

最終氷期(2万年前)以降の日本海水温変化復元に成功 ～ 2万年前の福井沖の年平均水温は 現在のオホーツク海並みの約5℃だった～

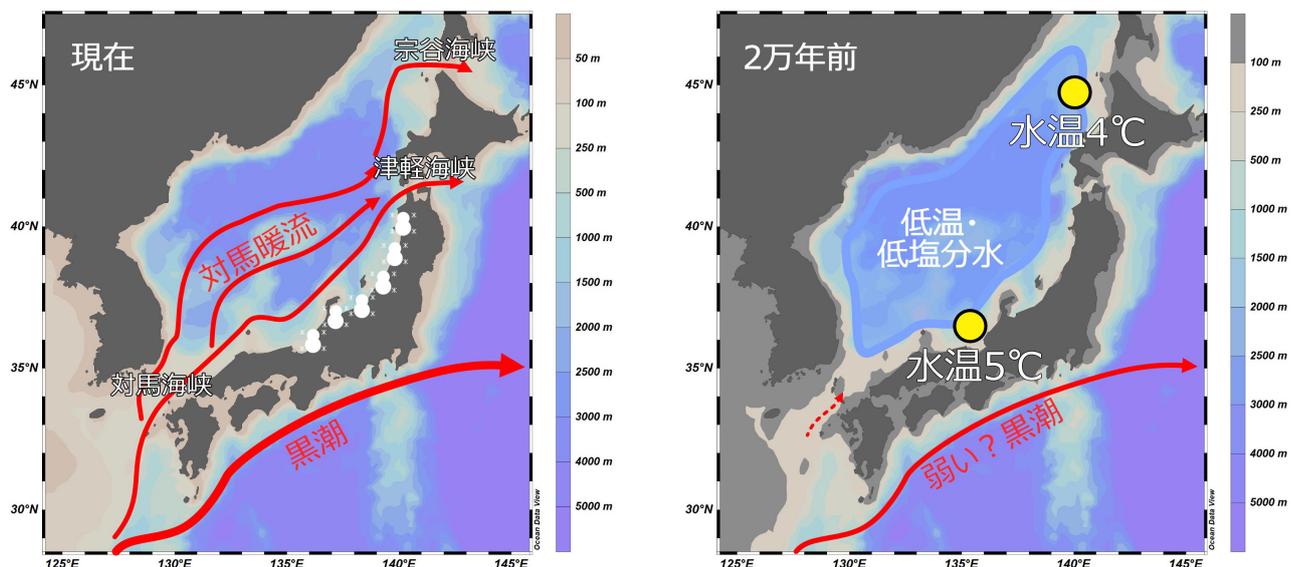
池原 研¹・岡崎 裕典²・小野寺 丈尚太郎³・谷崎 恭平²・西園 史彬²・
江頭 一騎²・友川 明日香²・佐川 拓也⁴・堀川 恵司⁵

※本稿は、2024年12月5日に行ったプレス発表 (https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2024/pr20241205/pr20241205.html) に加筆し、再編したものです。

1. はじめに

水深の浅い4つの海峡(対馬海峡, 津軽海峡, 宗谷海峡, 間宮海峡)で東シナ海やオホーツク海, 太平洋とつながる日本海は, 100 mを超える第四紀の海水準変動の影響を受けて, その海洋環境を大きく変化させてきました。海水準の高い現在の日本海には, 東シナ海から対馬海峡を通じて暖流である黒潮から分岐した対馬海流(対馬暖流)が流入しています(第1図左)。対馬暖流は日本海に熱と塩分を供給し, 日本列島を暖めるとともに, 冬季には日本海の上空を通過するシベリアからの乾いた季節風に暖かい海面から蒸発した水蒸気を与えて, 日本海側での降雪を引き起こすなど, 日本列島の気候にも重要な役割を果たしています。

一方で, 海面が現在よりも100 m以上低かった最終氷期最盛期(2万年前)には, 日本海に通じる海峡は閉じるか狭く, かつ浅くなり, 対馬暖流が流入できなくなりました。塩分の高い海水が日本海に流入できなくなったため, 日本海の表層には低塩分の水が広がりました(例えば, Oba *et al.*, 1991; 第1図右)。このため, 日本海側は寒冷化し, 降水・降雪量が減少するとともに, 密度の低い低塩分水が日本海の表層にフタをすることで日本海の底層は酸欠となり, 生態系にも大きな影響を与えました。このように, 2万年前の日本海が経験した気候と生態系の激変とその後の回復を理解することは, 日本列島の風土を理解する上で重要です。しかし, 2万年前の日本海の水温が何℃だったのか, という問いには答えられていませんでした。それは, 後述する



第1図 現在(左)と最終氷期最盛期(右)の日本海の状態。右図の黄色の丸が福井沖と留萌沖の海底堆積物コアの採取地点。

1 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門
2 九州大学 大学院理学研究院 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744
3 海洋研究開発機構 地球環境部門 〒237-0061 神奈川県横浜須賀町 夏島町 2 番地 15
4 金沢大学 理工研究域地球社会基盤学系 〒920-1192 石川県金沢市角間町
5 富山大学 学術研究部理学系 〒930-8555 富山県富山市五福 3190 番地

キーワード: 珪質鞭毛藻, 北太平洋, 日本海, 表層水温, モダンアナログ法, 最終氷期最盛期, 対馬暖流

ように水温の復元に広く利用されている地球化学的手法による古水温指標が、低塩分の環境ではうまく使えないためでした。この問いに答えるため私たちは、2万年前の堆積物の中にも産出する珪質鞭毛藻の群集組成から水温を推定する方法を確立し、それを日本海の堆積物に適用することで2万年前以降の水温復元に成功しました (Okazaki *et al.*, 2024)。ここでは、その内容についてご紹介します。

2. これまでの日本海の表層水温変化の研究

表層水温の推定には植物プランクトンの石灰質ナノプランクトンのある種が作る有機物であるアルケノンの不飽和度や動物プランクトンの浮遊性有孔虫の殻のマグネシウムとカルシウムの比 (Mg/Ca 比) などが使われます。日本海でもこの2つの方法が水温復元に利用されてきました。アルケノンによる水温復元では、最終氷期最盛期の日本海の表層水温は現在よりも高い値を示しました (Ishiwatari *et al.*, 2001; Fujine *et al.*, 2009; Bae *et al.*, 2014 など)。そしてこの高い復元水温は、最終氷期最盛期の表層水の低い塩分が影響を与えた結果と考えられています。浮遊性有孔虫の Mg/Ca 比による水温復元も、およそ1万年前以降の完新世や海洋酸素同位体ステージ3のうちの3~5万年前については適用されてきました (Horikawa *et al.*, 2019; Sagawa *et al.*, 2023) が、低塩分水が広がった最終氷期最盛期については、通常使われる Mg/Ca 比と水温の関係式を適用することが困難なため、水温復元ができていませんでした。また、プランクトンの群集組成から水温を推定する方法もあります。石灰質の殻を持つ浮遊性有孔虫の *Neoglobobadrina pachyderma* には右巻きの殻を持つ個体と左巻きの殻を持つ個体があります。そして、全体に対する左巻き個体の割合は表層水温と相関関係があると言われています (Kitazato, 1978)。この種は最終氷期最盛期の日本海の堆積物からも産します。そこで大場・谷村 (2012) は、Kitazato (1978) に示されたこの左巻き個体の割合と現在の5月の表層水温との間の関係式を求め、最終氷期最盛期に産するこの種の左巻き個体の割合から、3~6℃という表層水温を推定しました。しかし、この水温復元は表層堆積物のデータセットの制約から2~8℃の範囲でしか使えないという問題点がありました。また、現在の日本海では低温で溶存酸素に富む日本海固有水という水塊が深層を覆うため、深海域では石灰質微化石が溶けてしまいます (Oba *et al.*, 1991)。このため、この方法で最終氷期最盛期から完新世までをカバーする水温復元はできていませんでした。珪質の殻を持つ珪藻や放散虫、珪質鞭毛藻の遺骸は

最終氷期から完新世の堆積物に含まれていますので、これらの微化石を用いた水温復元は可能ですが、これまでこれらの微化石の群集組成から定量的な水温復元はされたことがありませんでした。

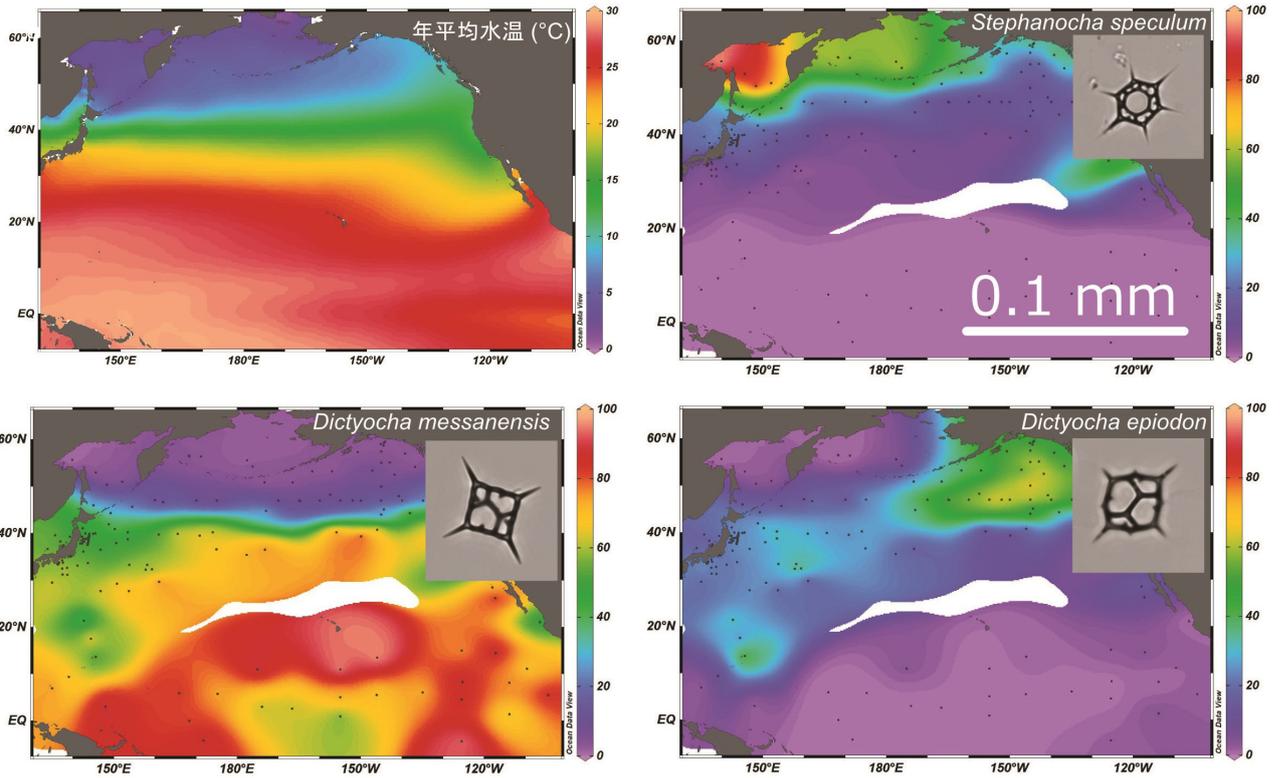
3. 珪質鞭毛藻とその群集組成を用いた水温復元

そこで私たちは、珪質鞭毛藻という海洋表層に生息する植物プランクトンに着目しました。珪質鞭毛藻が作る0.05 mmほどの大きさのガラス質の骨格は、海底堆積物中に残されます。また、その形状は、属・種によって異なります。属のレベルで大雑把な水温との関係は指摘されていました (例えば, Mandra, 1969; 市川, 1970) が、群集組成と表層水温との関係式は確立されていませんでした。今回、先行研究の結果 (Poelchau, 1976) も含めて、北太平洋全域 (赤道付近から北緯60°付近まで) から採取された195試料の海底表層堆積物試料中の珪質鞭毛藻の群集組成を調べたところ、種ごとに水温に対応した明瞭な地理分布をしていることがわかりました (第2図)。そこで、海底表層堆積物試料の採取地点それぞれにおける海表面の年平均水温と珪質鞭毛藻の群集組成の関係 (表層データセット) を作成しました。そして、花粉群集組成から過去の気温変化を復元する手法 (Nakagawa *et al.*, 2002) をこの表層データセットに適用することで、過去の表層水温を推定することができるようになりました。

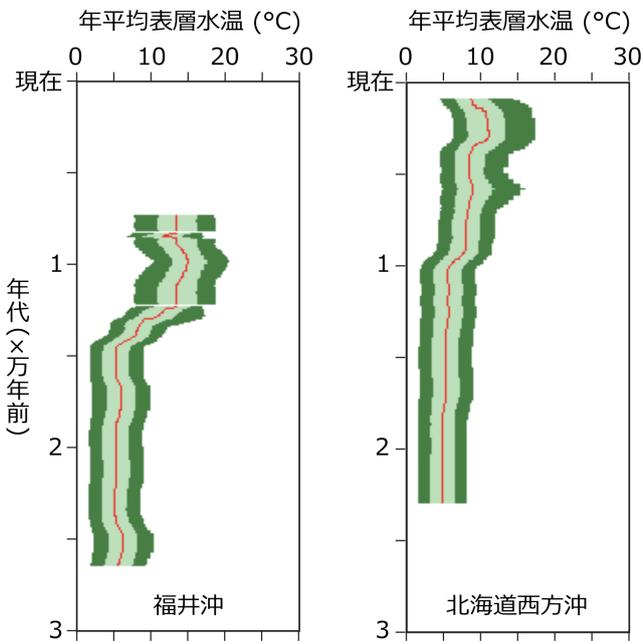
4. 過去2万年間の日本海の表層水温変化

日本海最終氷期最盛期からの表層水温変化を復元するために私たちは、北海道留萌沖と福井沖から採取された海底堆積物コアを用いました (採取地点は、第1図右)。堆積年代の推定は、留萌沖のコアについては19個の浮遊性有孔虫の放射性炭素年代値 (Itaki and Ikehara, 2003) から、福井沖のコアについては22個の浮遊性有孔虫の放射性炭素年代値と噴出年代がわかっている火山灰層の年代 (Sagawa *et al.*, 2023) から求めました。そして、留萌沖のコアについてはおよそ120年前~2万5千年前まで、福井沖のコアについてはおよそ8千年前~2万9千年前までについて、コア試料中の珪質鞭毛藻群集の時系列変化を調べました。その結果、復元された留萌沖と福井沖の2万年前の年平均水温が、それぞれ約4℃と約5℃であったことがわかりました (第3図)。これは、現在のオホーツク海並の水温に相当します。福井県三方湖の堆積物中の花粉群集から復元された最終氷期最盛期の気温は3℃ (中川ほか,

2万年前以降の日本海の水溫変化復元



第2図 現在の北太平洋表層水の年平均水溫（左上）と北太平洋で産出する主要な珪質鞭毛藻の種の全体に占める産出頻度の分布（右上，左下，右下：暖色系で産出頻度が高く，寒色系で低い）(Okazaki et al. (2024) の Fig. 5 を元に作成)。



第3図 福井沖（左）と北海道留萌沖（右）における最終氷期最盛期からの表層水の年平均水溫の復元結果 (Okazaki et al. (2024) の Fig. 7 を元に作成)。

2002) ですので，今回得られた水溫は妥当と言えます。また，2万年前の日本海の北部には季節海氷が発達していたことが報告されていました (Ikehara, 2003) が，今回の結果はそれを水溫から支持します。Ikehara (2003) は，季節海氷が最終氷期最盛期には時には男鹿半島付近まで南下したとしましたが，現在のオホーツク海並の水溫が福井沖まで張り出していたことから，Ikehara (2003) が推定したよりも南まで季節海氷が南下した可能性があるかもしれません。

また，最終氷期最盛期後の海水準上昇に伴う日本海への暖流の流入時期にも新しい発見がありました。これまで，日本海への対馬暖流の流入開始は1万年前～8千年前とされてきました (例えば，Koizumi, 1989；中川ほか，2002；Itaki et al., 2004)。しかし，今回復元された表層水溫変化は，福井沖では1万4千年前，留萌沖では1万年前くらいから水溫が上昇し始めた (第3図) ことを示します。約1万4千年前の福井沖での水溫上昇は，従来考えられていたよりも早い時期になりますが，珪藻や放散虫といった他のプランクトン群集でも暖流の要素がこの時期から認められるようになります (例えば，Koizumi et al., 2006；Itaki et al., 2007) ので，この時期に暖流が日本海に入り始めたこ

とを示唆します。また、福井沖と留萌沖で水温上昇の時期が数千年違うことは、その時間をかけて、暖流の及ぶ範囲が徐々に北上したことを示しています。

5. おわりに

今回私たちは、珪質鞭毛藻という海洋表層に生息する植物プランクトンの遺骸を用いて表層水の年平均水温を復元する方法を確立しました。今回の方法は、北太平洋の広い範囲に適用できます。また、表層データセットでわかるように珪質鞭毛藻はさまざまな海域の堆積物に含まれますので、今後、広い海域で珪質鞭毛藻群集を使った水温復元が行われることが期待できます。日本海においても、対馬暖流の流路に沿った海域で採取された海底堆積物コア試料について分析を進めることで、水温分布や対馬暖流の時空間変化をより詳しく捉えることが可能になると考えられます。これらと、陸上の古気候記録や縄文時代以降の人間活動の記録を比較することによって、日本海の海洋環境の変化が日本列島の自然や人間の暮らしとどのように関係してきたかが明らかになることが期待されます。

文 献

- Bae, S. W., Lee, K. E., Park, Y., Kimoto, K., Ikehara, K. and Harada, N. (2014) Sea surface temperature and salinity changes near the Soya Strait during the last 19 ka. *Quaternary International*, **344**, 200–210.
- Fujine, K., Tada, R. and Yamamoto, M. (2009) Paleotemperature response to monsoon activity in the Japan Sea during the last 160 kyr. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **280**, 350–360.
- Horikawa, K., Kodaira, T., Ikehara, K., Murayama, M. and Zhang, J. (2019) Millennial-scale fluctuations in water volume transported by the Tsushima Warm Current in the Japan Sea during the Holocene. *Global and Planetary Change*, **183**, 103028.
- 市川 渡 (1970) わが国における珪質鞭毛虫類およびエブリア類の層位学的研究の現状. 地学雑誌, **79**, 80–87.
- Ikehara, K. (2003) Late Quaternary seasonal sea-ice history of the northeastern Japan Sea. *Journal of Oceanography*, **59**, 585–593.
- Ishiwatari, R., Houtatsu, M. and Okada, H. (2001) Alkenone-sea surface temperatures in the Japan Sea over the past 36 kyr: warm temperatures at the last glacial maximum. *Organic Geochemistry*, **32**, 57–67.
- Itaki, T. and Ikehara, K. (2003) Radiolarian biozonation for the upper Quaternary in the Japan Sea. *The Journal of the Geological Society of Japan*, **109**, 96–105.
- Itaki, T., Ikehara, K., Motoyama, I. and Hasegawa, S. (2004) Abrupt ventilation changes in the Japan Sea over the last 30 ky: evidence from deep-dwelling radiolarians. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **208**, 263–278.
- Itaki, T., Komatsu, N. and Motoyama, I. (2007) Orbital- and millennial-scale changes of radiolarian assemblages during the last 220 kyrs in the Japan Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **247**, 115–130.
- Kitazato, H. (1978) Distribution of the *Globigerina pachyderma* (Ehrenberg) in the Kuril and Japan Basins, and the fluctuation of coiling direction of *G. pachyderma* in the Core P109. *Geological Survey of Japan Cruise Report*, no. 11, 56–59.
- Koizumi, I. (1989) Holocene pulses of diatom growths in the warm Tsushima Current in the Japan Sea. *Diatom Research*, **4**, 55–68.
- Koizumi, I., Tada, R., Narita, H., Irino, T., Aramaki, T., Oba, T. and Yamamoto, H. (2006) Paleooceanographic history around the Tsugaru Strait between the Japan Sea and the Northwest Pacific Ocean since 30 cal kyr BP. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **232**, 36–52.
- Mandra, Y. T. (1969) Silicoflagellates: A new tool for the study of Antarctic Tertiary climates. *Antarctic Journal of United States*, **4**, 172–174.
- Nakagawa, T., Tarasov, P. E., Nishida, K., Gotanda, K. and Yasuda, Y. (2002) Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Japan: application to surface and Late Quaternary spectra. *Quaternary Science Reviews*, **21**, 2099–2113.
- 中川 毅・Tarasov, P. E.・西田 詩・安田喜憲 (2002) 日本海沿岸、北陸地方における最終氷期一完新世変動に伴う気温と季節性の変動の復元. 地学雑誌, **111**, 900–911.
- 大場忠道・谷村好洋 (2012) 最終氷期最盛期前後の日本海の表層環境. 地質学雑誌, **118**, 376–386.

- Oba, T., Kato, M., Kitazato, H., Koizumi, I., Omura, A., Sakai, T. and Takayama, T. (1991) Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during the last 85,000 years. *Paleoceanography*, **6**, 499–518.
- Okazaki, Y., Onodera, J., Tanizaki, K., Nishizono, F., Egashira, K., Tomokawa, A., Sagawa, T., Horikawa, K. and Ikehara, K. (2024) Silicoflagellate assemblages in the North Pacific surface sediments: an application of the modern analog method to reconstruct the glacial sea surface temperature in the Japan Sea. *Progress in Earth and Planetary Science*, **11**, 62.
- Poelchau, H. S. (1976) Distribution of Holocene silicoflagellates in North Pacific sediments. *Micropaleontology*, **22**, 164–193.
- Sagawa, T., Hasegawa, T., Narita, Y., Yokoyama, M., Kubota, Y., Okazaki, Y., Goto, A. S., Suzuki, Y., Ikehara, K. and Nakagawa, T. (2023) Millennial-scale paleotemperature change in the Japan Sea during Marine Isotope Stage 3: impact of meridional oscillation of the subpolar front. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **626**, 111713.
-
- IKEHARA Ken, OKAZAKI Yusuke, ONODERA Jonaotaro, TANIZAKI Kyohei, NISHIZONO Fumiaki, EGASHIRA Kazuki, TOMOKAWA Asuka, SAGAWA Takuya and HORIKAWA Keiji (2025) Sea surface temperature change in the Japan Sea since the last glacial maximum.
-

(受付：2025年1月31日)