

Title	オホーツク海の古海洋研究
Author(s)	岡崎, 裕典; 関, 宰; 高橋, 孝三
Citation	低温科学, 82, 119-133
Issue Date	2024-03-29
DOI	10.14943/lowtemsci.82.119
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/91788
Туре	bulletin (article)
File Information	10_p119-1333_LT82.pdf



オホーツク海の古海洋研究

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・海氷・ 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

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 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 海氷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

- 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古海洋研究を続けて いる (Gorbarenko et al., 2002a, 2002b, 2004, 2007a, 2007b, 2010a, 2010b, 2012, 2014, 2017, 2020). Keigwin 12, 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以降の海氷被 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古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「オホーツク海氷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 セクトの古海洋記録を構築した.戦略的基礎研究におけ る古海洋研究では、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), 海氷被覆状態変化 (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 Lavrentvev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 に基づく海氷被覆分布変動 (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 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Corg/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 した年代構築と海氷被覆復元 (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、ロシア船を傭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航海ではアムール河の河 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 を傭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1.5万年間の表層水温 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.海氷や植生などの古気候記録はLGMのオホー ッ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ことが示唆され 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 最終水期の塩分を推定し、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) δ^{18} 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 研究により海氷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氷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間氷期を含む過去 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 海氷

海氷や海氷域に生息する珪藻種を用いて、オホーツク 海における海氷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散 虫個体が連続産出することから、LGMのオホーツク海は 西部を含め季節海氷であったと指摘した.後にKatsuki et al. (2010) は、海氷珪藻種の産出によるオホーツク海にお ける海氷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氷が、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).

海氷珪藻種と並び,海氷が運搬した粗粒の砕屑物 (Ice-Rafted Debris, IRD) は,代表的な海氷指標である. 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 以降の海氷被覆分布変化(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,灰色のハッチは海氷被 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 海氷被覆分布変化を復元した. その結果,氷期に海氷被 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 み大規模に海氷が拡大したこと,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氷被覆は氷期において も季節海氷であったと考えられているが,北部の海氷被覆 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13万年間の海氷珪藻が合成 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) は砕屑物中の希土類を分析することで、砕屑物 を火山性・海氷・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氷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源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源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 平洋中層水の起源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源域としてベーリン 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 ンリッヒ亜氷期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(Bølling-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で見つかっているが、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年代初頭のモホール計画(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



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・海氷被覆・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

No. Drill Site	Latitude	Longitude	Water	Estimated Sed.	Penetration	Drilling	Drilling	Logging		
			Depth (m)	Rate (cm/kyr)	(m)	Priority	Time (d)	Time (d)		
OKHOTSK SEA - High Priority Sites										
Academy of Sciences Rise										
ASR-1A	49°07.0'N	150°25.0'E	1250	38	200	High	2.2	-		
ASR-2A	48°37.0'N	150°50.0'E	2140	18	700	High	4.3	0.8		
Central Okhotsk Plateau										
COP-2C	51°50.1'N	146°53.8'E	1275	10	700	High	3.8	0.8		
Kamchatka										
KAM-2A	51°50.0'N	153°28.0'E	675	6.6	200	High	1.9	-		
Pegasus Rise										
PGR-1A	47°05.7'N	145°56.0'E	3000	15	200	High	3.5	-		
						e	Total 17.3	days		
OKHOTSK SEA - Other than High Priority Sites										
Academy of Sciences Rise										
ASR-3A	48°58.0'N	150°25.0'E	1425	14	700	H-Alt	3.8	0.8		
ASR-4A	48°43.0'N	151°11.0'E	1725	14	700	H-Alt	4.0	0.8		
Central Okhotsk Plateau										
COP-2B	52°03.7'N	147°01.1'E	1275	10	200	H-Alt	2.2	-		
Sakhalin										
SAK-2A	51°21.0'N	145°55.0'E	937	10	200	Inter.	2.2	-		
							Total 12.2 days			
	Drill Site ny of Science ASR-1A ASR-2A l Okhotsk Pl COP-2C tatka KAM-2A ts Rise PGR-1A ny of Science ASR-3A ASR-4A l Okhotsk Pl COP-2B in SAK-2A	Drill Site Latitude ny of Sciences Rise ASR-1A 49°07.0'N ASR-2A 48°37.0'N l Okhotsk Plateau COP-2C 51°50.1'N atka KAM-2A 51°50.0'N as Rise PGR-1A 47°05.7'N OKHO ny of Sciences Rise ASR-3A 48°58.0'N ASR-4A 48°43.0'N l Okhotsk Plateau COP-2B 52°03.7'N in SAK-2A 51°21.0'N	Drill Site Latitude Longitude OKHOTSK SE ny of Sciences Rise ASR-1A 49°07.0'N 150°25.0'E ASR-1A 49°07.0'N 150°25.0'E ASR-2A 48°37.0'N 150°50.0'E l Okhotsk Plateau COP-2C 51°50.1'N 146°53.8'E COP-2C 51°50.0'N 153°28.0'E 153°28.0'E tatka KAM-2A 51°50.0'N 153°28.0'E VBR-1A 47°05.7'N 145°56.0'E OKHOTSK SEA - O OKHOTSK SEA - O ny of Sciences Rise ASR-3A 48°58.0'N 150°25.0'E ASR-4A 48°43.0'N 151°11.0'E l Okhotsk Plateau COP-2B 52°03.7'N 147°01.1'E in SAK-2A 51°21.0'N 145°55.0'E	Drill Site Latitude Longitude Water Depth (m) OKHOTSK SEA - High Print OKHOTSK SEA - High Print ny of Sciences Rise ASR-1A 49°07.0'N 150°25.0'E 1250 ASR-1A 49°07.0'N 150°25.0'E 1250 ASR-1A 49°07.0'N 150°25.0'E 1250 ASR-2A 48°37.0'N 150°50.0'E 2140 l Okhotsk Plateau COP-2C 51°50.1'N 146°53.8'E 1275 atka KAM-2A 51°50.0'N 153°28.0'E 675 us Rise PGR-1A 47°05.7'N 145°56.0'E 3000 OKHOTSK SEA - Other than Hi ny of Sciences Rise ASR-3A 48°58.0'N 150°25.0'E 1425 ASR-4A 48°43.0'N 151°11.0'E 1725 1 Okhotsk Plateau COP-2B 52°03.7'N 147°01.1'E 1275 in SAK-2A 51°21.0'N 145°55.0'E 937	Drill Site Latitude Longitude Water Depth (m) Estimated Sed. Rate (cm/kyr) OKHOTSK SEA - High Priority Sites ny of Sciences Rise ASR-1A 49°07.0'N 150°25.0'E 1250 38 ASR-1A 49°07.0'N 150°25.0'E 1250 38 ASR-1A 49°07.0'N 150°25.0'E 1250 38 ASR-2A 48°37.0'N 150°50.0'E 2140 18 OKHOTSK SEA - Diventional Colspan="2">Diventional Colspan="2">ASR-2A 48°37.0'N 150°50.0'E 2140 18 COP-2C 51°50.1'N 146°53.8'E 1275 10 AKAM-2A 51°50.0'N 153°28.0'E 675 6.6 OKHOTSK SEA - Other than High Priority Sites my of Sciences Rise ASR-3A 48°58.0'N 150°25.0'E 1425 14 ASR-4A 48°43.0'N 151°11.0'E 1725 14 I Okhotsk Plateau COP-2B 52°03.7'N 147°01.1'E 1275 10 I 10	Drill Site Latitude Longitude Water Depth (m) Estimated Sed. Rate (cm/kyr) Penetration (m) OKHOTSK SEA - High Priority Sites my of Sciences Rise 38 200 ASR-1A 49°07.0'N 150°25.0'E 1250 38 200 ASR-2A 48°37.0'N 150°50.0'E 2140 18 700 1 Okhotsk Plateau COP-2C 51°50.1'N 146°53.8'E 1275 10 700 atka KAM-2A 51°50.0'N 153°28.0'E 675 6.6 200 ts Rise PGR-1A 47°05.7'N 145°56.0'E 3000 15 200 OKHOTSK SEA - Other than High Priority Sites my of Sciences Rise ASR-3A 48°58.0'N 150°25.0'E 1425 14 700 ASR-3A 48°58.0'N 150°25.0'E 1425 14 700 ASR-4A 48°43.0'N 151°11.0'E 1725 14 700 I Okhotsk Plateau COP-2B 52°03.7'N 147°01.1'E 1275	Drill Site Latitude Longitude Water Depth (m) Estimated Sed. Rate (cm/kyr) Penetration (m) Drilling Priority OKHOTSK SEA - High Priority Sites ny of Sciences Rise 48°37.0'N 150°25.0'E 1250 38 200 High ASR-1A 49°07.0'N 150°25.0'E 1250 38 200 High ASR-2A 48°37.0'N 150°50.0'E 2140 18 700 High aSR-2C 51°50.1'N 146°53.8'E 1275 10 700 High atka KAM-2A 51°50.0'N 153°28.0'E 675 6.6 200 High s Rise PGR-1A 47°05.7'N 145°56.0'E 3000 15 200 High N of Sciences Rise ASR-3A 48°58.0'N 150°25.0'E 1425 14 700 H-Alt ASR-4A 48°43.0'N 151°11.0'E 1725 14 700 H-Alt I Okhotsk Plateau <td c<="" td=""><td>Drill Site Latitude Longitude Water Depth (m) Estimated Sed. Rate (cm/kyr) Penetration (m) Drilling Priority Drilling Time (d) OKHOTSK SEA - High Priority Sites 0 High 2.2 ASR-1A 49°07.0'N 150°25.0'E 1250 38 200 High 2.2 ASR-2A 48°37.0'N 150°25.0'E 1250 38 200 High 4.3 l Okhotsk Plateau 0 0 700 High 3.8 38 cOP-2C 51°50.0'N 153°28.0'E 675 6.6 200 High 1.9 ts Rise PGR-1A 47°05.7'N 145°56.0'E 3000 15 200 High 3.5 rotal 17.3 OKHOTSK SEA - Other than High Priority Sites 700 H-Alt 3.8 ny of Sciences Rise ASR-3A 48°58.0'N 150°25.0'E 1425 14 700 H-Alt 3.8 ASR-4A 48°43.0'N 151°11.0'E 1725 14 700 H-Alt 4.0</td></td>	<td>Drill Site Latitude Longitude Water Depth (m) Estimated Sed. Rate (cm/kyr) Penetration (m) Drilling Priority Drilling Time (d) OKHOTSK SEA - High Priority Sites 0 High 2.2 ASR-1A 49°07.0'N 150°25.0'E 1250 38 200 High 2.2 ASR-2A 48°37.0'N 150°25.0'E 1250 38 200 High 4.3 l Okhotsk Plateau 0 0 700 High 3.8 38 cOP-2C 51°50.0'N 153°28.0'E 675 6.6 200 High 1.9 ts Rise PGR-1A 47°05.7'N 145°56.0'E 3000 15 200 High 3.5 rotal 17.3 OKHOTSK SEA - Other than High Priority Sites 700 H-Alt 3.8 ny of Sciences Rise ASR-3A 48°58.0'N 150°25.0'E 1425 14 700 H-Alt 3.8 ASR-4A 48°43.0'N 151°11.0'E 1725 14 700 H-Alt 4.0</td>	Drill Site Latitude Longitude Water Depth (m) Estimated Sed. Rate (cm/kyr) Penetration (m) Drilling Priority Drilling Time (d) OKHOTSK SEA - High Priority Sites 0 High 2.2 ASR-1A 49°07.0'N 150°25.0'E 1250 38 200 High 2.2 ASR-2A 48°37.0'N 150°25.0'E 1250 38 200 High 4.3 l Okhotsk Plateau 0 0 700 High 3.8 38 cOP-2C 51°50.0'N 153°28.0'E 675 6.6 200 High 1.9 ts Rise PGR-1A 47°05.7'N 145°56.0'E 3000 15 200 High 3.5 rotal 17.3 OKHOTSK SEA - Other than High Priority Sites 700 H-Alt 3.8 ny of Sciences Rise ASR-3A 48°58.0'N 150°25.0'E 1425 14 700 H-Alt 3.8 ASR-4A 48°43.0'N 151°11.0'E 1725 14 700 H-Alt 4.0	

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.

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氷の下流域にあたり海氷分布変化の 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 縁ペガサ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労した. 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年以降は福岡一ウラジオストク)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 ッ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, 掘削海域に応じて傭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 Paleoceanology

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

- Barash, M.S. et al. (2006) Paleoceanography 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 350kyr: 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.* 1, 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 millennialscale 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) Paleoceanography 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 δ^{18} 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 CO₂ 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 δ^{18} 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 seaice 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 diat oms. *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**, doiI: 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.