



Title	オホーツク海の古海洋研究
Author(s)	岡崎, 裕典; Okazaki, Yusuke; 関, 幸 他
Citation	低温科学, 82, 119-133
Issue Date	2024-03-29
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.82.119
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91788
Type	departmental bulletin paper
File Information	10_p119-1333_LT82.pdf



オホーツク海の新古海洋研究

岡崎 裕典¹⁾, 関 宰^{2), 3)}, 高橋 孝三¹⁾

2023年10月26日受付, 2023年12月19日受理

海底堆積物試料を用いたオホーツク海の海洋環境変動の研究史をレビューする。特に水温・海水・中層水形成・生物生産の4トピックについて、現在とは大きく異なる最終氷期のオホーツク海の復元結果を中心に研究成果を解説する。また、オホーツク海の科学掘削を目指した試みODP/IODP proposal 477を紹介する。

Paleoceanography in the Sea of Okhotsk

Yusuke Okazaki¹, Osamu Seki^{2, 3}, Kozo Takahashi¹

We review the paleoceanographic studies in the Sea of Okhotsk based on sedimentary records, mainly focusing on the following four topics: seawater temperature, sea ice, intermediate water formation, and productivity. The reconstructed environment of the glacial Sea of Okhotsk was significantly different from the modern one. Our attempts for scientific drilling in the Sea of Okhotsk ODP/IODP proposal 477 to obtain long-term sedimentary archives are also presented.

キーワード: オホーツク海, 古海洋学, 氷期-間氷期サイクル, 深海掘削
Sea of Okhotsk, Paleoceanography, Glacial-Interglacial Cycles, Deep-Sea Drilling

1. 更新世以降の古海洋研究小史

オホーツク海における海底堆積物を用いた古海洋環境に関する研究は1970年代から始まったが、1990年代前半までは表層堆積物試料中の珪質微化石の群集や分布に関するものが主であった (Jousé, 1971; Sancetta, 1979, 1981, 1982, 1992; Morley 1980; Morley and Hays, 1983)。コロンビア大学ラモント・ドハティ地質研究所のConstance SancettaとJoseph Morleyらは、氷期の北太平洋亜寒帯域

における珪藻や放散虫群集が、現在のオホーツク海の群集に類似していることを指摘し、塩分成層が発達し季節海水が被覆する海洋環境が氷期の北太平洋亜寒帯域に広がっていたことを示唆した。これらの研究によりオホーツク海は氷期海洋のアナログとして注目されるようになったが、オホーツク海で柱状堆積物試料(コア)を採取し、最終氷期最盛期(LGM, 約2万年前)の海洋環境を復元する研究はまだほとんど行われていなかった。わずかにMorley et al. (1991) が、オホーツク海南部で採取された2

連絡先

岡崎 裕典

九州大学 理学研究院 地球惑星科学部門

〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744

Tel: 092-802-4242

Email: okazaki.yusuke.886@m.kyushu-u.ac.jp

- 九州大学 理学研究院 地球惑星科学部門
Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, Fukuoka, Japan
- 北海道大学 低温科学研究所
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan
- 北海道大学 低温科学研究所 環オホーツク観測研究センター
Pan-Okhotsk Research Center, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

本のコア試料中の花粉と放散虫群集を調べ、最終氷期のオホーツク海周辺域の植生が樹木の無いツンドラであったこと、その後の完新世に樹木を含む寒帯の植生へ移行したことを報告している。

1990年代に入ると、ロシア科学アカデミー極東支部・太平洋海洋学研究所のSergey Gorbarenkoが米国ウッズホール海洋研究所のLloyd Keigwinの協力を得て、研究船Kallistoと研究船Vulkanologの航海中に採取されたオホーツク海堆積物の有孔虫酸素・炭素安定同位体比を含む地球化学分析を行った。Gorbarenko (1996) はオホーツク海に加えて、北太平洋広域の最終氷期以降の海底堆積物記録をまとめ、最終退氷期に2回の酸素同位体比の負のシフトが炭酸カルシウム含量のピークとともに出現することを示し、融氷水パルスと解釈した。Gorbarenko は、ロシアの排他的経済水域が大半を占めるオホーツク海において海底堆積物試料を採取するためのロシア側カウンターパートとして長年にわたり主要な役割を果たし、自身も現在に至るまでオホーツク海の高海洋研究を続けている (Gorbarenko et al., 2002a, 2002b, 2004, 2007a, 2007b, 2010a, 2010b, 2012, 2014, 2017, 2020)。Keigwin は、1993年に研究船Akademik Alexandr Nesmeyanovにより北西太平洋天皇海山列とオホーツク海クリル海盆北縁で採取された深度トランセクトコア堆積物を用い、海底表面に生息する底生有孔虫 (Epifauna) の炭素同位体比を栄養塩濃度の指標として、LGMにおける鉛直水塊構造を復元した (Keigwin, 1998)。その結果、水深2000 m付近を境として、上部は現在より栄養塩に乏しい水塊 (氷期北太平洋中層水)、下部は栄養塩に富む水塊の存在が示唆され、氷期には栄養塩鉛直勾配が現在よりも大きかったと結論づけている。その後Keigwin (2002) は、オホーツク海クリル海盆北縁コア試料を使ってLGMにおける中層水ベンチレーション年齢を推定したが、オホーツク海がベンチレーションの良い (年齢が若い) 氷期北太平洋中層水の起源域であったことを支持する結果は得られなかった。北海道大学の志賀健司と小泉格は、気象庁舞鶴海洋気象台の気象観測船・清風丸が1967年に採取した15点の表層堆積物と、1991年に海上保安庁の測量船・昭洋がオホーツク海中央部で採取した2点の堆積物コア、そしてSergey Gorbarenkoから提供された2点の堆積物コアに含まれる珪藻群集解析を行った。Shiga and Koizumi (1999) はLGM以降の海水被覆域の時空間変化を初めて復元し、21,000-17,000年前にかけてオホーツク海西部が多年氷に覆われていたことを示唆した。同じく北海道大学のYann Ternoisと河村公隆らは、Keigwin (1998) が使用したGGC-15堆積物コアのバイ

オマーカーを分析し、過去15,000年間の古水温復元を行うとともに (Ternois et al., 2000)、最終氷期と最終退氷期に陸起源バイオマーカーの含量が卓越することを明らかにした (Ternois et al., 2001)。

1990年代末から2000年代初頭に、日本とドイツでそれぞれオホーツク海の高海洋環境復元を含む大型研究プロジェクトが実施された。すなわち北海道大学の若土正暁を代表とする科学技術振興事業団 (現科学技術振興機構) の戦略的基礎研究「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」とKurile Okhotsk Sea Marine Experiment (KOMEX) である。ロシア極東水文気象研究所 (FERHRI) をカウンターパートとした戦略的基礎研究では、研究船Professor Khromovによる1998年のXP98航海において6本のピストンコア試料を採取した。このうち試料の状態が良好なPC1, PC2, PC4の3本を用いて東西トランセクトの高海洋記録を構築した。戦略的基礎研究における高海洋研究では、北海道大学の中塚武と池原実が中心的な役割を果たした。主な成果としては、最終氷期以降の生物生産変化 (Narita et al., 2002; Sato et al., 2002; Seki et al., 2003, 2004a)、海水被覆状態変化 (Koizumi et al., 2003; Okazaki et al., 2003; Sakamoto et al., 2005)、水温変化 (Seki et al., 2004b) が挙げられる。一方で、KOMEXではドイツのGEOMARがロシア科学アカデミー・シルショフ海洋研究所およびロシア科学アカデミー極東支部・太平洋海洋学研究所をカウンターパートとし、研究船Akademik Lavrentyevの航海において海底堆積物を採取した。特筆すべき点として、2004年にドイツの研究船Sonneがロシアの排他的経済水域で採泥調査を含む観測を行ったことが挙げられる (SO-178航海)。主な成果としては、氷期 - 間氷期スケールの浮遊性および底生有孔虫群集と炭素酸素安定同位体比に関するもの (Barash et al., 2005, 2006; Khusid et al., 2005; Gorbarenko et al., 2007a; Bubenshchikova et al., 2008) や、放散虫の生層序と中層水ベンチレーション (Matul et al., 2002, 2016)、そしてIRDに基づく海水被覆分布変動 (Nürnberg et al., 2011) が挙げられ、それ以降もこの航海で採取された堆積物試料が多くの研究で使用されている (Max et al., 2012, 2014, 2020; Riethdorf et al., 2013; Lembke-Jene et al., 2017, 2018; Cao et al., 2023)。

上記の2つの大型研究プロジェクトと同時期に、北海道沖オホーツク海の堆積物が採取され、主に微化石の研究に使用された。1997年に北海道大学の練習船北星丸航海により採取された知床沖ピストンコアは、堆積速度が速く完新世 (過去11,700年間) の詳細な海洋環境復元に用い

られた(嶋田ら2000; Kawahata et al., 2003; Shimada et al., 2004). 2000年と2001年には深海底鉱物資源探査専用船第2白嶺丸海洋地質調査航海において, 産業技術総合研究所の池原研らによって網走沖と知床沖でグラビティコアが採取され, 放散虫群集解析 (Itaki and Ikehara, 2004; Itaki et al., 2008) や地磁気特性による続成作用評価 (Kawamura et al., 2007) が行われた.

2000年の海洋科学技術センター(現海洋研究開発機構)の海洋地球研究船みらいMR00-K03航海では, 原田尚美らがロシアの排他的経済水域で採泥調査を含む観測を行った (Harada et al., 2001). これは2023年時点で, 我が国の研究船がロシアの排他的経済水域で採泥観測を行った唯一の航海である. 採取された堆積物試料は主にバイオマーカーによる古水温復元研究に使用されている (Harada et al., 2004; Seki et al., 2014).

2001年にフランスの研究船Marion DefresneによるThe International Marine Past Global Change Study (IMAGES) プログラムのWestern Pacific Margin (WEPAMA) 航海が実施され, 日本周辺海域やオホーツク海, 北部天皇海山列でジャイアントピストンコアによる採泥が行われた. IMAGES日本代表を務めた産業技術総合研究所の川幡穂高が日本リクエストサイトのプロジェクトを主導した. 本航海において, 知床沖(MD01-2412)とオホーツク海中央部(MD01-2413, MD01-2414, MD01-2415)の4本のジャイアントピストンコア(コア長31 mから58 m)が採取された. オホーツク海中央部のサイトは, Peanut Holeと呼ばれる東経148-151度, 北緯51-56度に位置した細長い公海で採取された. なお, Peanut Holeは2014年にロシアの大陸棚延長申請が認められ消滅している. 日本のリクエストで採取したMD01-2412コアを使い最終間氷期以降の高解像度古海洋研究 (Okazaki et al., 2005; Ono et al., 2005; Harada et al., 2006, 2008; Sakamoto et al., 2006) が行われたほか, 堆積物中の微生物群集が解析された (Inagaki et al., 2003). Ono et al. (2005) は堆積物コアの全有機炭素含量と C_{org}/N 比がグリーンランド氷床コアに記録された100-1000年スケールのダンスガード・オシュガー振動 (Dansgaard-Oeschger oscillations) と対応することを指摘した. MD01-2414とMD01-2415は, それぞれ台湾とドイツのリクエストにより採取された. 基底部の年代が過去100万年間を超えるこれらのコア試料を用いて, 氷期-間氷期サイクルや中期更新世気候遷移期 (Mid-Pleistocene Transition, MPT) におけるオホーツク海の古海洋研究が行われた (Nürnberg and Tiedemann, 2004; Liu et al., 2006; Wang and Wang, 2008; Matul et al., 2009; Chou et

al., 2011, 2021; Bubenshchikova et al., 2015; Lattaud et al., 2018, 2019; Lo et al., 2018).

海洋研究開発機構の海洋地球研究船みらいMR06-04航海(首席研究者:原田尚美), 深海潜水調査船支援母船よこすかYK07-12航海(首席研究者:坂本竜彦)では, 知床沖とPeanut Holeで採泥観測を行った. これらの航海ではIMAGESサイトを再訪し, 同一サイトで複数コアを採取したり, ピストンコアと大口径グラビティコアを併用したりすることで有孔虫の産出が限られるオホーツク海で堆積物試料量を確保する試みがなされた. これらの航海の成果は2012年にDeep-Sea Research II誌に特集号が組まれた (Derkachev et al., 2012; Gorbarenko et al., 2012; Harada et al., 2012; Iwasaki et al., 2012; Khim et al., 2012) ほか, 古地磁気特性 (Shimono et al., 2014) とそれを応用した年代構築と海水被覆復元 (Inoue and Yamazaki, 2010; Yamazaki et al., 2013, 2016), 光ルミネッセンスによる堆積年代推定 (Sugisaki et al., 2012), オホーツク海中層循環復元 (Okazaki et al., 2014), バイオマーカー古水温復元 (Harada et al., 2014; Seki et al., 2014), 最終間氷期の生物生産と底層酸化還元状態の復元 (Jimenez-Espejo et al., 2018) などが公表されている. また, 試料の一部はロシア研究者に提供されている (Gorbarenko et al., 2010b; 2014; 2020; Chebykin et al., 2015; Artemova et al., 2017). 2023年現在, MR06-04航海とYK07-12航海が, 我が国の研究船がオホーツク海で実施した最後の大規模な採泥調査となっている.

2007年以降のオホーツク海における古海洋研究のための採泥調査は, 2014年にPeanut Holeが消滅した影響もあり, ロシア船を備船する航海が中心となった. ロシア船クロモフ号による2007年のXP07航海ではアムール川の河口に近い北西オホーツク海で採泥調査が行われた (Ijiri et al., 2010; Harada et al., 2012; Seki et al., 2012).

2010年代に入ると, オホーツク海古海洋研究における中国の存在感が高まった. 古くは砕氷船雪竜 (M/V Xuelong) による1999年の中国最初の北極調査航海の途中に通過したオホーツク海でグラビティコアOS3-1を採取しており, 2010年代になって主に砕屑物の分析が進められた (Zou et al., 2015; Wang et al., 2017). また, ロシア船を備船して採取した堆積物試料の分析も進められている (Wang et al., 2021a).

過去40年余りのオホーツク海古海洋研究を概観すると, 1990年代から2000年代に研究活動のピークがあった. オホーツク海では掘削船による科学掘削が行われておらず, これまでに回収された最も古い海底堆積物は, 2001年に

IMAGESプログラムで採取されたMD01-2414の150万年前のものに留まっている。

2. 古海洋復元研究の成果

2.1 水温・塩分

オホーツク海における更新世から完新世にかけての表層水温変動を推定する研究は、主に有機地球化学的手法、特に円石藻が生産するアルケノンを用いた古水温法によって進展してきた。最初の試みはオホーツク海の南部のクリル海盆北部で採取された海底コア (GGC-15) にアルケノン古水温法を適用して、過去15万年間の表層水温変化を報告したTernois et al. (2000) で、最終退氷期から完新世後半にかけて、表層水温が徐々に上昇する傾向が示された。その後、Seki et al. (2004b) はカムチャッカ沖の海底コア (XP98-PC2, PC4) に同じ手法を適用し、最終氷期から完新世にかけての連続的な表層水温変動を復元した。その結果、完新世に比べて氷期の水温が約4℃ほど低かったと推定した。一方で、LGMにおいて比較的高い水温を示した。海水や植生などの古気候記録はLGMのオホーツク海とその周辺域が極めて寒冷であったことを示すことから、この高いアルケノン水温の原因はLGMにおける円石藻の生産季節が夏季に制限されていたためと解釈された。その後、Harada et al. (2006) は知床沖で採取された堆積速度の速い堆積物コアMD01-2412を用いて、最終氷期の高時間解像度アルケノン水温変動記録を報告した (図1)。突然かつ急激な水温変動の繰り返しが最終氷期の層準から示され、その変動パターンがグリーンランド氷床コアの酸素同位体比記録に類似していることから、100-1000年スケールのダンスガード・オシュガー振動を反映したものと解釈された。

アルケノン古水温法を適用した過去のオホーツク海の水温復元と並行して、オホーツク海に係留した時系列セジメントトラップにより捕集した沈降粒子を用いたアルケノン古水温法の検証が行われた (Seki et al., 2007)。その結果、現在のオホーツク海におけるアルケノン生産は温度躍層が発達する秋季に限定されていることが示され、オホーツク海堆積物中のアルケノン水温記録を解釈する際に季節性について細心の注意が必要なが示唆された。加えて、アルケノンの組成から過去の表層塩分を復元する試みもなされている。Seki et al. (2005) は当時塩分指標として提案された4不飽和アルケノンの相対量から最終氷期の塩分を推定し、氷期の表層塩分が完新世よりも低かったことを示した。その後、Harada et al. (2008)

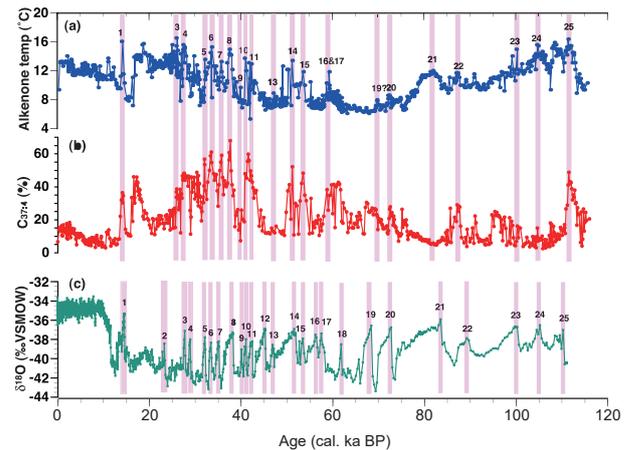


図1：オホーツク海知床沖MD01-2412コアの(a) アルケノン古水温、(b) 4不飽和アルケノン相対量、および(c) グリーンランドGISP2氷床コアの酸素同位体比 (Harada et al., 2008を改変)。最終氷期最盛期(23,000-18,000年前)に高いアルケノン水温を示す。ピンク帯と数字は、GISP2氷床コアの亜間氷期 (Interstadials) を示し、知床沖MD01-2412コアにおける短期間のアルケノン古水温上昇イベントと対応している。Reprinted by permission from Wiley.

Figure 1: (a) Alkenone-derived temperatures and (b) content of C37:4 alkenones relative to total C37 alkenone content (percent C37:4) in Core MD01-2412 in the Sea of Okhotsk Sea, and (c) $\delta^{18}\text{O}$ variation recorded in the Greenland Ice Sheet Project 2 (GISP2) ice core (Modified from Harada et al., 2008). Pink bars indicate interstadials, which are numbered in accordance with the GISP2 record. Reprinted by permission from Wiley.

は同手法を知床沖のIMAGES MD01-2412コアに適用し、最終氷期における千年スケールの表層塩分変動を復元した (図1)。その結果、ダンスガード・オシュガー振動に同調した顕著な表層塩分変動が示唆された。当初、塩分指標として利用されてきた4不飽和アルケノンは、近年の研究により海水との関連性が指摘されている (Wang et al., 2021b)。したがって、オホーツク海堆積物コアの4不飽和アルケノン増加は海水発達を反映するという解釈も可能である。4不飽和アルケノン記録が何を指標しているか、今後の研究の進展が待たれる。

アルケノン古水温法による水温復元の試みが一段落した後、海洋性古細菌細胞膜脂質を用いたTEX₈₆古水温計を適用した水温復元が試みられるようになった。Seki et al. (2009) はオホーツク中央部の堆積物コア (MR0604-PC7) を用いて、TEX₈₆古水温法により最終氷期を含む過去15万年間の水温変動を復元した。その結果、氷期-間氷期サイクルに対応した水温変動が確認されただけでなくLGMの水温が極小値を示すなど、他の古環境指標記録と整合的な結果が得られた。その後、オホーツク海を含む北太平洋の広域においてTEX₈₆古水温計の検証が行われ、この地域に最適化されたキャリブレーションが提案され、

TEX₈₆古水温計による水温推定が高精度化された (Seki et al., 2014). また, Lo et al. (2018)でもSeki et al. (2009)を支持する結果が得られた.

近年では新しい古水温計として注目されるジオール古水温法がオホーツク海堆積物に適用され (Lattaud et al., 2018), アルケノンやTEX₈₆水温記録と対比がなされた. 得られた水温変動パターンは指標によって異なり, 各水温指標が異なる季節の水温を反映していると解釈された. 続いてLattaud et al. (2019)は, 2023年現在でオホーツク海最長となる過去約150万年間水温変動を3つの水温指標を用いて復元した. 3つの古水温記録のうち氷期サイクルと最も対応が良いのはTEX₈₆水温であった. 水温復元記録が蓄積されてくると, 異なる手法による復元結果の比較研究が行われるようになり (例えばDavis et al., 2020), 特にLGMや最終退氷期の試料で手法間に大きな違いがあることが示された. これらの食い違いをどのように克服していくのかは今後の課題である.

なお, 主要な古水温計である有孔虫殻のMg/Ca比を用いたオホーツク海の水温復元研究は公表されていない. 実際にオホーツク海堆積物試料の浮遊性有孔虫Mg/Ca比分析を行った金沢大学の佐川拓也によると, LGMから最終退氷期に高水温を示し, 拾い出した有孔虫殻には変色や通常と異なる表面構造など堆積後の二次的な石灰化の強い影響が見られたとのことであった (佐川拓也, 私信). この点においてもオホーツク海の水温復元, 特にLGMの水温復元の困難さが伺える.

2.2 海水

海水や海水域に生息する珪藻種を用いて, オホーツク海における海水被覆の時空間変動を初めて復元したのは Shiga and Koizumi (1999) であった. 彼らはLGMから最終退氷期初期にかけて, オホーツク海西部が多年氷に覆われていたことを示唆した. Okazaki et al. (2003)は, サハリン沖コア試料のLGM層準から数は少ないものの放射虫個体が連続産出することから, LGMのオホーツク海は西部を含め季節海水であったと指摘した. 後にKatsuki et al. (2010)は, 海水珪藻種の産出によるオホーツク海における海水被覆の時空間変動を改訂し, LGMに西部サハリン沖を主に被覆していた季節海水が, 最終退氷期に分布域を北部に拡げていたことを示唆した(図2).

海水珪藻種と並び, 海水が運搬した粗粒の碎屑物 (Ice-Rafted Debris, IRD) は, 代表的な海水指標である. Gorbarenko et al. (2002b)は, オホーツク海南部のV34-90コア試料中のIRDを計数し, LGMから最終退氷期初期に

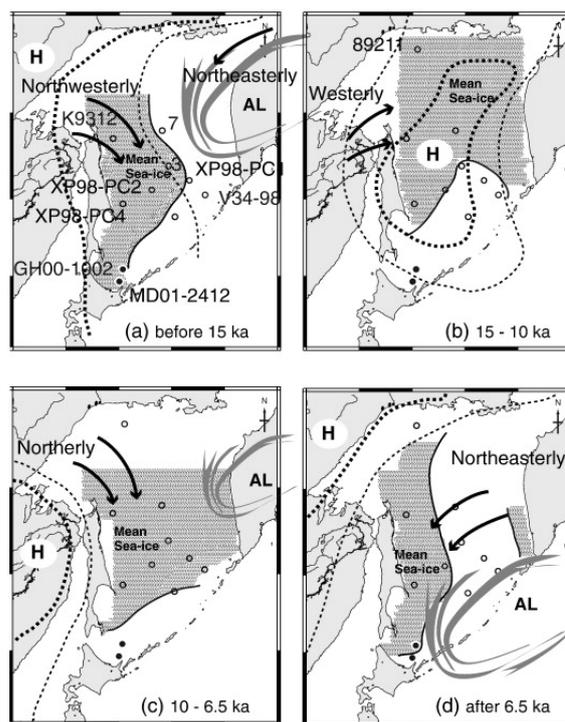


図2: 珪藻群集に基づくオホーツク海における最終氷期最盛期以降の海水被覆分布変化 (Katsuki et al., 2010). 地図中の白丸と黒丸は堆積物コア試料の採取海域, 灰色のハッチは海水被覆域, 点線は気圧配置を示す. Reprinted by permission from Elsevier.

Figure 2: Schematic illustration showing the sea-ice distribution and the atmospheric pressure patterns over the Sea of Okhotsk Sea the LGM: (a) before 15 ka, southern Aleutian Low, (b) 15–10 ka, strong Siberian High, (c) 10–6.5 ka, northern Aleutian Low, and (d) after 6.5 ka, southern Aleutian Low (Katsuki et al., 2010). Black and white circles denote sediment core locations. Gray hatches show areas covered with sea ice. Dot lines denote atmospheric pressure. Reprinted by permission from Elsevier.

多かったことを示した. Sakamoto et al. (2005, 2006)は, 合計4本のコア試料中のIRD変動を調べ過去10万年余りの海水被覆分布変化を復元した. その結果, 氷期に海水被覆域が拡大し間氷期に縮小すること, オホーツク海東部は酸素同位体ステージ (Marine Isotope Stage, MIS) 2のみ大規模に海水が拡大したこと, 氷期の中に100-1000年スケールのダンスガード・オシュガー振動に対応する振幅の大きなIRD変動があったこと, が示された. 同様な結果はVasilenko et al. (2017, 2019)によって報告されている. Nürnberg et al. (2011)は, 過去35万年間の長期的なIRD変動を3本の東西トランセクトコアから調べ, 1つ前の氷期のMIS 6にオホーツク海東部で顕著なIRD増加を報告した. その原因としてカムチャッカ半島の氷河発達を鉱物組成から示唆した. またNürnberg and Tiedemann (2004)は, 110万年間にわたる氷期 - 間氷期サイクルに対応し

た長期IRD変動を示した。

オホーツク海中部から南部の海水被覆は氷期においても季節海水であったと考えられているが、北部の海水被覆が氷期に多年氷だったとする説がYamazaki et al. (2013)により唱えられた。彼らは、オホーツク海中央部の北緯54度、53度、51度で採取された3本のコア試料中の磁性鉱物の環境磁気分析に基づき、北緯54度の結果が残り2本と異なることを示し、北緯54度のサイトでは多年氷によりIRDが氷期に存在しなかったためと解釈した。

Lo et al. (2018)は、過去13万年間の海水珪藻が合成するバイオマーカーIP25濃度変動が、北緯53度の秋における日射量変動に対応していることを示した。Zou et al. (2015)は碎屑物中の希土類を分析することで、碎屑物を火山性・海水・アムール川由来に分け、氷期にアムール川由来が減少し海水由来の粒子が増加したことを示唆した。

2.3 海洋中層水循環

現在の北太平洋中層水の起原水となっているオホーツク海中層水は、低温・低塩分・高溶存酸素濃度で特徴づけられる。この水塊に多産する放散虫種*Cycladophora davisiana*は、ベンチレーションの良い中層水の指標として用いられてきた。*C. davisiana*は、現在の海洋ではオホーツク海中層水においてのみ優占する。一方、LGMには、北太平洋亜寒帯域・北大西洋亜寒帯域・南大洋に*C. davisiana*が広く多産することから、最終氷期最寒期の高緯度外洋域に現在のオホーツク海のような低温・低塩分・高溶存酸素濃度の中層水が存在していたことが示唆されてきた(Morley and Hays, 1983)。氷期のオホーツク海では、オホーツク海中層水の形成がより活発になったと予想されていたが、最初にオホーツク海の堆積物試料から*C. davisiana*産出を調べたMorley et al. (1991)は、意外にも最終氷期で低い*C. davisiana*産出を報告した。この産出パターンはOkazaki et al. (2003)で確認されている。Morley et al. (1991)とOkazaki et al. (2003)は、目合い63 μm の篩を使って*C. davisiana*を含む放散虫個体を抽出している。一方、目合い40 μm ないし45 μm の篩を使って放散虫個体を抽出したOkazaki et al. (2005), Itaki et al. (2008), Matul et al. (2009, 2016)では、最終氷期の*C. davisiana*産出低下は、それほど顕著ではなかった。篩の目合いによる産出パターンの違いは、*C. davisiana*の個体サイズが氷期に小型化した可能性を示すが、定量的な検証は行われていない。また、Okazaki et al. (2006)は、*C. davisiana*産出が完新世中期にピークを示し完新世後期に顕著に減少し

たことに注目し、バイオマーカーや有機炭素含量データとの比較に基づき、中層水への有機物輸送との関係を議論した。このように、*C. davisiana*の産出がオホーツク海中層水の形成を単純に反映するかどうか今後の検討が必要である。MD01-2415コアの過去110万年間の*C. davisiana*産出記録(Matul et al., 2009, 2016)は、概ね氷期に減少し間氷期に増加するパターンを示すが、その対応は明瞭ではない。上記の*C. davisiana*産出パターンは相対産出頻度(全放散虫群集に占める*C. davisiana*の割合)である。一方で、*C. davisiana*フラックス(単位時間単位面積あたりに堆積した*C. davisiana*個体数)は、データのある過去12万年間の期間において、間氷期に高く氷期に低い明瞭なパターンを示した(Okazaki et al., 2003, 2005; Itaki et al., 2008; Yanchenko and Gorvarenko, 2015)。氷期のオホーツク海は放散虫産出が乏しいので、相対産出頻度を使用する際には注意が必要である。

最終氷期の*C. davisiana*産出が増加しないことは、底生-浮遊性放射性炭素年代差が示すオホーツク海の水深1000-2000 mのベンチレーション変化が、最終氷期に若くならないことと整合的である(Keigwin, 2002)。第1章で述べたように、Keigwin (1998)は、底生有孔虫炭素同位体比から最終氷期に北太平洋の水深2000 m以浅に栄養塩に乏しいベンチレーションの良い水塊(氷期北太平洋中層水)が存在していたことを示唆した。Keigwinは、オホーツク海が氷期北太平洋中層水の起原域であったことを証明するため、オホーツク海堆積物試料の底生-浮遊性放射性炭素年代差からLGMのベンチレーション速度を復元した(Keigwin, 2002)。しかし、予想に反して最終氷期のオホーツク海で若いベンチレーション年代は得られず、氷期北太平洋中層水の起原域がオホーツク海であった証拠は得られなかった。氷期北太平洋中層水の起原域としてベーリング海が有力視されているが、決定的な証拠はなく議論が続いている(Matsumoto et al., 2002; Ohkushi et al., 2003; Horikawa et al., 2010, 2021; Max et al., 2014)。オホーツク海における最終氷期から最終退氷期の1000年スケールのベンチレーション変化は、Max et al. (2014), Okazaki et al. (2014), そしてLembke-Jene et al. (2017)により示されている。いずれも、LGMから最終退氷期初期のハイน์リッヒ亜氷期1 (Heinrich Stadial 1, 約18000-15000年前)にかけてベンチレーション年代が若くなり、オホーツク海で活発に中層水が形成されるようになったのはLGMではなく最終退氷期初期であったことを示唆した。ただし、オホーツク海における有孔虫の産出は、最終退氷期中の温暖期であるベーリングアレレード期(Bolling-Allerød,

BA, 14,700-12,900年前)とプレボレアル期 (Preboreal, PB, 10,300-9,000年前)を除き限定的で、しばしば保存の悪い変色した個体が産出するため、堆積後の続成作用による古い炭素の混入の影響が問題となる点に注意が必要である。

2.4 生物生産

現在のオホーツク海は、珪藻を中心とした基礎生産が高い海域である。堆積物試料中の生物源オパールや全有機炭素、炭酸カルシウム含量を始めとした生物生産指標記録は、最終氷期以降のオホーツク海生物生産が現在と大きく異なっていたことを示している。Gorbarenko (1996)は、生物源オパール含量が完新世に入ってから増加することを示し、最終退氷期に増加するベーリング海や西部北太平洋亜寒帯域とパターンが異なることを指摘した。Narita et al. (2002)は生物源オパール含量から氷期 (MIS 2-4)の生物生産が間氷期 (MIS 1, 5)より低かったことを示した。Sato et al. (2002)は生物源オパール含量と生物源バリウム濃度の変動パターンを比較し、最終退氷期に生物源オパールより生物源バリウムが先行して増加することを見つけ、円石藻が珪藻に先行して増加したことを示唆した。バイオマーカー記録もこのことを裏付けており、最終退氷期のアルケノン (円石藻バイオマーカー)濃度上昇が、完新世のブラシカステロール (珪藻バイオマーカー)濃度上昇に先行したことがわかっている (Ternois et al., 2001; Seki et al., 2004a, 図3)。全有機炭素含量は炭酸カルシウム含量と同様に、最終退氷期中のBA期とPB期にピークを示した (Gorbarenko, 1996; Ternois et al., 2001; Seki et al., 2003, 2004a; Ono et al., 2005)。この時、陸起源バイオマーカーの長鎖n-アルカン含量が同時にピークを示しており (Seki et al., 2003)、海水準が上昇した最終退氷期における陸上高等植物起源有機物の流入が増加したことが伺える。堆積物試料中の珪藻個体数は生物源オパール含量と同じく完新世に入ってから増加したのに対し、放散虫個体数は最終退氷期にピークを示した (Okazaki et al., 2005)。最終退氷期の放散虫ピークは主に中層に生息する *C. davisiana* によるものであった。

氷期 - 間氷期サイクルにおけるオホーツク海の生物生産は、間氷期に高く氷期に低いパターンを示した (Nürnberg and Tiedemann, 2004; Liu et al., 2006; Wang and Wang, 2008; Iwasaki et al., 2012; Bosin et al., 2015; Jimenez-Espejo et al., 2018; Lattaud et al., 2019)。MIS 1 (完新世)に匹敵する高い生物源オパールピークは、間氷期MIS 5, 9, 11で見ついているが、それ以前の間氷期では珪藻の生産はMIS 1ほど高くなかったようである。最

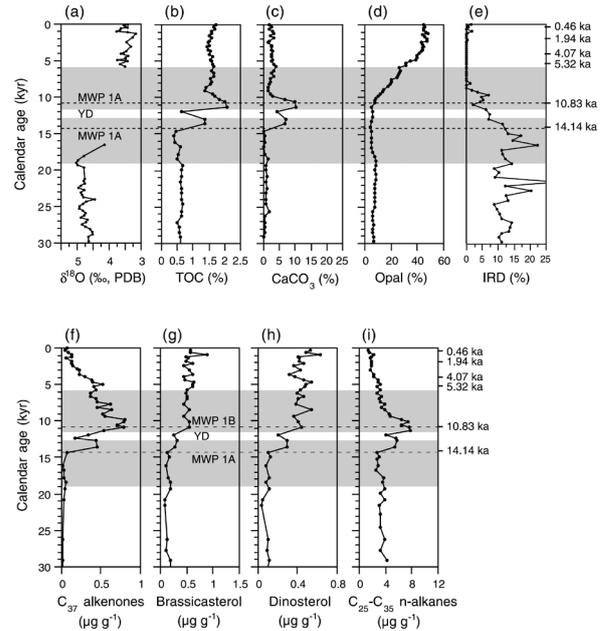


図3: オホーツク海南部XP98-PC2コアの各種古環境指標データ (Seki et al. 2004a)。最終退氷期に円石藻が珪藻に先行して増加した。灰色のハッチは最終退氷期を示す。Reprinted by permission from Wiley.

Figure 3: Multiproxy records in Core XP98-PC2 from the southern Sea of Okhotsk (Seki et al., 2004a). Coccolithophore bloom preceded the diatom bloom. Gray hatches show deglaciation. Reprinted by permission from Wiley.

終退氷期と同様、MIS 5, 9, 11においても炭酸カルシウム含量の増加が、生物源オパール含量に先行するパターンが報告されている (Iwasaki et al., 2012; Bosin et al., 2015; Jimenez-Espejo et al., 2018)。現在観測されている珪藻を中心とした高生物生産海域としてのオホーツク海は、長い氷期の間に周期的に訪れた短い間氷期の姿であると言えよう。

3. 科学掘削—長期古気候記録の取得を目指して

深海掘削科学は1960年代初頭のもホール計画 (Project Mohole) 以来、深海掘削計画 (Deep Sea Drilling Project: DSDP)、国際深海掘削計画 (Ocean Drilling Program: ODP)、統合国際深海掘削計画 (Integrated Ocean Drilling Program: IODP)、国際深海科学掘削計画 (International Ocean Discovery Program: IODP) へと受け継がれ60年以上の歴史を持つ。ソビエト連邦およびロシア連邦は1976年から1983年までDSDPの、そして1991年から1993年までODPの参加国であった。しかし、オホーツク海では、これまで一度も掘削船による科学掘削は実施されていない。本稿の著者である高橋孝三は、かつてオホーツク海と

IODP Proposal Cover Sheet	
<input type="checkbox"/> New	<input type="checkbox"/> Revised
Please fill out information in all gray box	
<i>Above For Official Use Only</i>	
Title: The Okhotsk and Bering Seas: High resolution Plio-Pleistocene Evolution of the Glacial/Interglacial Changes in the Marginal Seas	
Proponents: ¹ Kozo Takahashi, ² Itaru Koizumi, ³ Sergei A. Gorbarenko, ⁴ Makoto Okada, ⁵ Ana Christina Ravelo, ⁶ Ralf Tiedemann, ⁷ Tatsuhiko Sakamoto, ⁸ Minoru Ikehara, ⁹ Hidekazu Tokuyama, ¹⁰ Alexander S. Svarichevsky, and ¹⁰ David W. Scholl ¹ Dept. of Earth and Planetary Sci., Grad. School of Sci., Hokkaido Univ., Sapporo 060-0810, Japan ² Pacific Oceanological Inst., Far Eastern Branch, Russian Acad. of Sci., Vladivostok 690041, Russia ³ Dept. Environmental Sci., Faculty of Sci., Ibaraki University, Mito 310-8512, Japan ⁴ Ocean Sci., Univ. of Calif., Santa Cruz, CA 95064 USA ⁵ GEOMAR Research Center for Marine Geosciences, Kiel, Germany ⁶ Institute for Frontier Research on Earth Evolution (IFREE), JAMSTEC, Yokosuka 237-0061, Japan ⁷ Marine Core Research Center, Kochi University, Kochi 783-8502, Japan ⁸ Ocean Research Inst., Tokyo Univ., Tokyo 164-8639, Japan ⁹ U.S. Geological Survey, Menlo Park, CA 94025, USA	
Keywords: (5 or less)	Area: The Okhotsk Sea The Bering Sea
Contact Information:	
Contact Person: K. Takahashi	
Department: Department of Earth & Planetary Sciences	
Organization: Faculty of Science, Kyushu University	
Address: Hakozaki 6-10-1, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan	
Tel.: 81-92-642-2656 Fax: 81-92-642-2686	
E-mail: kozo@geo.kyushu-u.ac.jp	
Permission to post abstract on ISAS Web site: <input checked="" type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No	
Abstract: (400 words or less)	
<p>Over the last 5 Ma, global climate has evolved from being warm with only small Northern Hemisphere glaciers to being cold with major Northern Hemisphere glaciations occurring every 100 to 40 kyr. The reasons for this major transition are unknown. Over the last hundreds of thousands of years Milankovitch and millennial scale climate oscillations have occurred also due to mechanisms that are unknown. Possible mechanisms responsible for both the long term evolution of global climate as well as the generation of high frequency climate oscillations involve intermediate water ventilation of the North Pacific. However, the paucity of data in critical regions of the Pacific, specifically the Okhotsk and Bering Seas, has prevented an evaluation of the role of North Pacific processes in global climate change. The Okhotsk and Bering Sea are marginal seas in the North Pacific that have experienced major climate changes. Because Pacific intermediate water is formed in these basins, they are not just recorders of, but are potentially critically involved in, causing major climate changes. Thus, drilling in the Okhotsk and Bering Seas can help to answer questions not just about the global extent of climate trends and oscillations, but also about the mechanisms that produce them.</p> <p>We propose to drill sediments appropriate for a detailed study of the Plio-Pleistocene evolution of millennial to Milankovitch scale climatic oscillations in the Okhotsk and Bering Seas. Biological, chemical and physical oceanography as well as adjacent continental climate of the Okhotsk and Bering Seas are highly sensitive to global climate conditions, and are recorded by variations in the sedimentary composition of diatoms and other microfossil groups, as well as many other paleoclimatic indicators. Intermediate water formation in these regions can be tracked using paleoceanographic proxies of subsurface water that can be related to open Pacific records. Sediments can not only be used to produce records of climate and intermediate water ventilation in these critical marginal seas, but can also be applied to testing the effect of changes in the Bering Strait Gateway and its influence (via the Arctic) on heat and nutrient partitioning between the Atlantic and Pacific. The proposed drilling will provide continuous and high resolution paleoenvironmental records from these critical marginal seas for the first time. These new records can then be used to understand the processes that influence intermediate water ventilation and its role in global climate change over the last 5 Ma.</p>	

図4 : IODP Proposal 477Full4のカバーシート。

Figure 4: IODP Proposal 477Full4 cover sheet.

ベーリング海を対象とする掘削提案を行った (ODP/IODP proposal 477, 図4)。ベーリング海掘削はIODP Expedition 323 (Takahashi et al., 2009, 2011) として実現したが、審査の過程でオホーツク海の掘削提案は分離され実現されることはなかった。第3章では幻に終わったオホーツク海掘削提案について、概要と経緯を記す。

3.1 ODP/IODP Proposal 477によるオホーツク海掘削提案の概要

Proposal 477 掘削提案の主目的は、鮮新世以降 (533.3万年前) のオホーツク海とベーリング海における気候変動史の解明であった。鮮新世から更新世にかけての気候変動は、温暖で振幅の小さな気候から、北半球高緯度域の巨大氷床が消長を繰り返す振幅の大きな気候への遷移で特徴づけられる (Lisiecki and Raymo, 2005)。約270万年前の北半球大規模氷床発達時期を含む北太平洋高緯度域の気候変動を高解像度で復元すること、特に北太平洋中層水の起源域とベンチレーション・海水被覆・アムール川をはじめとした河川流入・生物生産などの長期記録を取得

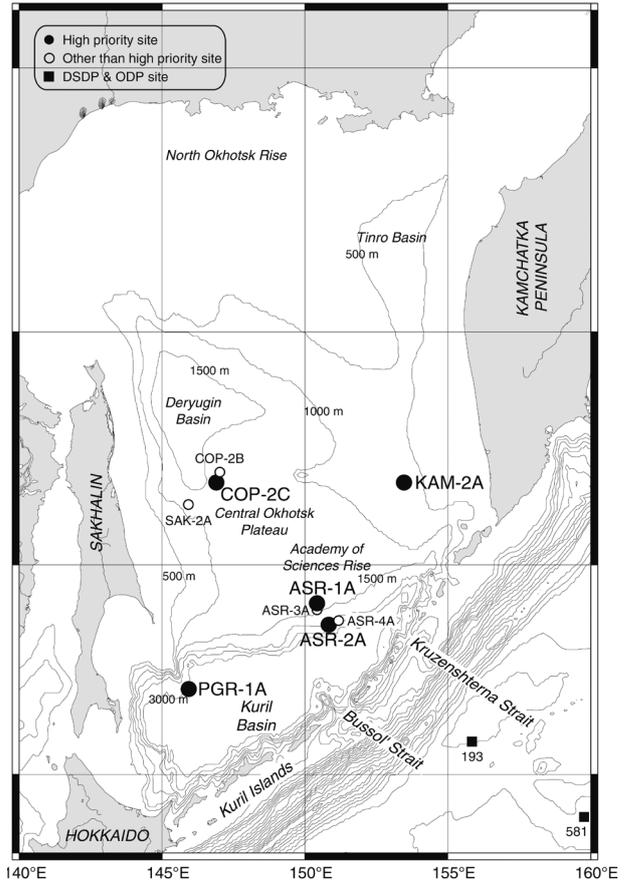


図5 : IODP Proposal 477Full4で提案されたオホーツク海掘削候補9サイトの地図。

Figure 5: Map showing nine drilling sites proposed by the IODP Proposal 477Full4

し、気候変動メカニズムの理解に貢献することを目指し、掘削点を設定した。

Proposal 477では、オホーツク海において優先掘削5サイトと代替掘削4サイトを提案した (図5, 表1)。掘削サイトは、海水や中層水の時空間変動を復元するために、東西トランセクトおよび深度トランセクトを意識した。また、高解像分析を目的とした高堆積速度サイトと、長期記録取得を目的とした低堆積速度サイトを設けた。オホーツク海南部の科学アカデミー海台 (Academy of Sciences Rise) に位置する優先掘削サイト ASR-1A (水深1250 m) と ASR-2A (水深2140 m) は、千島列島で最も深いブッソル海峡に近く、中層水形成とベンチレーション変化のモニターを主目的として提案した。水深が浅く堆積速度が速い ASR-1A は、中層水の高解像度復元に適している。水深の深い ASR-2A は、ASR-1A とのコンビネーションで中深層の水塊構造変化を復元するために選定された。サイト ASR-3A と ASR-4A は、ASR-1A と ASR-2A が掘削でき

表1: IODP Proposal 477Full4で提案されたオホーツク海掘削候補9サイト。

Table 1: Nine drilling sites in the Sea of Okhotsk proposed by the IODP Proposal 477Full4.

No.	Drill Site	Latitude	Longitude	Water Depth (m)	Estimated Sed. Rate (cm/kyr)	Penetration (m)	Drilling Priority	Drilling Time (d)	Logging Time (d)
OKHOTSK SEA - High Priority Sites									
<i>Academy of Sciences Rise</i>									
1	ASR-1A	49°07.0'N	150°25.0'E	1250	38	200	High	2.2	-
2	ASR-2A	48°37.0'N	150°50.0'E	2140	18	700	High	4.3	0.8
<i>Central Okhotsk Plateau</i>									
3	COP-2C	51°50.1'N	146°53.8'E	1275	10	700	High	3.8	0.8
<i>Kamchatka</i>									
4	KAM-2A	51°50.0'N	153°28.0'E	675	6.6	200	High	1.9	-
<i>Pegasus Rise</i>									
5	PGR-1A	47°05.7'N	145°56.0'E	3000	15	200	High	3.5	-
								Total 17.3 days	
OKHOTSK SEA - Other than High Priority Sites									
<i>Academy of Sciences Rise</i>									
6	ASR-3A	48°58.0'N	150°25.0'E	1425	14	700	H-Alt	3.8	0.8
7	ASR-4A	48°43.0'N	151°11.0'E	1725	14	700	H-Alt	4.0	0.8
<i>Central Okhotsk Plateau</i>									
8	COP-2B	52°03.7'N	147°01.1'E	1275	10	200	H-Alt	2.2	-
<i>Sakhalin</i>									
9	SAK-2A	51°21.0'N	145°55.0'E	937	10	200	Inter.	2.2	-
								Total 12.2 days	

ない場合の代替サイトである。サハリン東方のオホーツク海中央域平坦部 (Central Okhotsk Plateau) に位置する優先掘削サイトCOP-2C (水深1275 m) は、アムール川河口域で形成される海水の下流域にあたり海水分布変化のモニターに重要である。堆積速度が比較的遅いため、鮮新世を通じた長期堆積物記録取得を主目的として提案した。サイトCOP-2BとSAK-2AはCOP-2Cの代替サイトである。オホーツク海東部カムチャッカ半島沖に設けたサイトKAM-2A (水深675 m) は、提案サイト中で最も浅く、太平洋から流入する表層水の影響を受ける。サイトPGR-1A (水深3000 m) は、オホーツク海南部クリル海盆の西縁ベガス海台に位置する最も深いサイトである。掘削時の安全を担保するとともにサイト選定の適切さを判断するため、海底下の地質構造を示す反射法地震探査断面図をサイトサーベイデータとして提出した。上記提案サイトの反射法地震探査は、ロシアの研究船Pegas・Poisk・Makapoba・Lavrentyevの各航海によって実施された。

3.2 Proposal 477の興亡

Proposal 477が辿った道のりを当事者である高橋孝三の視点から振り返る。高橋は1980年代から1992年までアメリカ合衆国のスクリップス海洋研究所およびウッズホール海洋研究所において海洋沈降粒子の研究に従事していた。これらの最先端研究所では、自身の給与や研究費を自己努力で獲得するセルフサポート体制が確立していた。

ウッズホール海洋研究所の場合、年12カ月のうち、1カ月分の給与は大学院講義で賄えたが、残り11カ月分は主に米国国立科学財団 (National Science Foundation) に提出するプロポーザルの採択に掛かっていた。アメリカの研究所は研究に没頭できる環境とは言え、自身の給与のほとんどがプロポーザルの採択次第という状況は、当時の国家予算縮小の影響もあって年ごとに厳しさが増していた。そんな中、国際深海掘削計画 (ODP, 1983-2003) には潤沢な研究費が配分され、年6回の掘削航海 (60日×6) を実施しており、次々と乗船者を募集していた。ODP航海に乗船すると3カ月分の給与と少額の研究費が支給されたので、研究費の獲得が思うようにいかないときに重宝した。このような背景があり、1987年のLeg 116ベンガル湾、1990年のLeg 130オントンジャワ海台、1991-1992年のLeg 141チリ沖の3回のODP掘削航海に古生物学者として乗船し、放散虫生層序から掘削試料の年代を決定した。

1992年に日本に帰国し北海道東海大に着任した高橋に対し、東京大学海洋研究所の平朝彦をはじめとした国内のODP掘削コミュニティからの要請があり、ODPのプロポーザル評価パネルの1つである海洋史パネル (Ocean History Panel: OHP) 委員を1993年から1997年まで務めることになった。年2回開催されるOHPパネル会議では数日間で30件ほどの掘削プロポーザルを審査する。各委員には専門性を踏まえて担当 (Watchdog) となるプロポーザルが割り当てられ、事前に航空便で配送された冊子を読み

こんで会議に臨む。このOHPでの活動を通じて、掘削プロポーザルの審査プロセスを理解するとともに、プロポーザルの書き方が自然と身に付いた。

1995年5月に高橋は、1週間でオホーツク海・ベーリング海掘削提案のアイデアをまとめ、プロポーザルをODPに提出した。これがProposal 477である。アイデアの一部はTakahashi (1998) で総説として発表した。提出したプロポーザルは、半年のパネル会議ごとに対応が求められる。掘削研究の意義づけや、掘削サイト選定の妥当性、掘削点の地下構造データの提出などプロポーザルの改訂と関連書類の提出が求められ、Proposal 477の場合は、2007年まで実に12年間に及んだ。この対応を怠り2年間アクションが無いと、「掘削努力の意思なし」とみなされ候補から削除されるので気を抜けない。大げさに言えば、深海掘削研究は「研究者人生を賭けた大事業」である。プロポーザルの改訂を進めるなかで、DSDP Leg 19で共同首席研究者 (Co-Chief Scientist) を務めるなどベーリング海の深海掘削に精通した米国地質調査所/スタンフォード大学のDavid Schollが提案メンバーに加わり大きな助けとなった。さらに、OHPアメリカ代表の一人で本掘削計画に興味を示したカリフォルニア大学サンタクルツ校のChristina Raveloが、1998年から提案メンバーに加わりチームが強化された。後に実現したベーリング海掘削航海では、高橋とRaveloが共同首席研究者として乗船研究者を率いることになる。

掘削プロポーザルを提出する際に大きな関門となるのが、サイトサーベイデータである。掘削時の安全担保とサイト選定の適切さを判断するための資料として、掘削提案点における海底下の地質構造を示す反射法地震探査断面図の提出が求められる。Proposal 477の場合、ベーリング海のアメリカ排他的経済水域内では、東京大学海洋研究所の平朝彦や徳山英一らの協力を得て1999年に学術研究船白鳳丸KH99-3航海中に反射法地震探査を実施した。一方、ロシアの排他的経済水域であるオホーツク海とベーリング海西部の掘削提案海域において日本の研究船が調査を行うことは極めて困難で大変苦勞した。ロシア側のキーパーソンとして、ロシア科学アカデミー極東支部太平洋海洋学研究所のSergey GorbarenkoとAlexander Svarichevskyの協力を得て、過去にロシアが取得した多数のサイトサーベイデータを提供してもらうため、1995年以降、札幌—ウラジオストク (高橋が九州大学に異動した1997年以降は福岡—ウラジオストク) 間を何度も往復した。またKOMEX (第1章)による1998年の研究船Akademik Lavrentyev航海において、サイトCOP-2Cお

よびCOP-2Bの反射法地震探査断面図を取得した。この反射法地震探査は、ドイツGEOMARの研究者と交渉を重ね、東京大学海洋研究所の平朝彦の協力を得て実現した。

2003年のプロポーザル改訂時の前後と記憶するが、オホーツク海・ベーリング海を一つの航海 (60日) で掘削するには大規模過ぎる/長期間過ぎるので、プロポーザルを二つに分離してはどうかとの打診があった。これに対して高橋とRaveloは、北太平洋中層水変動や北半球氷床発達史の解明という研究目的を達成するためにはオホーツク海とベーリング海両方の掘削が必要であり、航海期間の制約からプロポーザルを分割することは受け入れがたいという結論を出した。この方針を貫き、最終的に高評価を得たProposal 477は採択された。2002年から2003年はODPからIODPへの移行期にあたり、プロポーザル審査を含めた枠組みが大きく変わった。高橋は2001年から2003年まで掘削プロポーザルの科学評価パネルの共同議長を務め、また2004年のIODP Expedition 302北極点掘削航海に参加し、継続的に深海掘削科学と関わった。

2009年夏にProposal 477のベーリング海掘削航海がIODP Expedition 323として実現した。残念ながらオホーツク海部分は先延ばしとなり、やがて掘削候補からも消えた。この背景には、ロシア排他的経済水域内でアメリカの掘削船JOIDES Resolutionが科学掘削を行うためのアメリカ—ロシア間の交渉が難航したことがある。提案メンバーのSergey Gorbarenkoを通じ、モスクワのロシア政府に向けて最大限の活動を行ったが許可が得られなかった。ベーリング海の掘削予定点にも同様にロシア排他的経済水域内のサイトが含まれており、ぎりぎりまでロシア政府に掘削許可を求める努力が続けられた。Sergey Gorbarenkoが指名したロシア人研究者1名をExpedition 323のオブザーバーとして招待して待ったが、ついに出航地のカナダ・ビクトリアに現れなかった。出航後も2カ月間の航海のうち前半1カ月は、いつ許可が下りても対応できるように掘削計画を立てて実施した。IODPテキサス A&M大学の関係者によると、ロシア政府に宛てたアメリカ国務省経由のExpedition 323での掘削リクエストは、航海前の1年以上 (数回以上) と航海中 (毎週月曜日) に発信されたが一度も返答がなかったとのことである。

3.3 今後の展望

オホーツク海の基盤岩上には厚さ数キロメートルに達する厚い堆積物が存在し、新生代の長期的な環境変動を記録していることが期待される。これまでにオホーツク海で採取された堆積物は、長いものでも50 mほどに過ぎ

ない。海底下数百メートルの堆積物試料は、掘削によってのみ採取可能だが、2014年にオホーツク海中央部の Peanut Holeが消滅してからは、オホーツク海で科学掘削が可能な海域は極めて限られる。その限られた海域である網走沖と知床沖を掘削候補点とし、岡崎裕典と関宰は、地球深部探査船ちきゅうを用いた表層科学掘削プログラム(Chikyu Shallow Core Program: SCORE)に、最終間氷期以降の100-1000年スケールの中層水変動復元を主目的としたプロポーザルを提出し採択されている。プロポーザル提出時に関連研究者に声を掛けたところ、台湾・中国・アメリカ・ドイツ・イギリスの研究者が提案メンバーに加わることになり、科学掘削の未踏域であるオホーツク海に寄せられる強い科学的関心が伺えた。SCOREプログラムは、ちきゅう航海のトランジットを利用して掘削するものであり、残念ながらオホーツク海をトランジットする可能性は低いため、近い将来に実現できるかどうかは不透明である。

現行の国際深海科学掘削計画(International Ocean Discovery Program: IODP)が2024年9月で終わり、深海掘削科学の枠組みが大きく変わろうとしている。長らく科学掘削を牽引したアメリカの掘削船JOIDES Resolutionが引退し、日本と欧州を中心に後継となる国際共同プログラムを立ち上げようとしている。次期プログラムでは、掘削海域に応じて備船したプラットフォームを用いて科学掘削を実施する計画である。また、中国も独自の掘削船を建造し運用を開始する。2023年現在、ロシアの政治情勢は極めて厳しいが、オホーツク海初の科学掘削実現を目指し、国際的な連携の努力を続けていく必要がある。

謝辞

ODP/IODP proposal 477のオホーツク海掘削提案に際しては、Sergey Gorbarenko博士、Alexander Svarichevsky博士、および平朝彦博士をはじめ多くの方々のご協力を得た。佐川拓也博士からはオホーツク海堆積物中の有孔虫Mg/Ca比分析についてご教示いただいた。この場をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

Artemova, A. et al. (2017) Palaeoceanography changes in the Okhotsk Sea during Late Pleistocene and Holocene according to diatoms. *Quat. Int.*, **459**, 175-186.

Barash, M.S. et al. (2005) On the Quaternary Paleocology

of the southeastern part of the Sea of Okhotsk from lithology and planktonic foraminifera. *Oceanol.*, **45**, 257-268.

Barash, M.S. et al. (2006) Paleocology of the central Sea of Okhotsk during the middle Pleistocene (350-190 ka) as Inferred from micropaleontological data. *Oceanol.*, **46**, 501-512.

Bosin, A. et al. (2015) Regionalized primary paleoproduction variability in the sea of Okhotsk during late Pleistocene and Holocene. *J. Asian Earth Sci.*, **114**, 534-540.

Bubenshchikova, N. et al. (2008) Living benthic foraminifera of the Okhotsk Sea: Faunal composition, standing stocks and microhabitats. *Mar. Micropaleontol.*, **69**, 314-333.

Bubenshchikova, N. et al. (2015) Variations of Okhotsk Sea oxygen minimum zone: Comparison of foraminiferal and sedimentological records for latest MIS 12-11c and latest MIS 2-1. *Mar. Micropaleontol.*, **121**, 52-69.

Cao, M. et al. (2023) Deglacial records of terrigenous organic matter accumulation off the Yukon and Amur rivers based on lignin phenols and long-chain n-alkanes. *Clim. Past*, **19**, 159-178.

Chebykin, E.P. et al. (2015) Geochemical multielement signatures of glacial and interglacial facies of the Okhotsk Sea deepwater sediments during the past 350 kyr: A response to global climate changes at the orbital and millennial scales. *Paleoceanography*, **30**, 303-316.

Chou, Y.-M. et al. (2011) Magnetostratigraphy of marine sediment core MD01-2414 from Okhotsk Sea and its paleoenvironmental implications. *Mar. Geol.*, **284**, 149-157.

Chou, Y.-M. et al. (2021) Controls on terrigenous detritus deposition and oceanography changes in the central Okhotsk Sea over the past 1550 ka. *Front. Earth Sci.*, **9**, doi: 10.3389/feart.2021.683984

Davis, C.V. et al. (2020) Sea surface temperature across the Subarctic North Pacific and marginal seas through the past 20,000 years: A paleoceanographic synthesis. *Quat. Sci. Rev.*, **246**, 106519.

Derkachev, A.N. et al. (2012) Characteristics and ages of tephra layers in the central Okhotsk Sea over the last 350 kyr. *Deep-Sea Res. II*, **61-64**, 179-192.

Gorbarenko, S.A. (1996) Stable isotope and lithologic evidence of late-glacial and Holocene oceanography of the Northwestern Pacific and its marginal seas. *Quat. Res.*, **46**, 230-250.

Gorbarenko, S.A. et al. (2002a) Magnetostratigraphy and

- tephrochronology of the upper Quaternary sediments in the Okhotsk Sea: implication of terrigenous, volcanogenic and biogenic matter supply. *Mar. Geol.*, **183**, 107-129.
- Gorbarenko, S.A. et al. (2002b) Glacial Holocene environment of the southeastern Okhotsk Sea: evidence from geochemical and palaeontological data. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **177**, 237-263.
- Gorbarenko, S.A. et al. (2004) Late Pleistocene–Holocene oceanographic variability in the Okhotsk Sea: geochemical, lithological and paleontological evidence. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **209**, 281-301.
- Gorbarenko, S.A. et al. (2007a) Millennium scale environment changes of the Okhotsk Sea during last 80 kyr and their phase relationship with global climate changes. *J. Oceanogr.*, **63**, 609–623.
- Gorbarenko, S.A. et al. (2007b) Paleoenvironmental changes in the northern shelf of the Sea of Okhotsk during the Holocene. *Stratigr. Geol. Correl.*, **15**, 656–671.
- Gorbarenko, S.A. et al. (2010a) Paleoenvironment changes in the NW Okhotsk Sea for the last 18kyr determined with micropaleontological, geochemical, and lithological data. *Deep-Sea Res. I*, **57**, 797-811.
- Gorbarenko, S.A. et al. (2010b) Orbital and millennial-scale environmental and sedimentological changes in the Okhotsk Sea during the last 350 kyr. *Glob. Planet. Change*, **72**, 79-85.
- Gorbarenko, S.A. et al. (2012) Responses of the Okhotsk Sea environment and sedimentology to global climate changes at the orbital and millennial scale during the last 350 kyr. *Deep-Sea Res. II*, **61–64**, 73-84.
- Gorbarenko, S.A. et al. (2014) The response of the Okhotsk Sea environment to the orbital-millennium global climate changes during the Last Glacial Maximum, deglaciation and Holocene. *Glob. Planet. Change*, **116**, 76-90.
- Gorbarenko, S.A. et al. (2017) Glacial terminations and the Last Interglacial in the Okhotsk Sea; Their implication to global climatic changes. *Glob. Planet. Change*, **152**, 51-63.
- Gorbarenko, S.A. et al. (2020) Orbital and millennial-scale environmental and hydrological changes of the central Okhotsk Sea over the last 136 kyr inferred from micropaleontological (radiolarian and benthic foraminifera), geochemical and lithological proxies and the mechanisms responsible for them. *Quat. Sci. Rev.*, **247**, 106569.
- Harada, N. et al. (2001) General features of sediment cores collected in the Okhotsk Sea and the adjacent area during the MR00-K03 cruise. 海洋科学技術センター試験研究報告, **43**, 45-54.
- Harada, N. et al. (2004) Northward and southward migrations of frontal zones during the past 40 kyr in the Kuroshio-Oyashio transition area. *Geochem. Geophys. Geosystems*, **5**, Q09004.
- Harada, N. et al. (2006) Rapid fluctuation of alkenone temperature in the southwestern Okhotsk Sea during the past 120 ky. *Glob. Planet. Change*, **53**, 29-46.
- Harada, N. et al. (2008) Freshwater impacts recorded in tetraunsaturated alkenones and alkenone sea surface temperatures from the Okhotsk Sea across millennial-scale cycles. *Paleoceanography*, **23**, PA3201.
- Harada, N. et al. (2012) Sea surface temperature changes in the Okhotsk Sea and adjacent North Pacific during the last glacial maximum and deglaciation. *Deep-Sea Res. II*, **61–64**, 93-105.
- Harada, N. et al. (2014) Holocene sea surface temperature and sea ice extent in the Okhotsk and Bering Seas. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 242-253.
- Horikawa, K. et al. (2010) Intermediate water formation in the Bering Sea during glacial periods: Evidence from neodymium isotope ratios. *Geology*, **38**, 435–438.
- Horikawa, K. et al. (2021) Neodymium isotope records from the Northwestern Pacific: Implication for deepwater ventilation at Heinrich Stadial 1. *Paleoceanogr. Paleoclimatology*, **36**, e2021PA004312.
- Ijiri, A. et al. (2010) Carbon isotope biogeochemistry of acetate in sub-seafloor sediments in the Sea of Okhotsk near Sakhalin Island, Russia. *Res. Org. Geochem.*, **26**, 95-105.
- Inagaki, F. et al. (2003) Microbial Communities Associated with Geological Horizons in Coastal Subseafloor Sediments from the Sea of Okhotsk. *Appl. Environ. Microbiol.*, **69**, 7224-7235.
- Inoue, S. and T. Yamazaki (2010) Geomagnetic relative paleointensity chronostratigraphy of sediment cores from the Okhotsk Sea. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **291**, 253-266.
- Itaki, T. and K. Ikehara (2004) Middle to late Holocene changes of the Okhotsk Sea Intermediate Water and their relation to atmospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L24309.
- Itaki, T. et al. (2008) Last glacial–Holocene water structure in the southwestern Okhotsk Sea inferred from radiolarian assemblages. *Mar. Micropaleontol.*, **67**, 191-215.
- Iwasaki, S. et al. (2012) Paleooceanography of the last 500 kyrs in the central Okhotsk Sea based on geochemistry. *Deep-Sea Res. II*, **61–64**, 50-62.

- Jimenez-Espejo, F.J. et al. (2018) Changes in detrital input, ventilation and productivity in the central Okhotsk Sea during the marine isotope stage 5e, penultimate interglacial period. *J. Asian Earth Sci.*, **156**, 189-200.
- Jousé, A.P. (1971) Diatoms in Pleistocene sediments from the northern Pacific Ocean. In: Riedel, W. R., and Funnell, B. M., Eds., *The Micropaleontology of Oceans*, Oxford: Cambridge University Press, 407-421.
- Katsuki, K. et al. (2010) Sea-ice distribution and atmospheric pressure patterns in southwestern Okhotsk Sea since the Last Glacial Maximum. *Glob. Planet. Change*, **72**, 99-107.
- Kawahata, H. et al. (2003) Terrestrial—oceanic environmental change in the southern Okhotsk sea during the Holocene. *Quat. Int.*, **108**, 67-76.
- Kawamura, N. et al. (2007) Diagenetic effect on magnetic properties of marine core sediments from the southern Okhotsk Sea. *Earth Planets Space*, **59**, 83-93.
- Keigwin, L.D. (1998) Glacial-age hydrography of the far northwest Pacific Ocean. *Paleoceanography*, **13**, 323-339.
- Keigwin, L.D. (2002) Late Pleistocene-Holocene paleoceanography and ventilation of the Gulf of California. *J. Oceanogr.*, **58**, 421-432.
- Khim, B.-K. et al. (2012) Reconstruction of surface water conditions in the central region of the Okhotsk Sea during the last 180 kyrs. *Deep-Sea Res. II*, **61-64**, 63-72.
- Khusid, T.A. et al. (2005) Late Quaternary environmental changes on the southeastern slope of the Sea of Okhotsk inferred from benthic foraminifera. *Oceanology*, **45**, 440-446.
- Koizumi, I. et al. (2003) Diatom record of the late Holocene in the Okhotsk Sea. *Mar. Micropaleontol.*, **49**, 139-156.
- Lattaud, J. et al. (2018) A comparison of late Quaternary organic proxy-based paleotemperature records of the central Sea of Okhotsk. *Paleoceanogr. Paleoclimatology*, **33**, 732-744.
- Lattaud, J. et al. (2019) A multiproxy study of past environmental changes in the Sea of Okhotsk during the last 1.5 Ma. *Org. Geochem.*, **132**, 50-61.
- Lembke-Jene, L. et al. (2017) Deglacial variability in Okhotsk Sea Intermediate Water ventilation and biogeochemistry: Implications for North Pacific nutrient supply and productivity. *Quat. Sci. Rev.*, **160**, 116-137.
- Lembke-Jene, L. et al. (2018) Rapid shift and millennial-scale variations in Holocene North Pacific Intermediate Water ventilation. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **115**, 5365-5370.
- Lisiecki, L.E., and M.E. Raymo (2005) A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, **20**, PA1003.
- Liu, Y.-J. et al. (2006) Mineralogical and geochemical changes in the sediments of the Okhotsk Sea during deglacial periods in the past 500 kyrs. *Glob. Planet. Change*, **53**, 47-57.
- Lo, L. et al. (2018) Precession and atmospheric CO_2 modulated variability of sea ice in the central Okhotsk Sea since 130,000 years ago. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **488**, 36-45.
- Matsumoto, K. et al. (2002) Interior hydrography and circulation of the glacial Pacific Ocean. *Quat. Sci. Rev.*, **21**, 1693-1704.
- Matul, A. et al. (2002) Late Quaternary polycystine radiolarian datum events in the Sea of Okhotsk. *Geo-Mar. Lett.*, **22**, 25-32.
- Matul, A. et al. (2009) Stratigraphy and major paleoenvironmental changes in the Sea of Okhotsk during the last million years inferred from radiolarian data. *Oceanology*, **49**, 93-100.
- Matul, A. et al. (2016) Late Quaternary changes of the oxygen conditions in the bottom and intermediate waters on the western Kamchatka continental slope, the Sea of Okhotsk. *Deep-Sea Res. II*, **125-126**, 184-190.
- Max, L. et al. (2012) Sea surface temperature variability and sea-ice extent in the subarctic northwest Pacific during the past 15,000 years. *Paleoceanography*, **27**, PA3213.
- Max, L. et al. (2014) Pulses of enhanced North Pacific Intermediate Water ventilation from the Okhotsk Sea and Bering Sea during the last deglaciation. *Clim. Past*, **10**, 591-605.
- Max, L. et al. (2020) Evaluation of reconstructed sea surface temperatures based on Uk37' from sediment surface samples of the North Pacific. *Qua. Sci. Rev.*, **243**, 106496.
- Morley, J.J. (1980) Analysis of the abundance variations of the subspecies of *Cycladophora davisiana*. *Mar. Micropaleontol.*, **5**, 205-214.
- Morley, J.J. and J.D. Hays (1983) Oceanographic conditions associated with high abundances of the radiolarian *Cycladophora davisiana*. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **66**, 63-72.
- Morley, J.J. et al. (1991) Late Pleistocene/Holocene radiolarian and pollen records from sediments in the Sea of Okhotsk. *Paleoceanography*, **6**, 121-131.
- Narita, H. et al. (2002) Biogenic opal indicating less productive northwestern North Pacific during the glacial ages. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi:10.1029/2001GL014320.
- Nürnberg, D. and R. Tiedemann (2004) Environmental change

- in the Sea of Okhotsk during the last 1.1 million years. *Paleoceanography*, **19**, PA4011.
- Nürnberg, D. et al. (2011) Okhotsk Sea ice coverage and Kamchatka glaciation over the last 350 ka — Evidence from ice-rafted debris and planktonic $\delta^{18}\text{O}$. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **310**, 191-205.
- Ohkushi, K. et al. (2003) Last Glacial–Holocene change in intermediate-water ventilation in the Northwestern Pacific. *Quat. Sci. Rev.*, **22**, 1477-1484.
- Okazaki, Y. et al. (2003) Radiolarians under the seasonally sea-ice covered conditions in the Okhotsk Sea: flux and their implications for paleoceanography. *Mar. Micropaleontol.*, **49**, 195-230.
- Okazaki, Y. et al. (2005) Late Quaternary paleoceanographic changes in the southwestern Okhotsk Sea: Evidence from geochemical, radiolarian, and diatom records. *Deep-Sea Res. II*, **52**, 2332-2350.
- Okazaki, Y. et al. (2006) *Cycladophora davisiana* (Radiolaria) in the Okhotsk Sea: A key for reconstructing glacial ocean conditions. *J. Oceanogr.*, **62**, 639–648.
- Okazaki, Y. et al. (2014) Glacial to deglacial ventilation and productivity changes in the southern Okhotsk Sea. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **395**, 53-66.
- Ono, A. et al. (2005) The Dansgaard-Oeschger cycles discovered in the up stream source region of the North Pacific Intermediate Water formation. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L11607.
- Riethdorf, J.-R. et al. (2013) Deglacial development of (sub) sea surface temperature and salinity in the subarctic northwest Pacific: Implications for upper-ocean stratification. *Paleoceanography*, **28**, 91–104.
- Sakamoto, T. et al. (2005) Ice-rafted debris (IRD)-based sea-ice expansion events during the past 100kyrs in the Okhotsk Sea. *Deep-Sea Res. II*, **52**, 2275-2301.
- Sakamoto, T. et al. (2006) Millennial-scale variations of sea-ice expansion in the southwestern part of the Okhotsk Sea during the past 120 kyr: Age model and ice-rafted debris in IMAGES Core MD01-2412. *Glob. Planet. Change*, **53**, 58-77.
- Sancetta, C. (1979) Oceanography of the North Pacific during the last 18,000 years: Evidence from fossil diatoms. *Mar. Micropaleontol.*, **4**, 103-123.
- Sancetta, C. (1981) Oceanographic and ecologic significance of diatoms in surface sediments of the Bering and Okhotsk seas. *Deep Sea Res. A*, **28**, 789-817.
- Sancetta, C. (1982) Distribution of diatom species in surface sediments of the Bering and Okhotsk Seas. *Micropaleontol.*, **28**, 221–257.
- Sancetta, C. (1992) Primary production in the glacial North Atlantic and North Pacific oceans. *Nature*, **360**, 249–251.
- Sato, M.M. et al. (2002) Barium increasing prior to opal during the last termination of glacial ages in the Okhotsk Sea sediments. *J. Oceanogr.*, **58**, 461–467.
- Seki, O. et al. (2003) Sediment core profiles of long-chain n-alkanes in the Sea of Okhotsk: Enhanced transport of terrestrial organic matter from the last deglaciation to the early Holocene. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1001, doi:10.1029/2001GL014464.
- Seki, O. et al. (2004a) Reconstruction of paleoproductivity in the Sea of Okhotsk over the last 30 kyr. *Paleoceanography*, **19**, PA1016.
- Seki, O. et al. (2004b) Variation of alkenone sea surface temperature in the Sea of Okhotsk over the last 85 kyrs. *Org. Geochem.*, **35**, 347-354.
- Seki, O. et al. (2005) Decreased surface salinity in the Sea of Okhotsk during the last glacial period estimated from alkenones. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L08710.
- Seki, O. et al. (2007) Time-series sediment trap record of alkenones from the western Sea of Okhotsk. *Mar. Chem.*, **104**, 253-265.
- Seki, O. et al. (2009) Large changes in seasonal sea ice distribution and productivity in the Sea of Okhotsk during the deglaciations. *Geochem. Geophys. Geosystems*, **10**, Q10007.
- Seki, O. et al. (2012) Assessment for paleoclimatic utility of terrestrial biomarker records in the Okhotsk Sea sediments. *Deep-Sea Res. II*, **61–64**, 85-92.
- Seki, O. et al. (2014) Assessment and calibration of TEX₈₆ paleothermometry in the Sea of Okhotsk and sub-polar North Pacific region: Implications for paleoceanography. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 254-266.
- Shiga, K. and I. Koizumi (1999) Latest Quaternary oceanographic changes in the Okhotsk Sea based on diatom records. *Mar. Micropaleontol.*, **38**, 91-117.
- 嶋田智恵子ほか (2000) 珪藻分析に基づく南西オホーツク海の完新世古海洋環境復元. 第四紀研究, **39**, 439-449.
- Shimada, C. et al. (2004) Millennial-scale variability of Holocene hydrography in the southwestern Okhotsk Sea: diatom evidence. *The Holocene*, **14**, 641-650.
- Shimono, T., Y et al. (2014) Influence of sampling on magnetic

- susceptibility anisotropy of soft sediments: comparison between gravity and piston cores. *Earth Planets Space*, **66**, doi: 10.1186/1880-5981-66-3.
- Sugisaki, S. et al. (2012) High resolution optically stimulated luminescence dating of a sediment core from the southwestern Sea of Okhotsk. *Geochem. Geophys. Geosystems*, **13**, Q0AA22.
- Takahashi, K. (1998) The Bering and Okhotsk Seas: modern and past paleoceanographic changes and gateway impact. *J. Asian Earth Sci.*, **16**, 49-58.
- Takahashi, K. et al. (2009) Pliocene-Pleistocene paleoceanography and climate history of the Bering Sea, *IODP Scientific Prospectus*, 111 pp.
- Takahashi, K. et al. (2011) *Proc. Integrated Ocean Drill. Prog.*, 323.
- Ternois, Y. et al. (2000) Alkenone sea surface temperature in the Okhotsk Sea for the last 15 kyr. *Geochem. J.*, **34**, 283-293.
- Ternois, Y. et al. (2001) A biomarker approach for assessing marine and terrigenous inputs to the sediments of Sea of Okhotsk for the last 27,000 years. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **65**, 791-802.
- Vasilenko, Y.P. et al. (2017) Millennial mode of variability of sea ice conditions in the Okhotsk Sea during the last glaciation (MIS 4–MIS 2). *Quat. Int.*, **459**, 187-200.
- Vasilenko, Y.P. et al. (2019) Orbital-scale changes of sea ice conditions of Sea of Okhotsk during the last glaciation and the Holocene (MIS 4–MIS 1). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **533**, 109284.
- Wang, W.-L. and L.-C. Wang (2008) Reconstruction of oceanographic changes based on the diatom records of the central Okhotsk Sea over the last 500000 years. *Terr. Atmospheric Ocean. Sci.*, **19**, 403-411.
- Wang, K.-S. et al. (2017) Sediment provenance variations in the southern Okhotsk Sea over the last 180ka: Evidence from light and heavy minerals. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **479**, 61-70.
- Wang, K. et al. (2021a) Spatial distribution and provenance of detrital minerals of surface sediment in the Okhotsk Sea. *Front. Earth Sci.*, **9**, 636850.
- Wang, K.J. et al. (2021b) Group 2i Isochrysidales produce characteristic alkenones reflecting sea ice distribution. *Nat. Commun.*, **12**, doi: 10.1038/s41467-020-20187-z.
- Yamazaki, T. et al. (2013) Sea-ice conditions in the Okhotsk Sea during the last 550 kyr deduced from environmental magnetism. *Geochem. Geophys. Geosystems*, **14**, 5026–5040.
- Yamazaki, T. et al. (2016) Paleomagnetic inclination variations during the last 200 kyr in the Okhotsk Sea and their relation to persistent non-axial-dipole field. *Earth Planets Space*, **68**, 174.
- Yanchenko, E. and S. Gorvarenko (2015) Radiolarian responses of the central Okhotsk Sea to the global orbital and millennial scale climate oscillations over last 90 kyr. *J. Asian Earth Sci.*, **114**, 601-610.
- Zou, J. et al. (2015) Evidence of sea ice-driven terrigenous detritus accumulation and deep ventilation changes in the southern Okhotsk Sea during the last 180 ka. *J. Asian Earth Sci.*, **114**, 541-548.