

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A)（海外学術調査）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01617

研究課題名（和文）ベーリング海堆積物掘削：氷期 退氷期の北太平洋中深層水の起源域と時空間変動解明

研究課題名（英文）Glacial-deglacial changes in the North Pacific Intermediate Water

研究代表者

岡崎 裕典（Okazaki, Yusuke）

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：80426288

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 31,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、研究の空白域となっていたカムチャッカ海峡周辺を含めたベーリング海西部（ロシア排他的経済水域内）において海底堆積物を採取し、代替指標記録から最終退氷期における海洋循環速度と鉛直水塊構造を復元した。その結果、ベーリング海とオホーツク海の間で中層水の起源域が最終氷期（2万年前）のベーリング海から完新世（過去1万年間）のオホーツク海へとスイッチしたこと、および2万年前から1万年前の最終退氷期には海水準変動に連動した1000年スケールで中層水の消長があったことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海洋中深層水の循環は1000年スケールの気候変動の要である。本研究では北太平洋で形成される唯一の中層水である北太平洋中層水を対象とし、2万年前の最終氷期以降の循環速度と起源を復元した。研究の空白域となっていたカムチャッカ海峡ではじめて海底堆積物を採取し、北太平洋の中深層循環が2万年前から1万年前に顕著に変動したことを明らかにした。これらの成果は1000年スケールの気候変動に果たす北太平洋の役割の理解につながるものである。

研究成果の概要（英文）：We have analyzed sediment cores retrieved from the Bering Sea to reconstruct the glacial to deglacial changes in the ocean ventilation, particularly for the North Pacific Intermediate Water (NPIW). Source regions of the NPIW have switched from the Bering Sea during glaciation to the Okhotsk Sea during the Holocene. Millennial-scale oscillations of NPIW ventilation were suggested during the last deglacial period between 20,000 and 10,000 years ago.

研究分野：古海洋学

キーワード：海洋循環 北太平洋中層水 最終氷期 最終退氷期

1. 研究開始当初の背景

風によって駆動され海洋表層を水平方向に循環する風成循環と海水の密度差によって駆動され海洋深層まで達する熱塩循環から成る海洋大循環は、膨大な熱・塩・二酸化炭素などの物質の輸送を担う数十年から1,000年オーダーの地球規模の気候変動の要である。現在の海洋では、大西洋の熱塩循環が、北半球高緯度への極向き熱輸送に主要な役割を果たしている。

最終氷期から温暖な完新世への移行期である最終退氷期(約2万年前から1万年前)に、北米氷床の崩壊に伴う北大西洋熱塩循環の顕著な弱体化が2度起こったと考えられている。ハインリッヒ亜氷期1(17,500-15,000年前, HS1)とヤングドリラス期(12,900-11,500年前, YD)と呼ばれるこれらのイベントにおいて北半球で顕著な寒冷化が起こった。これら最終退氷期の気候変動のメカニズムは、大西洋を通じた南北両極間の熱輸送により説明されてきた。これに対し、研究代表者らは、海底堆積物に記録された浮遊性および底生有孔虫殻の放射性炭素年代差と気候モデルシミュレーションにより、北大西洋深層水形成が弱体化したハインリッヒ亜氷期1に、北太平洋高緯度域で沈み込んだ深層水が形成される太平洋を起点とする熱塩循環が成立し、大西洋に代わって北半球高緯度域への熱輸送を担っていたという新しい機構を提唱した(Okazaki et al., 2010, Science 329, 200-204)。これは、北大西洋を起点とする熱塩循環が弱体化すると深層水形成場が北太平洋へと交代し、北太平洋が北半球高緯度域へ熱を輸送する機構である。気候変動において受け身と考えられていた北太平洋が南北熱輸送の担い手になるという新たな役割を示唆した。以降、海洋大循環の終着点としての北太平洋という固定観念から脱却し、海洋大循環の起点としての北太平洋という新たな視点に基づく議論が盛んになってきた。しかし最終退氷期に北太平洋で形成される中深層水の起源域や規模については様々な意見がありまとまっていなかった(例えば Jaccard and Galbraith, 2013, GRL 40, 199-203; Rae et al., 2014, Paleoceanography 29, 645-667)。古気候モデルシミュレーションは、北西太平洋が北太平洋起源の深層水の主要流路となることを示している。従って、最終退氷期の北太平洋中深層水の消長を議論する上で、北西太平洋の研究が鍵となる。2010年以降、研究代表者らは北太平洋起源の中深層水変動研究を進展させ、(1)北太平洋の水塊構造が約15,000年前に急激に変化したこと(Okazaki et al., 2012, Clim. Past 8, 17-24)(2)現在の北太平洋中層水の起源域であるオホーツク海は、最終氷期には主要な深層水形成場ではなかったが、最終退氷期初期にベンチレーションが活発になったこと(Okazaki et al., 2014, Paleo3 395, 53-66)を明らかにした。これらの研究を進め、最終氷期以降の北太平洋中深層水の時空間変動を復元する作業を続けてきた。

2. 研究の目的

本研究では、研究の空白域となっていたカムチャッカ海峡周辺を含めたベーリング海西部(ロシア排他的経済水域内)において海底堆積物を採取し、代替指標記録から最終退氷期における海洋循環速度と鉛直水塊構造を復元する。その復元結果と、先行研究でまとめられた北西太平洋の海洋循環速度データセットを比較し、ベーリング海西部が北太平洋中深層水の起源域であったかどうか検証することで、退氷期の気候変動における北太平洋の役割を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

2018年7月23日-9月13日に実施されたロシア船Multanovskiy号MU18航海に乗船し、ベーリング海ロシア排他的経済水域のカムチャッカ海峡・シルシヨフ海嶺・北西部陸棚斜面域において合計5本のピストンコア試料を採取した。コア試料の岩相記載・色測定・帯磁率測定・ITRAX XRF コアロガー測定を行い、一次データを取得した。これらの結果に基づきカムチャッカ海峡で採取したKST-2Aコア試料(56°11.44'N; 165°01.40'E; 水深3545m)を重点的に分析することにした。既存試料のなかで、ベーリング海中央部のパウアーズ海嶺で採取されたKH99-3 BOW-9Aコア(54°02.23'N; 178°40.58'E; 水深2391m)とIODP EXP 323 U1341Cコア(54°02.00'N; 179°00.54'E; 水深2139.5m)を使用した。

各コア試料の年代モデルは浮遊性有孔虫の放射性炭素年代・底生有孔虫の酸素同位体層序・古地磁気強度・炭酸カルシウムのピーク対比に基づき構築した。その結果、上記3本のコア試料はいずれも最終氷期から最終退氷期の層準を連続的に記録していた。中深層水循環復元には堆積物コア試料の同じ層準から拾い出した底生有孔虫と浮遊性有孔虫の放射性炭素年代差およびベンチレーションの良い中層水に生息する放散虫種である*Cycladophora davisiana*の産出量を指標とした。海洋表層環境の指標として脂肪酸の濃度と水素および炭素同位体比、アルケノン水温、浮遊性有孔虫の炭素・酸素安定同位体比を用いた。加えて、生物生産指標として生物源オパール含量、炭酸カルシウム含量、有機炭素含量、および珪藻群集を使用した。

4. 研究成果

4-1. 海洋中深層循環

使用したコア試料のなかで最も有孔虫殻の保存がよかった BOW-9A コア試料から浮遊性有孔虫と底生有孔虫を連続的に拾い出し、米国ウッズホール海洋研究所において放射性炭素年代測定を行った。得られた年代から海洋中深層における放射性炭素濃度を計算し最終氷期以降の時系列変化を得た(図1)。BOW-9A コア(水深 2391 m)の放射性炭素濃度は、約 2 万年前の最終氷期

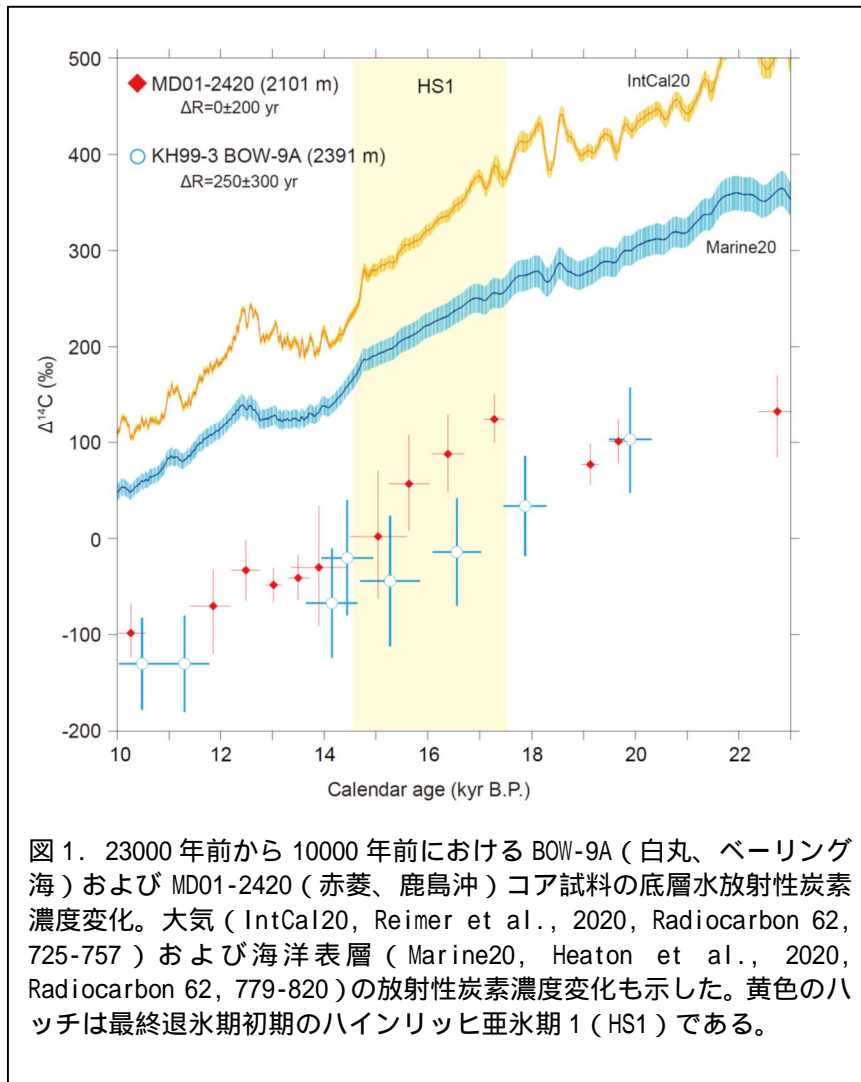


図1. 23000年前から10000年前におけるBOW-9A(白丸、ベーリング海)およびMD01-2420(赤菱、鹿島沖)コア試料の底層水放射性炭素濃度変化。大気(IntCal20, Reimer et al., 2020, Radiocarbon 62, 725-757)および海洋表層(Marine20, Heaton et al., 2020, Radiocarbon 62, 779-820)の放射性炭素濃度変化も示した。黄色のハッチは最終氷期初期のハインリッヒ亜氷期1(HS1)である。

最盛期(LGM)以降、海洋表層の放射性炭素濃度(Marine20)と平行に変動し、最終退氷期初期(HS1)に有意な増加は示さなかった。北西太平洋中緯度域鹿島沖MD01-2420コア試料(水深2101m)の放射性炭素濃度変化と比べると、LGMでは同等の濃度が最終退氷期初期(HS1)では鹿島沖のほうが有意に高かった(底層水の年齢が若かった)。このことは最終退氷期初期の北太平洋起源の中深層水がベーリング海の水深2400mまで達していなかったことを示す。

放散虫中層種の*C. davisiana*については、KST-2A、BOW-9A、U1341Cの3試料についてデータを得た。その結果、カムチャッカ海峡のKST-2Aでは、最終退氷期の2度の温暖イベントであるベーリング・アレード期(BA)とプレボレアル期(PB)で

*C. davisiana*が産出ピークを示したのに対し、バウアーズ海嶺のBOW-9AとU1341CではLGMからHS1を含む最終退氷期初期も高い産出頻度であった。また、過去1万年間の完新世を通じ3本のコア試料全てで*C. davisiana*の産出頻度は低かった。

上記の底層水放射性炭素濃度と放散虫中層種産出のデータをあわせ、先行研究のオホーツク海の結果(Okazaki et al., 2014, Paleoclimatol. 395, 53-66)を踏まえて考察し、以下の中深層水ベンチレーション変動史を示す。LGMはベーリング海で活発に中(深)層水が形成され、オホーツク海での中層水形成は限定的であった。最終退氷期のHS1になるとベーリング海に加え、オホーツク海でも中層水形成が活発になった。ただしベーリング海で形成された中深層水は水深2400mの放射性炭素年齢を若くするほどの影響は持たなかった。BA以降は1000年スケールでベーリング海とオホーツク海の間で主要な中層水形成域がスイッチし、北半球の温暖期であるBAとPBにはベーリング海が、寒冷期であるヤングドリアス(YD)期にはオホーツク海がそれぞれ中層水の形成場となった。完新世に入ると中層水形成域はオホーツク海に完全に移り、完新世中期に最盛期を迎え、完新世後期にと中層水形成が弱化した。このシナリオはBOW-9Aコアのネオジウム同位体がHS1からBAに軽い値を持つことから指示される。ここで示したベーリング海とオホーツク海における中深層水形成変動の理由として、海水準上昇に伴うベーリング海峡・宗谷海峡の開通がベーリング海とオホーツク海の表層流や表面塩分に影響を与えたことが挙げられる。

4-2. バイオマーカー分析

KST-2A コアの脂肪酸水素同位体比・ACL(n-アルカンの平均鎖長)・CPI(n-アルカンの炭素選択指数)およびアルケノン分析を行った(図2)。KST-2A コアのアルケノン濃度はLGMから最終退氷期の層準の大半で検出限界以下であったが、YDの海表面水温が完新世より3ほど低かつ

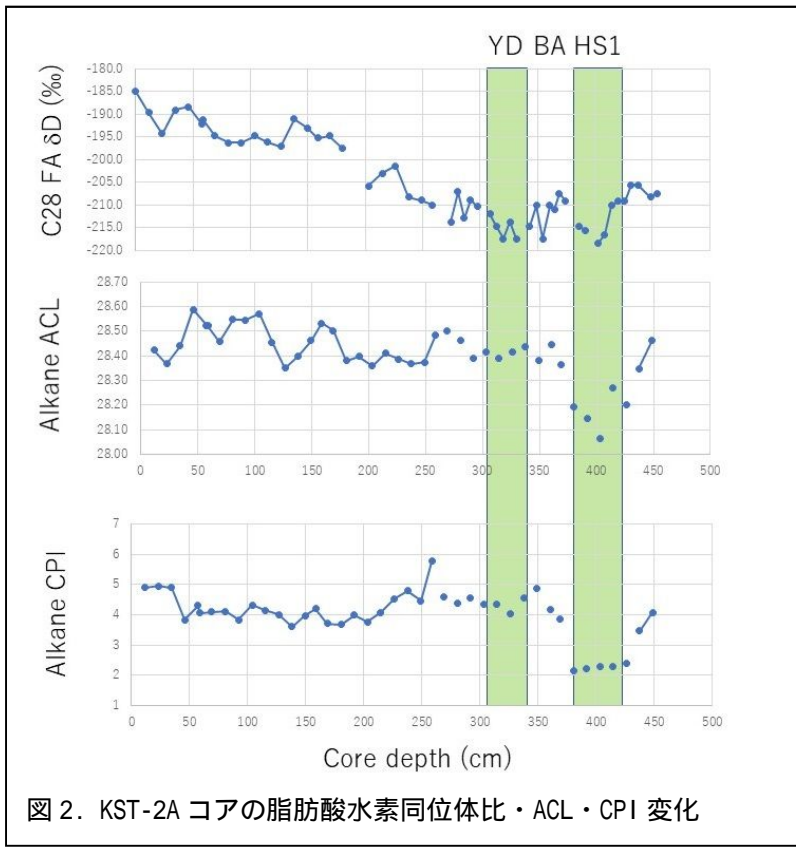


図2. KST-2A コアの脂肪酸水素同位体比・ACL・CPI 変化

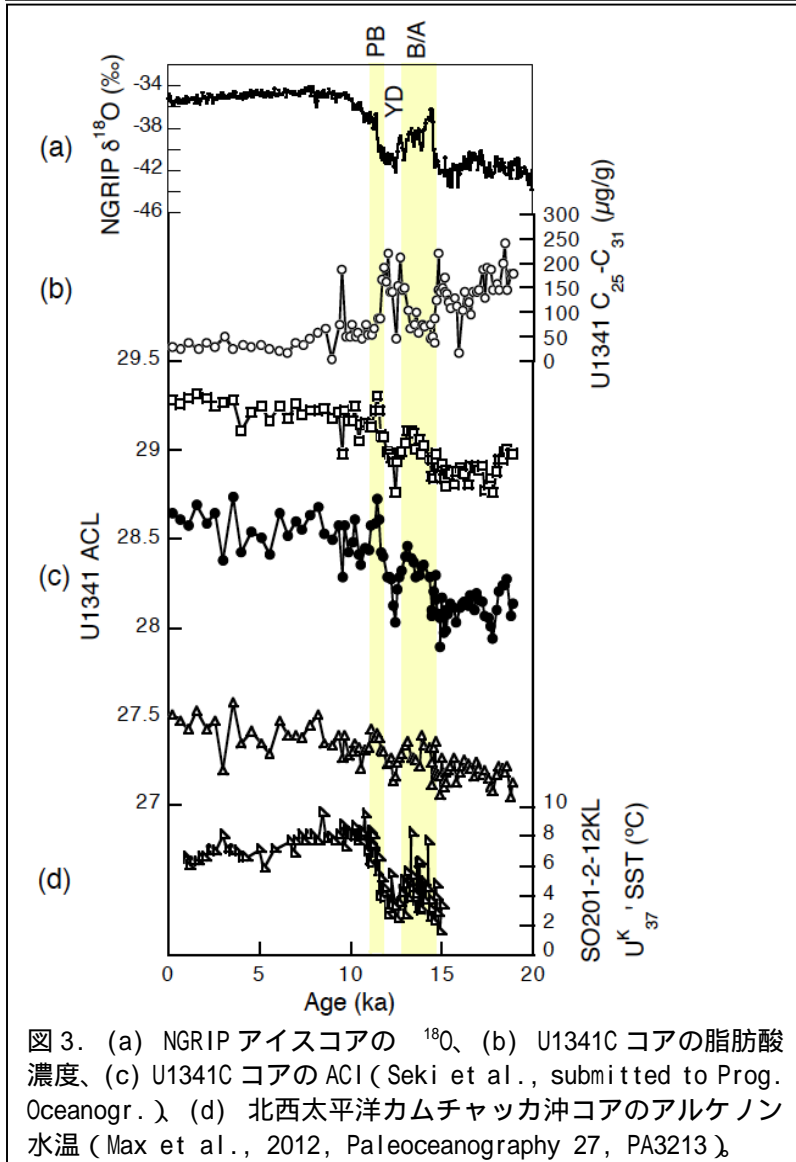


図3. (a) NGRIP アイスコアの ¹⁸O、(b) U1341C コアの脂肪酸濃度、(c) U1341C コアの ACL (Seki et al., submitted to Prog. Oceanogr.) (d) 北西太平洋カムチャッカ沖コアのアルケノン水温 (Max et al., 2012, Paleoceanography 27, PA3213)。

たことがわかった。脂肪酸水素同位体比は、LGM から退氷期にかけて完新世よりも 20‰ほど軽い値を示した。このことは退氷期、特に HS1 と YD のカムチャッカ海峡周辺域がより湿潤であったことを示唆している。

KST-2A コアおよび U1341C コアの脂肪酸 ACL はいずれも退氷期の BA と完新世に高いグリーンランド型のパターンを示した(図 3)。ACL に影響を及ぼす要因としては植生・降水・気温・水温変化がある。本研究の結果は、近傍の水温変化と良く対応していた。脂肪酸濃度変化は LGM から HS1、YD に高い値を示した。このことは LGM に陸化していたベーリング海北部の広大な陸棚域(ベリンジア)が海水準上昇に伴い冠水していったタイミングと整合的であった。

ベーリング海の主要な基礎生産者は、生物源オパールの被殻を持つ植物プランクトンの珪藻である。KST-2A コアの生物源オパール含量変化は、LGM から退氷期にかけて低く、完新世になって増加した。一方、BOW-9A コアでは生物源オパール含量は、BA 期と完新世に高かった。KST-2A コアの生物源オパール含量変化パターンは、オホーツク海の海底堆積物コア試料でよく見られるものであった。ベーリング海西部は中央部と比べ、冬季の季節氷が拡大しやすい海域である。LGM から退氷期にかけて、冬季の季節氷被覆期間が長く、珪藻の生産が低かったことを示唆している。ITRAX XRF コアロガー結果と生物源オパールのデータを比較することで、臭素が本海域の生物生産指標として有効なことを示した。臭素は海洋沈降粒子とともに深海底へ輸送されることが知られ

ている。オホーツク海季節氷域に設置されたセジメントトラップ試料および海水試料中の珪藻群集組成と季節変動を調べ、*Fragilariopsis cylindrus* を筆頭にいくつか海水指標種を選定した (Nakamura et al., 2020. *J. Micropaleontol.* 39, 77-92)。また、Mu18 航海中に採水した表層水試料中の珪藻群集解析を行い、陸棚域と海盆域で大きく群集組成が異なることを明らかにした。これら現生の珪藻群集の知見は、コア試料中の珪藻群集解析を行い、最終氷期や最終退氷期のベーリング海における海水被覆や沿岸水の消長、および生物生産変化を復元する際に有用である。

引用文献

- Heaton, T.J. et al., 2020, Marine20—the marine radiocarbon age calibration curve (0–55,000 cal BP), *Radiocarbon* 62, 779-820.
- Jaccard, S.L. and E.D. Galbraith, 2013, Direct ventilation of the North Pacific did not reach the deep ocean during the last deglaciation, *Geophys. Res. Lett.* 40, 199-203.
- 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.
- Nakamura, H. et al., 2020. An assessment of diatom assemblages in the Okhotsk Sea as a proxy for sea-ice cover, *J. Micropaleontol.* 39, 77-92.
- Okazaki, Y. et al., 2010, Deepwater formation in the North Pacific during the last glacial termination, *Science* 329, 200-204.
- Okazaki, Y. et al., 2012, Ventilation changes in the western North Pacific since the last glacial period, *Clim. Past* 8, 17-24.
- Okazaki, Y. et al., 2014, Glacial to deglacial ventilation and productivity changes in the southern Okhotsk Sea, *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* 395, 53-66.
- Rae, J.W.B. et al., 2014, Deep water formation in the North Pacific and deglacial CO₂ rise, *Paleoceanography* 29, 645-667.
- Reimer, P.J. et al., 2020, The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP), *Radiocarbon* 62, 725-757.
- Seki, O. et al., submitted, Assessment of long-chain n-alkane as paleoclimate proxy in the Bering Sea sediments, *Prog. Oceanogr.*

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nakamura Hiroki, Okazaki Yusuke, Konno Susumu, Nakatsuka Takeshi	4. 巻 39
2. 論文標題 An assessment of diatom assemblages in the Sea of Okhotsk as a proxy for sea-ice cover	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Micropalaeontology	6. 最初と最後の頁 77~92
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/jm-39-77-2020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Matsui Hiroki, Horikawa Keiji, Chiyonobu Shun, Itaki Takuya, Ikehara Minoru, Kawagata Shungo, Wakaki-Uchimura Hitomi, Asahara Yoshihiro, Seki Osamu, Okazaki Yusuke	4. 巻 53
2. 論文標題 Integrated Neogene biochemostratigraphy at DSDP Site 296 on the Kyushu-Palau Ridge in the western North Pacific	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Newsletters on Stratigraphy	6. 最初と最後の頁 313-331
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1127/nos/2019/0549	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yusuke Okazaki, Hiroki Nakamura, Kyohei Tanizaki, Fumiaki Nishizono, and Asuka Tomokawa
2. 発表標題 Diatom and silicoflagellate assemblages in the North Pacific: its applications for reconstruction of sea-surface temperature and sea-ice change
3. 学会等名 13th International Conference on Paleoceanography（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡崎裕典・西園史彬・谷崎恭平
2. 発表標題 古水温復元のための北太平洋珪質鞭毛藻データセット構築と堆積物コアへの応用
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡崎裕典、池原研
2. 発表標題 過去3万年間の日本周辺域における テフラ年代に基づく 海洋レザバー効果の制約
3. 学会等名 日本第四紀学会2017年大会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yusuke Okazaki, Hirofumi Asahi
2. 発表標題 Ventilation change in the southern Bering Sea since the last glacial maximum
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡崎裕典
2. 発表標題 最終氷期最盛期以降のベーリング海南部におけるベンチレーション変化
3. 学会等名 地球環境史学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	関 宰 (Seki Osamu) (30374648)	北海道大学・低温科学研究所・准教授 (10101)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	原田 尚美 (Harada Naomi) (70344281)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・センター長 (82706)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ロシア連邦	FERHR I			