷期極大期では陸棚スロープ海域が季節海水で覆われたのに対し、パウアーズ海嶺ではDrift Iceと呼ばれる比較的氷の少ない海域であったことがピストンコアを用いた先行研究でも分かっている(Katsuki and Takahashi, 2005)。最終氷期以前の氷期でも似た様な海水分布があったと思われるが、詳細は今後の高解像研究の結果に期待が持たれる。

6. ラミナ層と過去9万年間の高解像古海洋学

現在の溶存酸素濃度極小値の水深1000m付近のサイトを含め、著しく多くのラミナ層が見られた(図2, 7)。水深3200mのSite U1344でもラミナ層が見つかっていることから、過去の特定時期に

は貧酸素/無酸素環境が、幅広い水深層で存在した事がわかる。

最近の高解像研究の代表例の一つを紹介しよう。カリフォルニア大学サンタクルツ校のSchlungらは、ラミナ層を含む過去9万年間の堆積物の変動詳細を追った。使用した試料は、パウアーズ海嶺のサイトU1340のラミナ層を含む堆積物で、以下の計測パラメーターを駆使して解析を行った: 堆積物密度, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, アルケノン, C-14年代, 珪藻種 (Schlung *et al.*, 2013)。ラミナ層を含む9万年間の堆積物密度の記録を精査した結果、数千年周期のダンシュガード・オシュガー変動が観察された。サイトU1340のインターステディアル期は、3~5°Cの水温上昇と湧昇流にもたらされた生物生産増加と底層の低酸素化によって特徴付けられる。ベーリング海中層水生成は、氷期・間氷期の時間スケールで変動した。低塩分且つ現在の溶存酸素濃度を超える若い中層水の生成は、約6万年前から融氷期の開始時期まで卓越した。サイトU1340における約1.47~1.28万年前のポー

リングーアレロッド期 (Bølling-Allerød) には、脱窒を伴う高生物生産とラミナ層の堆積が見られた。浮遊性と底性有孔虫を組み合わせた放射性炭素 14 による年代測定結果によると、より盛んな中層水のベンチレーションが起こっていた事が分かる。これは、ボーリングーアレロッド期にはベンチレーションと低酸素化が別のプロセスで変動したことを示す。我々のデータは、ボーリングーアレロッド期における中層水生成海域での生物生産変動が、北太平洋広域に分布する無酸素層に貢献したことを物語っている (Schlung *et al.*, 2013)。

7. おわりに

2009 年夏の Expedition 323 ベーリング海掘削・コアリング航海では、7 サイトでの APC コアを多く含む計 660 本、総延長 5741 m の高品質堆積物コアを成功裡に収集した。これらの高堆積速度で集積した堆積物試料は、過去 500 万年間の高解像研究を可能とした。鮮新世~更新世にかけての比較的温暖で鉛直混合の盛んな著しく富栄養な環境から、徐々に起きた気候の寒冷化と共に海水の出現を経験し、表層水塊の成層化を見るようになった。鮮新世では、北太平洋の表層水がベーリング海により多く流入していた。これに対し、後の表層水流入の減少により縁辺海化する傾向は、北半球氷床の発達とも歩調が合っており、海水の出現の起因の一つでもある。ミランコビッチ気候変動期の高解像環境研究では、10 万年を下回る特徴的な短周期の生物生産力の変動が見られた。この 4 万年周期の生産活動の主因は、4.1 万年周期の北緯 65° の夏期日射量の変動とも近似している。ラミナ層を含む過去 9 万年間の高解像古海洋学研究所の事例では、インターステディアル期における 3-5°C の水温上昇と湧昇流による生物生産増加と底層の低酸素化を示した。現在よりも高濃度の溶存酸素を含む低塩分中層水の生成は、約 6 万年前から融氷期の開始時期まで卓越した。約 1.47 - 1.28 万年前のボーリングーアレロッド期には、脱窒を伴う高生物生産とラミナ層の堆積を見た。この時期には中層ベンチレーションと底層低酸素化が別

のプロセスでもたらされた。また、ボーリングーアレロッド期の中層水生成海域での生物生産変動が、北太平洋広域に分布する無酸素層に貢献したことが示された。

Expedition 323 で代表されるベーリング海古海洋研究は、現在進行中で数々の新たな情報が日新月异歩着実に積み重ねられている。更なる今後の成果に期待したい。

8. 謝辞

Expedition 323 の乗船研究者 34 名 (下記参照) および陸上研究者には、多大な協力を頂き感謝する。特に、筆者と共に Co-Chief Scientists として Expedition 323 を統率し、航海後も常に Expedition 323 研究に尽力されたカリフォルニア大学サンタクルツ校 Christina Ravelo 教授には、厚く御礼申し上げる。Texas A & M 大学 IODP の Carlos Alvarez Zarikian 博士には、Expedition 323 Project Manager/Staff Scientist として絶大なる努力をして頂いた。深く感謝する。更に、Texas A & M 大学 IODP における多くの関係者には、Expedition 323 に必須であった掘削船 JOIDES Resolution 号の運営ならびに IODP Proceedings 323 の出版に関して多大な尽力を頂いた。また、高知大学海洋コア総合研究センターでは、ベーリング海で得られた 660 本のコアのキュレーションに尽力いただいている。キュレーターの Lallan Gupta 博士はじめ多くの関係職員には、それぞれ 1 週間を超える 2 度に渡る高知大学でのサンプリング (合計約 6 万個の試料分取) 期間中と準備、その後の作業に協力頂き深く感謝する。

9. IODP Expedition 323 乗船科学者 (乗船時所属研究機関)

Co-Chief Scientists : Kozo Takahashi (Kyushu U), and Ana Christina Ravelo (U Calif, Santa Cruz, USA) ; Project Manager / Staff Scientist : Carlos Alvarez Zarikian (Texas A&M U, USA) . Ivano Aiello (Moss Landing Marine Lab., USA) , Hirofumi Asahi (U Tokyo) , Greta Bartoli (ETH-Zurich, Switzerland) ,

Beth Caissie (U Massachusetts, Amherst, USA) ,
 Muhong Chen (Chinese Academy of Sciences, PRC) ,
 Elena Colmenero-Hidalgo (U Salamanca, Spain) ,
 Mea Cook (Williams College, USA) , Kelsie Dadd
 (Macquarie U, Australia) , Gilles Guèrin (Columbia
 U, USA) , Youngsook Huh (Seoul Nat. U, Korea) ,
 Katrine Husum (U Tromso, Norway) , Akira Ijiri
 (JAMSTEC), Minoru Ikehara (Kochi U), Sev Kender
 (British Geol. Survey, UK) , Tanzhuo Liu (Columbia
 U, USA) , Steve Lund (U Southern California, USA) ,
 Christian März (Carl von Ossietzky U., Oldenburg,
 Germany), Alan Mix (Oregon State U, USA), Maheswar
 Ojha (Nat. Geophys. Res. Inst., India), Makoto Okada
 (Ibaraki U), Yusuke Okazaki (JAMSTEC), Jonaotaro
 Onodera (Kochi U) , Catherine Pierre (U Pierre et
 Marie Curie, France) , Taoufik Radi (U Québec,
 Montréal, Canada) , Risgaard-Petersen (Aarhus U,
 Denmark) , Tatsuhiko Sakamoto (JAMSTEC) , David
 Scholl (U Alaska Fairbanks, USA) , Heather Schrum
 (U Rhode Island, USA) ,Zuzanna Stroynowski
 (LNEG-UGM, Portugal) , Emily Walsh (U Rhode Is-
 land, USA) , and Laura Wehrmann (Max Planck Inst.
 Marine Microbiology, Germany)

参考文献

[1] Huybers, P., 2006. Early Pleistocene Glacial Cycles and the Integrated Summer Insolation Forcing. *Science* 313 (5786), 508-511. 10.1126/science.1125249, 28 July 2006.
 [2] Iwasaki, S., K. Takahashi, Y. Kanematsu, H. Asahi, J. Onodera, A. C. Ravelo. Paleoproductivity and paleoceanography of the last 4.3 Myrs at IODP Expedition 323 Site U1341 in the Bering Sea based on biogenic opal content. *Deep-Sea Res. II*, submitted.
 [3] Kanematsu, Y., K. Takahashi., S. Kim., H. Asahi., and B.-K. Khimc. 2013. Changes in biogenic opal productivity with Milankovitch cycles during the last 1.3 Myrs at IODP Expedition 323 Sites U1341, U1343, and U1345 in the Bering Sea. *Quaternary International*, 310, 213-220, doi.org/10.1016/j.quaint.2013.06.003.
 [4] Katsuki, K., Takahashi, K., 2005. Diatoms as paleoenvironmental proxies for seasonal productivity, sea-ice and surface circulation in the Bering Sea during the late Quaternary. *Deep-Sea Research II* 52, 2110-2130. doi:10.1016/j.dsr2.2005.07.001.
 [5] Kawabata, H., Sato, K., Tatsumi, Y., Scholl, D. W., Takahashi, K., and the Expedition 323 Scientists. 2011. Description of basement volcanic sequences in Holes U1342A and U1342D on Bowers Ridge in the Bering Sea.

In Takahashi, K., Ravelo, A.C., Alvarez Zarikian, C.A., and the Expedition 323 Scientists, Proc. IODP, 323: Tokyo (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi:10.2204/iodp.proc.323.110.2011.
 [6] Lisiecki, L.E., Raymo, M. E., 2005. A Pliocene- Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography* 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.
 [7] Mudelsee, M., Raymo, M.E., 2005. Slow dynamics of the Northern Hemisphere glaciations. *Paleoceanography* 20, PA4022, doi:10.1029/2005PA001153.
 [8] Onodera, J., K. Takahashi, R. Nagatomo. Diatoms, silicoflagellates, and ebridians at Site U1341 on the western slope of Bowers Ridge, IODP Expedition 323. *Deep-Sea Research II. Special Volume*, in press.
 [9] Sancetta, C., 1982. Distribution of diatom species in surface sediments of the Bering and Okhotsk seas. *Micropaleontology* 28, 221-257.
 [10] Schlung, S. A., A. C. Ravelo, I.W. Aiello, D. H. Andreasen, M. S. Cook, M. Drake, K. A. Dyez, T. P. Guilderson, J. P. LaRiviere, Z. Stroynowski, and K. Takahashi. 2013. Millennial-scale climate change and intermediate watercirculation in the Bering Sea from 90 ka: A high-resolution record from IODP Site U1340. *Paleoceanography*, Vol. 28, 1-14, doi:10.1029/2012PA002365, 2013.
 [11] Stabeno, P.J., Schumacher, J.D., and Ohtani, K., 1999. The physical oceanography of the Bering Sea. In Loughlin, T.R., and Ohtani, K. (Eds.), *Dynamics of the Bering Sea: A Summary of Physical, Chemical, and Biological Characteristics, and a Synopsis of Research on the Bering Sea: Fairbanks (Univ. Alaska Sea Grant)*, 1-28.
 [12] Takahashi, K., R. W. Jordan, and D. Boltovskoy, Guest Editors. 2005. *Deep-Sea Research II Special Volume, Paleocceanography of the Bering Sea and adjacent regions*, 52(16/18), 2079-2364. doi:10.1016/j.dsr2.2005.08.002.
 [13] Takahashi, K., Ravelo, A. C., and Alvarez-Zarikian, C. A., 2009a. Pliocene-Pleistocene Paleocceanography and Climate History of the Bering Sea. *IODP Sci. Prosp.*, 323. doi:10.2204/iodp.sp.323.2009, 111 pp.
 [14] Takahashi, K., Onodera, J., Katsuki, K., 2009b. Significant populations of seven-sided *Distephanus* (Silicoflagellata) in the sea-ice covered environment of the central Arctic Ocean, summer 2004. *Micropaleontology* 55, 313-325.
 [15] Takahashi, K., Ravelo, A. C., Alvarez Zarikian, C. A., and the Expedition 323 Scientists, 2011a. Proc. IODP, 323: Tokyo (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi:10.2204/iodp.proc.323.2011.
 [16] Takahashi, K., A. C. Ravelo, C. A. Alvarez Zarikian and the IODP Expedition 323 Scientists. 2011b. IODP Expedition 323 Pliocene and Pleistocene paleocceanographic changes in the Bering Sea. *Scientific Drilling*, No. 11, 4-13. doi:10.2204/iodp.sd.11.01.2011.
 [17] Wehrmann, L. M., N. Risgaard-Petersen, H. N. Schrum, E. A. Walsh, Y. Huh, M. Ikehara, C. Pierre, S. D'Hondt, T. G. Ferdelman, A. C. Ravelo, K. Takahashi, C. Alvarez Zarikian and the IODP Expedition 323 Scientific Party. 2011. Coupled organic and inorganic carbon cycling in the deep seafloor sediment of the northeastern Bering Sea Slope (IODP Exp. 323). *Chemical Geology*, 284, 3-4, 251-261. doi: 10.1016/j.chemgeo.2011.03.002.

