



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	オホーツクにおける海底堆積物コアの海水起源堆積物（漂流岩屑）を用いた過去の海水変動の復元
Author(s)	坂本, 竜彦; Sakamoto, Tatsuhiko
Description	2章 千年～10万年スケールの気候復元とモデリング
Citation	低温科学, 65, 103-114
Issue Date	2007-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/20459
Type	departmental bulletin paper
File Information	SAKAMOTO.pdf





オホーツクにおける海底堆積物コアの海水起源堆積物(漂流岩屑)を用いた過去の海水変動の復元

坂本 竜彦 海洋研究開発機構

海底堆積物には過去の地球の様々な変動が記録されている。現在の地球環境については直接観測することによって把握することができるが、長い時間スケールの環境変動を把握するためには、堆積物コアなどの記録の環境プロクシーを駆使して研究する必要がある。過去の海水の変動は漂流岩屑のような海水プロクシーを使って復元することができる。オホーツク海において衛星観測およびセディメントトラップ観測によって、海水を起源とする漂流岩屑の堆積プロセスを明らかにした。漂流岩屑は春に海水が融解するとき、砂以上のサイズの粒子群として沈積する。オホーツク海底から得られた3本の堆積物コアの解析から過去10万年間の海水の変動が明らかになった。海水は2万～4万年周期の氷期に増加し、さらに数千年規模で拡大縮小を繰り返す。オホーツク海水拡大イベントは地球規模の寒冷イベントに同調し、北極域の大気循環の強化がその要因である。

1. はじめに

1.1 海底堆積物コア解析による過去の気候・海洋変動の研究

海底堆積物は、海洋表層・中層・底層に生息する生物の遺骸や陸上から運搬された砕屑物で構成される。長い時間をかけて連続的に堆積した海底堆積物を柱状コア上に採取し、これを連続的に解析することで、人間が観測できる期間よりもはるかに長い時間の過去の地球の気候や海洋の変動を解析することが可能である。このような学問分野を、現在の海洋を対象とする海洋学(Oceanography)や気候学(Climatology)に対応して、古海洋学(Paleoceanography)、古気候学(Paleoclimatology)とよぶ。

海底堆積物は、長い時間をかけて沈積した粒子の集合体の空間系列であるので、これを時系列記録として読み取るためには、その年代を決定する必要がある。この年代決定を取り扱う学問分野(もしくは学問方法)を層序学(stratigraphy)とか年代学(chronology)という。これまでに、加速器質量分析計による放射性炭素年代測定法、光ルミネッセンス年代測定法、鉛・セシウム年代測定法、古地磁気層序法(特に、古地磁気強度曲線、excursion 対比法)、地球軌道要素年代較正法、ラミナカウント法、放射性元素による絶対年代測定法、酸素同位体比層序法、火山灰層序法、微化石層序法、岩相層序法など、多数の方法論が開発され、これら複数の手法を組み合わせる(クロスチェック)ことにより、最近では、より精密で高精度の時間目盛りを得ることができるようになった。

1.2 環境プロクシー

現在の種々の地球の観測では、温度、湿度、塩分濃度、元素の濃度などの計測値によって「直接観測」される。過去の環境については、大気や海水や生物そのものはすでに存在しないので、直接観測は不可能である。このため、堆積物等に残されている「痕跡」をもとに過去の環境を復元する、「間接観測」を行う(図1)。このときに使われる痕跡を、環境プロクシー(Environmental proxy)と呼ぶ(環境指標、代替指標、等とも呼ばれる)。環境プロクシーは、一般に、ある程度定量的な数値や状態値などとして取りあつかえる場合に使用され、相対的な寒暖とか大小などを定性的に復元する場合には、単に指標(index)という事が多い。

環境プロクシーは、実験的に決める方法、観測的に決める方法、経験的に聞ける方法などがある。実験的に決める方法は、温度と特定の元素濃度や組成との回帰式を実験的に求め、堆積物中の対象元素の濃度や組成を測定し、これを回帰式に入力することで海洋表層水温を求め、などの方法である。たとえばアルケノン表層水温推

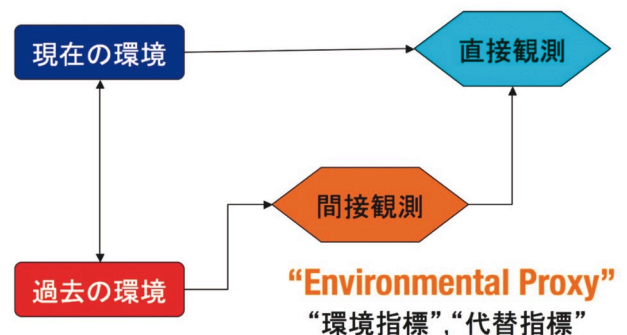


図1：環境プロクシーの概念

定法などがある。観測的に決める方法としては、水温、塩分濃度などの海洋観測値と沈降粒子の特徴をの関係式を求めるセディメントトラップ (Sediment trap) 法や、直下の海底堆積物の粒子の特性 (たとえば微化石群集) との関係を導く、モダンアナログ (Modern Analogue) 法などがある。経験的に求める方法は、たとえば、生息環境のある程度わかっている微古生物群集をつかって相対的な寒暖の指標などを得る手法がある。

環境プロクシーをつかって過去の環境を復元し、復元された環境値の評価をする際、該当する環境プロクシーがどのような方法で構築されたのか、定量的指標である場合には誤差や精度がどの程度かを、使用する側も読み取る側もよく把握・検討する必要がある。

2. 過去の海水変動をいかに復元するのか?

2.1 地球システムにおける海水の役割

海水は、地球の気候システムにおいて重要な役割を果たしている。第一に、海水は、高いアルビド (albedo) をもつため、太陽光線を海洋表層で反射するため、寒冷化に対する正のフィードバック (feedback) 機能を持つ。正のフィードバックという意味は、海水がいったん形成されると、太陽光線は海洋を暖めることができなくなり、どんどん寒冷化を助長するということである。第二に、海水は大気と海洋の間に存在するので、大気-海洋間の熱の循環を遮断するので、これまた寒冷化に対する正のフィードバック (feedback) 機能を持つことになる。第三に、海水形成は、地球規模、海盆規模の熱塩循環 (thermohaline circulation) に決定的な役割を果たす。熱塩循環とは、海水の温度・塩分の差 (結果として密度) によって発生する海洋循環のことである。海水形成とともに形成される高塩分・低温の水 (ブライン水, brine water) は、密度が高いために海洋の中層・深層に沈み込む。したがって海水の消長は海洋の熱塩循環の駆動に重要な役割を担っている。

2.2 海水プロクシー

季節~数十年スケールの海水の変動は、衛星、飛行体、電波観測、海洋調査などにより直接観測される。海水は、長期にわたって存続する大陸氷床と異なり、環境変化に敏感に反応して、消長を繰り返す。衛星観測に基づく現代観測でも、海水の拡大面積は経年変化することが知られている。一方、百年スケール以上の長期時間スケールにおける過去の海水の変動は、海水そのものが現存しないため、海洋堆積物に記録された「海水の痕跡」をもとに復元、解析することになる。このために使われるのが

海水プロクシーである。

海水プロクシーには、漂流岩屑 (ice-rafted debris: IRD, ice-rafted material: IRM と呼ばれることもある)、水生藻類 (ice algae) などがある。本稿では漂流岩屑を取り扱う。水生藻類とは、海水の内部または表面に生息する植物プランクトンのことである。特に珪藻の場合、その殻が珪素質 (オパール) であるため堆積物に残りやすく、この相対的な含有比を用いて、海水復元を行うことができる (Okazaki et al., 2005 など)。これらを海水指標種とよぶ。現在、海水指標種を起源とする有機物に基づく環境プロクシー (バイオマーカー: biomarker という) や、陸上起源粒子の希元素同位体比による環境プロクシーなどの開発も発展途上である。

2.3 漂流岩屑 (IRD) とは?

大陸氷河はその底面において陸上の碎屑物 (シルト, 砂, 礫岩) などを削剝し、その内部に取り込むことがある (図2)。氷河は海洋に張り出し、棚氷となる。棚氷の縁辺では氷が崩れ、氷山となって海洋に漂流する。海水はその形成時に大陸棚上で混濁している碎屑物を取り込んだり、沿岸に接岸する時に陸上の岩石を削剝したり取り込んだりし、漂流する。こうして、氷山や海水は陸上起源の碎屑物をその内部にとりこんだまま、陸から遠く離れた遠洋域まで漂流する。この氷が遠洋で溶解すると、その内部に閉じこめられた粒子群は開放され、静かに海底にむかって沈降し、海底堆積物の中に堆積する。海底堆積物の中に見いだされる、海水起源と考えられる粒子群を、漂流岩屑 (IRD) と呼ぶ (図3)。礫サイズ以上の粒子は、氷礫 (ドロップストーン: Dropstone) とも呼ぶ。数 cm~数 m の粒子が見つかることもある。

一般に、遠洋の海底堆積物は一般に粒子径が小さく、粘土~シルトサイズである。海底堆積中の陸上起源碎屑粒子は、海流や潮汐の影響を受けて堆積した場合、上方に向かって粒子径が細くなる級化構造 (grading) を示

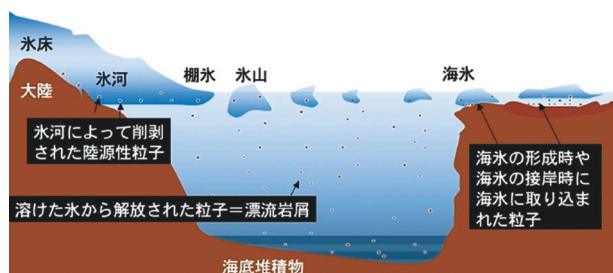


図2: 漂流岩屑 (Ice rafted debris: IRD) の概念図。漂流岩屑とは、陸上または沿岸域の陸上起源碎屑物 (シルト, 砂, 礫) が氷山や海水などによって遠洋に運搬され、その氷が融解する際に開放され、海底堆積物に沈積した粒子群を指す。礫サイズ以上のものは氷礫 (ドロップストーン) とも呼ぶ。

すなど何らかの堆積構造を示す場合が多い。高緯度域の海底堆積物コアで、堆積構造が全く見られず、粘土～シルトサイズの堆積物の中に、砂～礫サイズの粒子が、単独で隔離されたようにポツンと存在したり、複数で無秩序に散乱するように存在したりする場合には、これを漂流岩屑と判断する。高緯度域の半遠洋～遠洋の堆積物中に存在する粗い粒子群は、その運搬メカニズムとして漂流氷以外にはない、ということがその根拠である。

漂流岩屑とは粘土～礫までの様々なサイズ、種類の粒子の総称である。多くの研究では、 $150\ \mu\text{m}$ ～ $200\ \mu\text{m}$ 以上の粒子群を漂流岩屑とする場合が多いが、自然界において海水や氷山が選択的に粗い粒子群を取り込むわけではなく、あくまでも便宜的なものである。漂流岩屑の存在は、その堆積物コアが採取される地点まで水が拡大し、その地点で溶けたことを示す貴重な証拠である。ただし、粒子径や構成粒子組成などは海域によって異なる。このため、海域毎の漂流岩屑の堆積プロセスの基礎研究が不

可欠である。

3. オホーツク海における現在の漂流岩屑堆積プロセス

3.1 北半球でもっとも低緯度の季節海水域であるオホーツク海

オホーツク海は北半球において最も低緯度まで広がる最大の季節海水域である。オホーツク海における海水は平均的には11月ごろに北部域で形成が開始し、形成された海水は主に冬の強い風に駆動されて南方向に漂流する。海水が流れ去ったあとには、氷のない領域、ポリニア (polynya) が形成され、そこで新しい海水が形成される。このプロセスが繰り返されることで、オホーツク海に海水が拡大していく。平均的には海水は3月には最大拡大期となり6月ごろに消失する。衛星観測に基づくと、オホーツク海の海水の最大拡大面積や海水拡大期間には

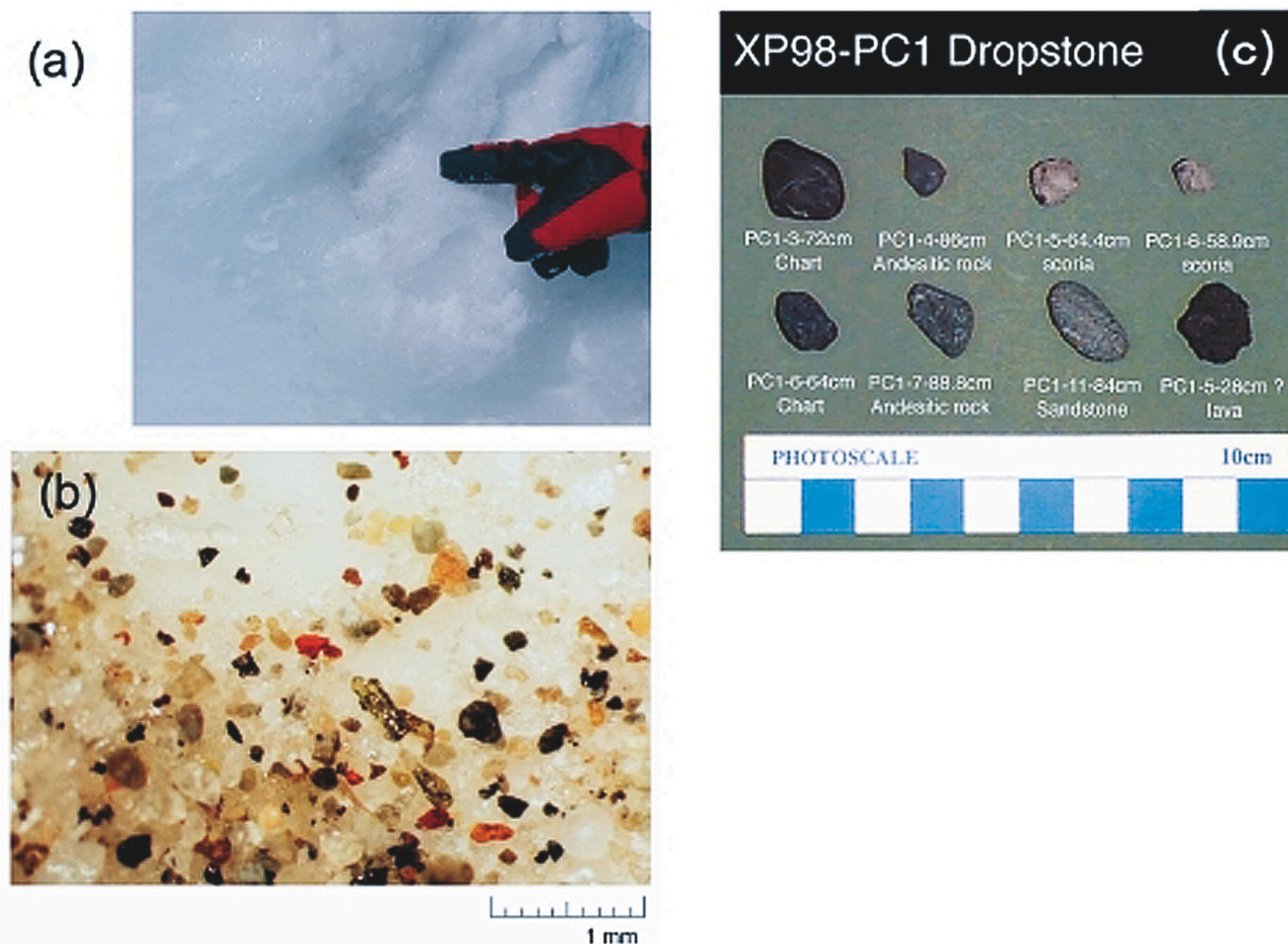


図3：漂流岩屑 (Ice rafted debris: IRD) の例。(a)オホーツク海の海水断面に認められる碎屑粒子群 (北海道紋別沖)。(b)オホーツク海中央部の海底堆積物から採取されたシルト～砂サイズの漂流岩屑。(c)オホーツク海東部の海底堆積物から採取された礫サイズの漂流岩屑 (ドロップストーン)

経年変動が認められる (Parkinson et al, 1987; Alfulis and Martin, 1987; Wakatsuchi and Martin, 1991; Gloerson et al., 1992 など)。また、オホーツク海で形成される中層水は、北太平洋中層水 (North Pacific Intermediate Water: NPIW) の一つの起源 (Talley, 1991; Watanabe and Wakatsuchi, 1998)、氷期における太平洋深層水の起源 (Duplessy et al., 1988; Talley, 1991; Zahn et al., 1991; Keigwin et al., 1992; Itou et al., 2003) と考えられている。したがって、オホーツク海は、海水と気候の関係に関し、現在の環境はもとより、より長い時間スケール (たとえば、ミランコビッチ周期やダンスガード・エシュガー周期) の環境変動の解明に重要な鍵

を握っている (e.g., Takahashi, 1998)。

3.2 セディメントトラップ実験によって観測された漂流岩屑の沈降プロセス

オホーツク海における海水と漂流岩屑の関係を探る機会が、戦略的基礎研究「オホーツク海水の実態と気候システムにおける役割の解明 (平成9年~14年度)」において与えられた。同研究で、オホーツク海のサハリン沖の2地点 (M4, M6) において、セディメントトラップが2年間 (1998年8月~2000年7月) 係留された。

水深300mに設置されたトラップに確保された沈降粒子束の中に含まれる陸上起源砕屑粒子の時系列変動を解析した (図4, 5) (Sakamoto et al., 2005)。沈降粒

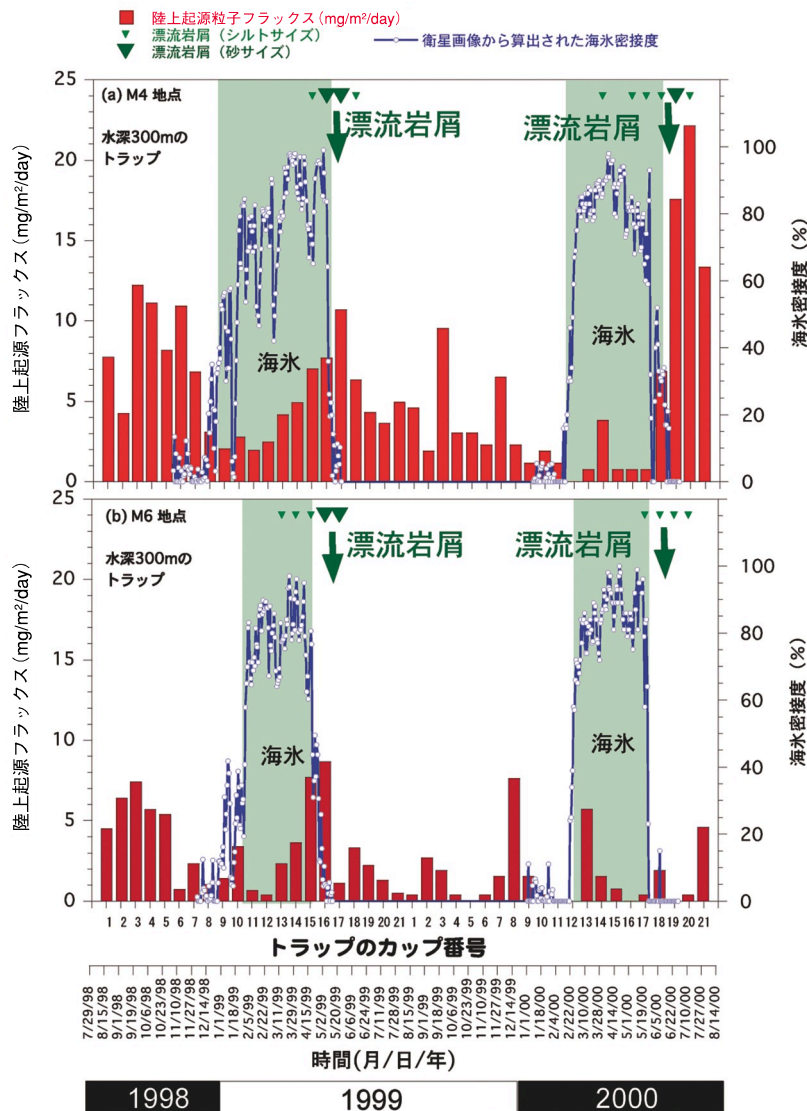


図4：オホーツク海でのセディメントトラップ実験における陸上起源粒子フラックスの変動。サハリン島沖の2地点(a)M4地点、(b)M6地点、において、1998年8月から2000年7月まで時系列セディメントトラップが係留された。この図では、水深300mに設置されたトラップの結果を示している。棒グラフは生物起源粒子や有機物質を取り除いた後の陸上起源粒子のみの全フラックス量を示す。▼印は濾過後のフィルター上に認められたシルト~砂サイズの粒子の確認されたカップを示す。海水密度度はDMSM/Iの明度から改良型NASAアルゴリズム (Kimura and Wakatsuchi, 1999) で計算された。

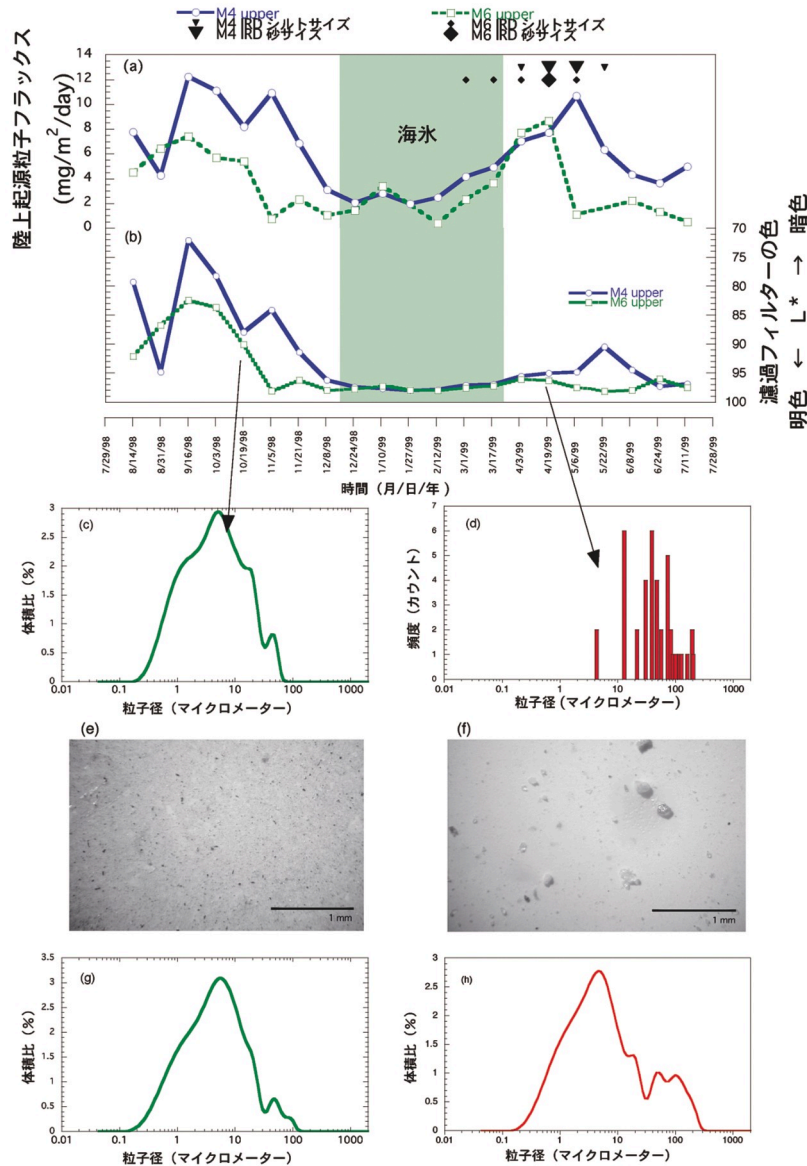


図5：オホーツク海でのセディメントトラップ実験について1998年8月から1999年8月までの詳細分析結果。(a)M4およびM6地点における陸上起源粒子の全フラックス量。▼印は濾過後のフィルター上にシルト～砂サイズの粒子の確認されたカップを示す。(b)濾過後のフィルタ表面の可視領域拡散分光反射能測定結果。秋のフラックスは春のフラックスに比べて暗色である。(c)秋のフラックスの粒度分析(レーザー回折)結果。(d)春のフラックスの粒度分析(カウンティング)結果。(e)秋のフラックスのデジタル画像。(f)春のフラックスのデジタル画像。(g)海底堆積物コア中の間氷期の陸上起源粒子の粒度分布。(h)海底堆積物コア中の氷期の陸上起源粒子の粒度分布。

子束中の陸上起源粒子フラックス総量は、明瞭な季節変化を示す(図4)。2年間を通してのフラックス総量を平均で見ると、M6地点(4.1 mg/m²/day)よりもM4地点で多い(5.5 mg/m²/day)。極大値で見ると、M4地点における秋のフラックスは1998年には12.2 mg/m²/day、1999年には9.5 mg/m²/day、春のフラックスは1999年に10.7 mg/m²/day、2000年には22.1 mg/m²/dayである。2つの地点における陸上起源フラックスにどのような粒子群が含まれているのかを1998年8月から1999年8月までの1年間について詳細に調べると、春

と秋のフラックスには明瞭な相違が認められる(図5)。相違点は、濾過フィルターに吸引濾過した粒子全体の拡散分光反射能(色)、粒子径分布、粒子組成に認められる。1999年春のフラックスの濾過フィルターは相対的に白く、フラックスは角張ったシルト～砂サイズの粒子から構成され、粘土サイズの粒子は極端に少ない。シルト～砂サイズの粒子は、主に石英、長石類から構成されている。一方、秋のフラックスの濾過フィルターは相対的に黒く、フラックスは粘土～シルトサイズの粒子から構成され、砂サイズの粒子は希である。これらの事実は、春のフラッ

クスが明瞭に粗く、海水融解時に海水から解放された陸上機源粒子、つまり、漂流岩屑であることを示唆する。

セディメントトラップ係留期間における海水の状況は、衛星画像の解析にもとづく海水密度度として把握された(図4)(Sakamoto et al., 2005)。M4地点付近における海水は、1998年の11月中旬に増加をはじめ、1999年の4月下旬まで存続し、5月に急激に消失した。M6地点では、M4地点よりも約2週間おくれで海水が増加、M4地点よりも早く消失した。海水密度度にもとづく海水の状況と比較すると、2つの地点ともに、フラックスは、1999年の冬に海水が形成されている期間に徐々に増加し、1999年春に海水が消失する直後に極大となる。M6地点に比べて、250 km 北方に位置するM4地点では、1999年の春のフラックスのピークは2週間遅れている。これは海水がより長くM4地点で存続したことと整合的である。両地点における2000年冬の海水は1999年にくらべてより急激に消失している。2000年の春には、M4地点だけフラックスの極大が認められる。衛星画像の解析によれば、2000年の6月には、M6地点付近には海水が存在せず、M4地点で急速に消失したことがわかった。このように、春の陸上起源フラックスの増加は、海水の融解と密接に関連していると結論される。

3.3 海底表層堆積物から推測される漂流岩屑の起源

現在の海水の拡大は直接的に観測されており、オホーツク海では北部域で形成される海水が徐々に全域に拡大していく。つまり海水の起源は北部域にある。では、過去の海水もずっと同じであったのであろうか？ 海底表層の堆積物中の漂流岩屑の空間的な分布を調べることで、平均的な状態の漂流岩屑の起源、つまりは、海水の起源を明らかにすることができる。ここで、堆積速度に大きく依存するが、海底のごく表層数 cm の厚さの堆積物は数百年程度の平均値を与えると考えて良い。

海底表層堆積物中の粘土から砂サイズ(0.04~2000 μm)の全粒子分布に対する砂サイズ(63~2000 μm)の粒子フラクションの体積比および鉱物組成を、オホーツク海全域について空間的に分析すると、非常に明瞭な特徴が浮かび上がる(Sakamoto et al., 2005)。砂サイズの粒子フラクションの体積比は、オホーツク海北部および西部域では5%以上となり、現在の平均的な冬の海水分布域(海北部および西部域)と正の相関がある。一方、現在は冬でも結氷域とならない東南部域では1%に満たない。この結果から、海底堆積物中で砂サイズの粒子フラクションの体積比が5%以上の場合は、平均的に海水が拡大した、と定義することが可能となる。砂サイズ粒子の鉱物組成で見ると、オホーツク海北部および西部域

で特徴的に長石類(feldspars)粒子が優勢となる。したがって、長石類鉱物の含有比は漂流岩屑の起源についての情報を与える。カムチャッカ半島および千島列島付近の海底堆積物には特徴的に角閃石(hornblende)粒子に富む。これは火山弧にある火山岩を起源とする粒子が海水により運搬された事を意味する。結論的に、海水は過去においても主に北部域で形成され、漂流し、拡大していた。また漂流岩屑を見る限りにおいて、一部カムチャッカ半島を起源とする運搬経路が推測される。

4. オホーツク海における過去10万年間の海水変動

4.1 オホーツク海で得られた海底堆積物コア

戦略的基礎研究「オホーツク海水の実態と気候システムにおける役割の解明(平成9年~14年度)」において、オホーツク海中央部東西方向で3本の海底堆積物コアが得られた。XP98-PC1(全長1010.0 cm, 採取水深1107 m), XP98-PC2(全長1023.0 cm, 採取水深1258 m), and XP98-PC4(全長1128.0 cm, 採取水深664 m)。堆積物は、共通して暗オリーブ色の無構造または生物擾乱された珪藻質粘土質シルトである。火山灰層が何枚か認められ、また、2 mm以上の直径の水礫が随所に認められた。

3本の海底堆積物コアの年代は、堆積物中の有孔虫殻の酸素同位体比層序、加速器質量分析計による炭素年代測定、火山灰層序、帯磁率曲線の比較による層序対比、などにもとづいて決定され、詳細は、Sakamoto et al., (2005)を参照されたい。結果としてこれらのコアの最深部の年代は約10万年前と決定された。

4.2 オホーツク海における海水プロクシーとしての漂流岩屑

現在の漂流岩屑に関するプロセスの研究から明らかになったことから、過去の海水の変動を復元するために、海水プロクシーとしての漂流岩屑の意味する環境について考察しておくことが必要である。

海底堆積物コア中の粘土から砂サイズ(0.04~2000 μm)の全粒子分布に対する砂サイズ(63~2000 μm)の粒子フラクションの体積比について、間氷期と氷期のそれぞれの堆積物について典型的な例を図6に示す。間氷期の試料は粒子径が0.1~100 μm の範囲で主にシルトと粘土サイズの粒子に富む。これに対し、氷期の試料は、粒子径が0.1~100 μm の範囲で主にシルトと粘土サイズの粒子に加えて、数10~1000 μm の粒子径にもうひとつの粒度分布のピークがある。この結果をセディメントトラップの粒子と比較すると、より鮮明に特徴が把握で

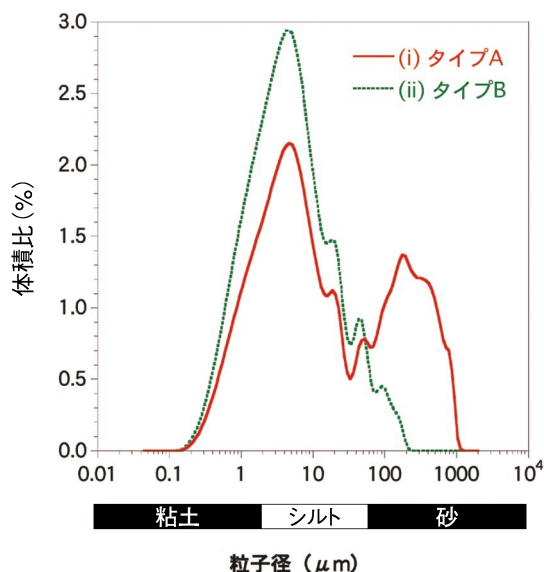


図6：オホーツク海の海底堆積物コア中の陸上起源粒子の典型的な粒度分布。分布はレーザー回折型粒度分析による。(i) タイプA：氷期の試料。(ii) タイプB：間氷期の試料。

きる(図5)。シルトと粘土サイズの粒子に富む間氷期の試料の粒度分布は、セディメントトラップの秋のフラックスの粒度分布に酷似する。また、氷期の試料の数10~1000 μm の粒度分布のピークは、セディメントトラップの春のフラックスの砂サイズの粒子の存在と整合的である。海底堆積物の試料は数十~数百年の平均的状態を意味するので、これらの間氷期、氷期の試料は、セディメントトラップの春と秋のフラックスの数十~数百年の積分された姿である。つまり、間氷期は、相対的に秋のフラックスが多く、氷期には春のフラックスが多かった、と解釈される。

漂流岩屑の存在は、その海底堆積物コアが採取された地点まで海水が到達し、そこで融けたという地理的な証拠である。漂流岩屑の含有量は、本研究においては63~2000 μm の砂サイズ粒子の全粒度分布に対する相対的体積比と定義され、表層堆積物の研究から、体積比が5%以上の時、優位な海水分布を示すと定義される。ただし、「漂流岩屑が多い」すなわち「海水が多い」という古海洋環境的な意味は、海水被覆期間が長い、海水生成率が高い、海水が厚い、かいずれかまたは複合的な意味である。また、漂流岩屑が海底堆積物中に発見される場合は、必ず海水が融けた、ということの意味し、オホーツクのような季節海水域の場合には、漂流岩屑の量的な増加は海水の増加と解釈される。

一方で、漂流岩屑見つからない、という場合、海水が全くない、という状態と、海水が万年氷として融けない(だから漂流岩屑も解放されない)、という2つの環境状

態が想定されるので注意が必要である。現在までのところ、オホーツク海では、最終氷期においても漂流岩屑が多数発見されるので、最終氷期においてもオホーツク海(少なくとも中央部)は季節海水域であり、漂流岩屑が極端に少ないまたは見つからない間氷期は、相対的には海水の少ない時期であると考えられる。北極海域チャクチ海における我々の研究では、暖かい間氷期に漂流岩屑が多く、寒い氷期には極端に少ないまたは発見されないという結果が得られている。チャクチ海の場合は、間氷期には季節海水域、氷期には万年海水域であったと推定される。このように海域によって、漂流岩屑の意味する環境は異なる場合があるので、海域事の堆積プロセスの研究が必要不可欠であり、また、環境プロクシーの解釈には注意が必要である。

4.3 オホーツク海における過去10万年間の海水変動

3本の海底堆積物コア中の漂流岩屑の変動から、オホーツク海における過去10万年間の海水変動を復元することができる(図7)。

過去のオホーツク海における海水状況は以下の4つに分類することができる。海水最大拡大期(モードI)：同時期のすべての海底堆積物コア中に漂流岩屑が見いだされることで定義される。海水中程度拡大期(モードII)：同時期の海底堆積物コアXP-PC1(東部)とXP-PC2(中央部)中に漂流岩屑が見いだされ、XP-PC4(西部)には見いだされないことで定義される。海水最小拡大期(モードIII)：同時期の海底堆積物コア、XP-PC4(西部)中のみ漂流岩屑が見いだされ、XP-PC1(東部)とXP-PC2(中央部)には見いだされないことで定義される。カムチャッカ海水期(モードExtra)：海底堆積物コアXP-PC1(東部)中のみ漂流岩屑が見いだされることで定義される。漂流岩屑がオホーツク北部域からではなく、カムチャッカ半島または千島列島から運搬されたことを意味する。

過去10万年間、オホーツク海の海水は数万年~10万年の地球規模の気候変動に同調し、また地域的な環境変動によって変動してきた。海水は、特に、寒冷な氷期の期間(酸素同位体比ステージ2と4)、急激かつ短周期で最大拡大期(モードI)となる変動を繰り返してきた。酸素同位体比ステージ5から4への遷移期、約8万年前には海水はオホーツク海西部にのみ見いだされ、その後、中央部、東部への拡大していく。酸素同位体比ステージ4(氷期)後期、約6万年前には、海水は西部から中央部へむかって、酸素同位体比ステージ3の初期と中期に2回の短い拡大期を伴って縮小していく。酸素同位体比ステージ3の中期、約4~5万年前には、最小縮小期

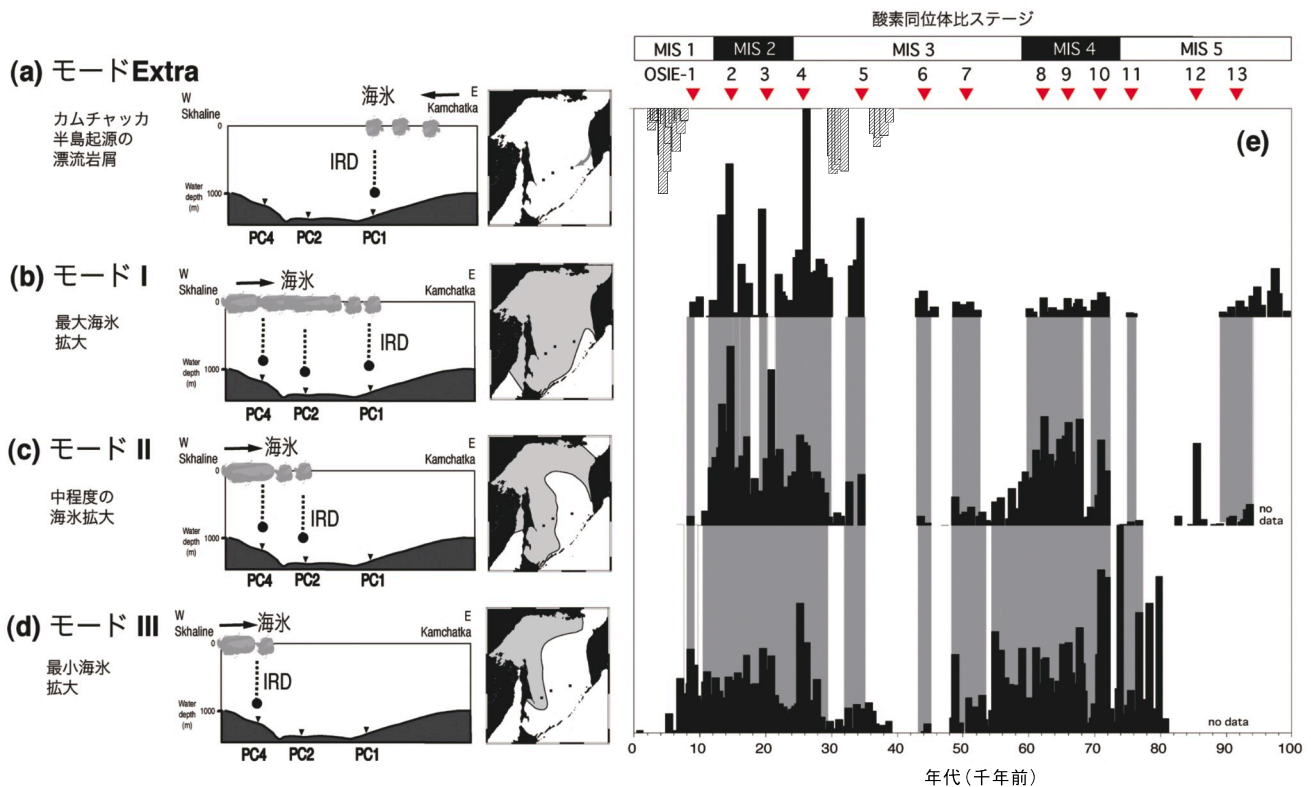


図7：オホーツク海における過去10万年間の海水の時空変動の復元。海水拡大の状況は4つの状態に分類される。(a)海水最大拡大期(モードI)：同時期のすべての海底堆積物コア中に漂流岩屑が見いだされることで定義される。(b)海水中程度拡大期(モードII)：同時期の海底堆積物コアXP-PC1(東部)とXP-PC2(中央部)中に漂流岩屑が見いだされ、XP-PC4(西部)には見いだされないことで定義される。(c)海水最小拡大期(モードIII)：同時期の海底堆積物コア、XP-PC4(西部)中のみ漂流岩屑が見いだされ、XP-PC1(東部)とXP-PC2(中央部)には見いだされないことで定義される。(d)カムチャッカ海水期(モードExtra)：海底堆積物コアXP-PC1(東部)中のみ漂流岩屑が見いだされることで定義される。漂流岩屑がオホーツク北部域からではなく、カムチャッカ半島または千島列島から運搬されたことを意味する。(e)過去10万年間の海水の時空分布。黒色バーは各試料中の漂流岩屑が5%以上含まれる場合に塗色されている。灰色部分は3つの地点で同時に漂流岩屑のピークが認められる層準を示す。斜線バーはコアXP-PC1にのみ漂流岩屑のピークが認められる事を示す OSIE=Okhotsk Sea-Ice Expansion events: オホーツク海水拡大イベント。MIS=marine oxygen isotope stage: 酸素同位体比ステージ。

(モードIII)の状況となる。最終氷期の間、約3万4千～4万年の間には、海水はオホーツク海西部で拡大する。酸素同位体比ステージ2、最終氷期最寒期には、オホーツク全域で海水は最大拡大期となり、また、酸素同位体比ステージ4の水期には見られなかったような鋭い漂流岩屑のピークが東部域で発生する。酸素同位体比ステージ2から1への融氷期には、東部域では、いくつかの鋭いピークを伴いながら、急激に海水が縮小する。急激な西方に向けての海水縮小が約8千年前に発生する。約8千年前以降、オホーツク海中央部では漂流岩屑は見いだされない。

海水は、上記のようなミランコビッチ(数万年)スケールの拡大・縮小の変動ばかりではなく、より末時間時間スケール、数百～数千年の時間スケールで急激で突然拡大する変動を繰り返している。本研究では、このような数百～数千年の時間スケールでの急激で突然の海水の拡大を「オホーツク海水拡大イベント(Okhotsk Sea-ice

Expansion events: OSIE)」と定義した(図7)。海底堆積物コアXP-PC2中の漂流岩屑データのスペクトル解析を行ったところ、オホーツク海水拡大イベントは、4万1千年周期と2万4千年周期基底変動として、約5千～6千年周期(5100年周期、5800年周期を検出)で発生する。オホーツク海水拡大イベントの規模(漂流岩屑変動の振幅)は、北半球に大陸氷床が発達する氷期(酸素同位体比ステージ2と4)では増幅する。

4.4 オホーツク海水拡大イベントの要因

オホーツク海における過去10万年の海水変動は、グリーンランド氷床コアから見いだされたダンスガード・エシュガー(Dansgaard-Oeschger: DO, Dansgaard et al.; 1993, Bond et al.; 1993)変動に同調している(図8)。オホーツク海中央部の海底堆積物コアXP-PC2中の漂流岩屑変動のピークとして表されるオホーツク海水拡大イベントの発生時期は、氷床コアGRIP, GISP2(White et al., 1997; Stuiver et al., 1995; Steig et al., 1994)中の

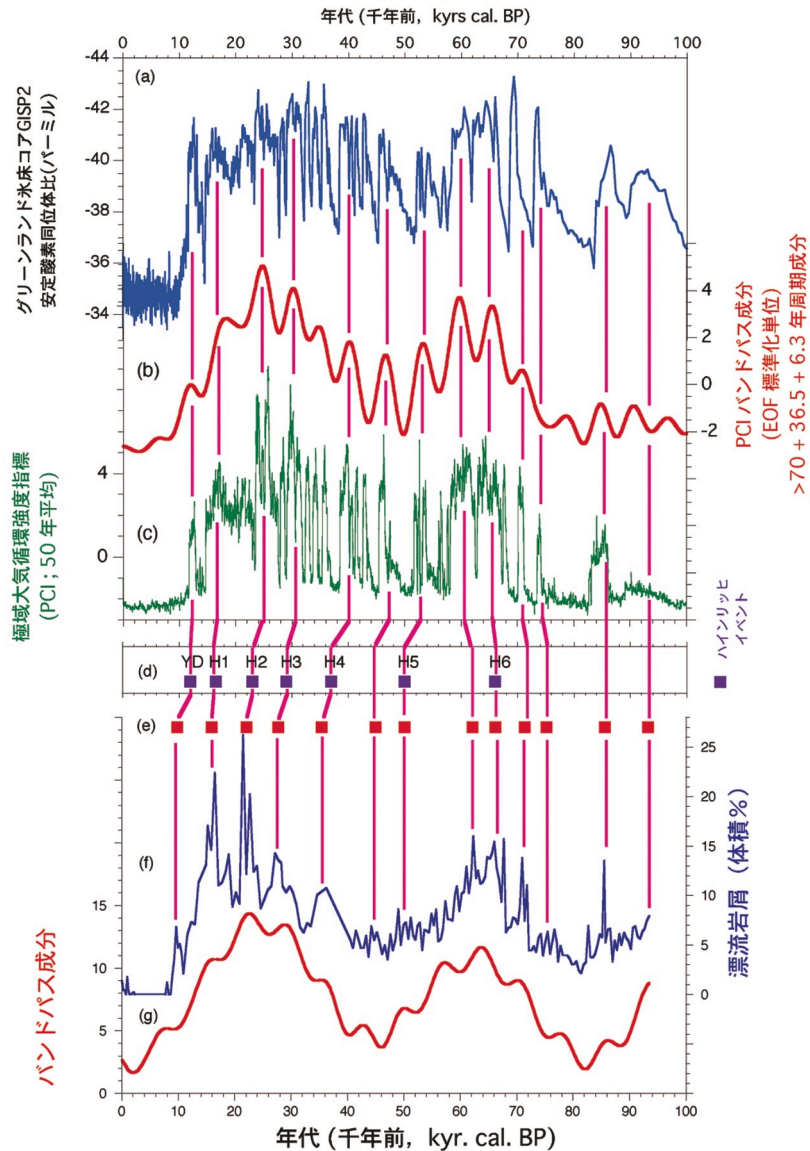


図 8：オホーツク海中央部の海底堆積物コア XP-PC2 における漂流岩屑の変動とグリーンランド氷床コアの変動記録との対応。(a)グリーンランド氷床コア GRIP および GISP2 コアの酸素同位体比曲線 ($\delta^{18}O$) (White et al., 1997; Stuiver et al., 1995; Steig et al., 1994). (b)極域大気循環強度指標 (Polar Circulation Index: PCI) のバンドパス成分 (Mayewski et al.: 1997). (c)極域大気循環強度指標 (Polar Circulation Index: PCI) 成分 (Mayewski et al.: 1997). (d)北部大西洋 DSDP609 地点におけるハインリッヒイベント (Bond et al., 1992). (e)オホーツク海中央部 (Site XP-PC2) におけるオホーツク海水氷拡大イベント (OSIE). (f)オホーツク海中央部 (Site XP-PC2) における漂流岩屑の変動。(g)オホーツク海中央部 (Site XP-PC2) における漂流岩屑の変動のバンドパス成分。本研究における年代 (e, f, g) は氷床コア GRIP および GISP2、ハインリッヒイベント(d)の年代とは独立である。

安定酸素同位体比の負の方向へのシフトとして示される千年スケールの寒冷期(stadials)に対応している。特に、表されるオホーツク海水氷拡大イベントの 78.7, 41.3, 24.0, 5.1 千年周期のバンドパス成分の複合変動のピーク時期は、極域大気循環指標 (the Polar Circulation Index: PCI; Mayewski et al., 1997) の >70, 36.5, 6.3 千年バンドパス成分の複合変動のピークの時期とみごとに対応する。極域大気循環指標は、GISP2 氷床コア中の化学元素の EOF (empirical orthogonal function) 解析

によって得られた、極域の大気循環の平均的規模と強度についての指標である。大気循環が強まる時期には海塩や大気中のダストに由来する元素の運搬が強化され、氷床コア中の濃度値が高くなるという根拠に基づいている。

従って、氷期の寒冷期 (stadials) に強化された北極域の大気循環によって、オホーツク海周辺域の風場が強化され、その結果として、オホーツク海における数千年規模の海水氷拡大が引き起こされた結論される。主要な

オホーツク海水拡大イベントは、北部大西洋で確認されたハインリッヒイベント (Heinrich events; Heinrich, 1988; Bond et al., 1992) の発生時期とも、いくつかを除いて対比可能である。ハインリッヒイベントは、北部大西洋域の海底堆積物コア中での漂流岩屑の増加イベントであり、北部大西洋域での膨大な氷山流出によるものと解釈されている。オホーツク海と北部大西洋という同程度の緯度で異なる地点において、そのイベントが同調するという点も、極域大気循環の強化という地球規模の環境変化を要因として考えると整合的に説明され、オホーツク海水はより敏感に大気循環の変化に応答しているとも考えられる。

5. まとめと今後の課題

本論では、過去の海水変動をいかに復元していくのか、についての方法論とオホーツク海における具体的な復元例を紹介した。この研究では、衛星観測や海洋観測のような現在の地球の観測研究、セディメントトラップなどのようなプロセス研究、海底表層堆積物による2次元の海洋地質研究、海底堆積物を使った長時間スケールの古海洋研究などを総合的に行うことで、オホーツク海の海水の時空間的な変動を明らかにすることができた。

今後の研究の展開としては、このような統合的な研究をすすめることを土台として、堆積物コアを取り扱う立場からは、解析の時間分解能を現代観測の時間スケールと等価に議論できる前に高める必要がある。堆積物コアの解析の時間スケールを高めるということは、コアの解析の空間スケールを高めるということになる。このために、私たちは「TATSCAN」というのを進めている。これは堆積物コアを micrometer オーダーで非破壊で高分解能解析するという研究プロジェクトのコードネームである。現在のところ、堆積物コア表面の micrometer スケールの蛍光X線をつかった2次元イメージング装置 (TATSCAN-F1, F2)、拡散分光スペクトルカメラをつかった2次元イメージング装置 (TATSCAN-S1) などを開発してきた。透過X線をつかった堆積構造2次元イメージング装置も開発中で、特にこの装置は、漂流岩屑の自動認識などに威力を発揮する。

現在の地球環境は、過去46億年間の地球の進化の結果として存在する。目の前に広がる風景、たとえば、山並みや海岸線などは長い年月をかけて自然が作り上げてきたものである。現在の地球環境の理解を深めるためには、長い時間スケールの環境変動の研究が必要不可欠であ

る。

謝辞

本稿で報告した研究は、科学技術振興事業団、戦略的基礎研究費 (研究代表者、若土正暁・北海道大学)、「オホーツク海水の実態と気候システムにおける役割の解明 (平成9年~14年度)」の成果である。関係者に感謝いたします。

参考文献

- Alfulis, M. A., Martin, S., 1987. Satellite passive microwave studies of Sea of Okhotsk ice cover and its relation to oceanic processes, 1978-1982, *Journal of Geophysical Research* **92** 13013-13028.
- Bond, G., Broecker, Johnson, S., McManus, J., Labeyrie, L., Jouzel, J., Bonani, G., et al, 1993. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature* **365** 9, 143-147.
- Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N. S., Hammer, C. U., Hvidberg, C. S., Steffensen, J. P., Sveinbjornsdottir, A. E., Jouzel, J., Bond, G., 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* **364** 218-220.
- Duplessy, J. C., Shakleton, N. J., Fairbanks, R. G., Labeyrie, L., Oppo, D. Kallel, N., 1998. Deep water source variations during the last climatic cycle and their impact on the global deep water circulation. *Paleoceanography* **3** 343-360.
- Gloerson, P., Champbell, W. J., Cavalieri, D. J., Comiso, C., Parkinson, C. L., Zwally, H. J., 1992. Arctic and Antarctic sea-ice, 1978-1987: Satellite passive-microwave observations and analysis. NASA Spec. Pub. SP-511, 290pp.
- Heinrich, H., 1988. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Research* **29** 142-152.
- Itou M., Ono T., Noriki S., 2003. Provenance of intermediate waters in the western North Pacific deduced from thermodynamic imprint on $\delta^{13}\text{C}$ of DIC. *Journal of Geophysical Research* **108** C11, 3347, doi: 10.1029/2002JC001746.

- Keigwin, L. D., Jones, G. A., Froelich, P. N., 1998. A 15000 year paleoenvironmental record from Meiji Seamount, far northwestern Pacific. *Earth and Planetary Science Letters* **111** 425-440.
- Kimura, N., Wakatsuchi, M., 1999. Processes controlling the advance and retreat of sea-ice in the Sea of Okhotsk. *Journal of Geophysical Research* **104** C5, 11137-11150.
- Mayewski, P. A., Meeker, L. D., Twickler, M. S., Whitlow, S. I., Yang, Q., Lyons, W. B. Prentice, M., 1997. Major features and forcing of high latitude northern hemisphere atmospheric circulation over the last 110,000 years. *Journal of Geophysical Research* **102** C12, 26345-26366.
- Okazaki, Y., Takahashi, K., Katsuki, K., Ono, A., Hori, J., Sakamoto, T., Uchida, M., Shibata, Y., Ikehara, M., Aoki, A., 2005 in press, Late Quaternary paleoceanographic changes in the southwestern Okhotsk Sea: Evidence from geochemical, radiolarian, and diatom records, *Deep Sea Research II* **52**/16-18, 2332-2350, doi: 10.1016/j.dsr2.2005.07.007
- Parkinson, C. L., Comiso, C., Zwally, H. J., Cavalieri, D. J., Gloerson, P., Champbell, W. J., 1987. Arctic sea-ice, 1973-1976: Satellite passive-microwave observations. NASA Special Publication SP-489, 296pp.
- Sakamoto T., Ikehara M., Aoki, K., Iijima K., Kimura N., Nakatsuka T., and Wakatsuchi M., 2005, Ice-rafted debris (IRD)-based sea-ice expansion events during the past 100 kyrs in the Okhotsk Sea, *Deep Sea Research II* **52**/16-18, 2275-2301, doi: 10.1016/j.dsr2.2005.08.007
- Steig, E. J., P. M. Grootes, M. Stuiver. 1994. Seasonal precipitation timing and ice core records. *Science* **266** 1885-1886.
- Stuiver, M., P. M. Grootes, T. F. Braziunas, 1995. The GISP2 ^{18}O climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes. *Quaternary Research* **44** 341-354.
- Takahashi, K., 1998. The Bering and Okhotsk Seas: modern and past paleoceanographic changes and gateway impact. *Journal of Asian Earth Sciences* **16** 1, 49-58.
- Talley, L. D., 1991. An Okhotsk Sea anomaly: implication for ventilation in the North Pacific. *Deep Sea Research* **38** S171-S190.
- Wakatsuchi, M., Martin, S., 1991. Water circulation in the Kuril Basin of the Okhotsk Sea and its relation to eddy formation. *Journal of Oceanographic Society of Japan* **47** 152-168.
- Watanabe, T., Wakatsuchi, M., 1998. Formation of 26.8-26.9 σ_t water in the Kuril Basin of the Sea of Okhotsk as possible origin of North Pacific Intermediate Water. *Journal of Geophysical Research* **103** 2849-2865.
- White, J. W. C., L. K. Barlow, D. Fisher, P. M. Grootes, J. Jouzel, S. J. Johnsen, M. Stuiver, H. B. Clausen. 1997. The climate signal in the stable isotopes of snow from Summit, Greenland: Results of comparisons with modern climate observations. *Journal of Geophysical Research* **102** 26425-26439.
- Zahn, R., Pederson, T. F., Bornhold, B. D., Mix, A. C., 1991. Water mass convection in the glacial subarctic Pacific (54oN, 148oW): physical constraints and the benthic-planktonic stable isotope record. *Paleoceanography* **6** 543-560.

(2006年12月25日 改訂受付)

Paleoceanographic research of past sea-ice variations in the Okhotsk Sea: Evidence from ice-rafted-debris in marine sediment cores

Tatsuhiko Sakamoto

Institute for Research on Earth Evolution (IFREE), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

abstract:

Ice-rafted debris (IRD) from sediment traps, surficial sediments, and sediment cores were investigated to reconstruct the extent of sea-ice cover in the Okhotsk Sea over the past 100 kyr. Seasonal IRD buried within the sediments during and after the melting of sea-ice in the spring consists of silt- and sand-sized terrigenous particles. The spatial distribution of IRD within surficial sediments clearly corresponds to the average state of extent of sea-ice coverage. Sea ice expanded to a maximum extent during glacial periods, although the cover of sea ice was not perennial. Okhotsk Sea Sea-ice Expansion (OSIE) events, which are recognized as abrupt millennial-scale peaks in IRD content, have occurred 13 times during the past 100 kyrs. These events were amplified in magnitude during glacial periods. The significant modification of polar atmospheric circulation in the northern hemisphere is a key process in explaining these OSIE events.

坂本竜彦

〒237-0061 独立行政法人海洋研究開発機構・
地球内部変動研究センター・
地球古環境変動研究プログラム・
地質・地球物理研究グループ

Tel: 046-867-9803 Fax: 046-867-9775

e-mail: tats-ron@jamstec.go.jp