

# 大阪湾における海洋の温暖化に関する古海洋学的研究

加 三千宣

愛媛大学沿岸環境科学研究センター准教授

## 概要

海洋の温暖化は、生態系や水産資源、経済活動に温度上昇に伴う様々な問題を引き起こす可能性がある。大阪湾では、今より 1℃海水温が上昇するのはいつになるだろうか。瀬戸内海では定期観測が 40 年程度行われてきたが、100 年以上にわたって徐々に進行する水温上昇率の見積りはより長い記録が必要となる。本研究では、堆積物に記録された水温を復元することによって、大阪湾の過去 100 年間の水温上昇率を求めた。底生有孔虫殻の Mg/Ca 比の分析の結果、大阪湾の冬～春の水深 18m の水温が 100 年間で約 0.8℃の上昇率で上昇していることを示唆した。得られた水温上昇率は、今後温度上昇に伴って予想される様々な問題解決のための指針作成に役立てられることが期待される。

## はじめに

海洋温暖化による 1℃の上昇は、ノリ養殖種付けの遅延や高温耐性が低い生物の生息範囲の縮小・消滅、底泥からの栄養塩溶出量の変化や海底貧酸素化等、水産資源や海洋環境の様々な問題を引き起こす可能性がある。温度上昇に対する環境や資源の管理方策を検討する上で地球温暖化によって何年後に 1℃上昇するのか、すなわち温度上昇率を見積ることが必要である。大阪湾の定期観測は 1970 年代以降からなされてきたが、数十年スケールの気候変動に起因する水温変動成分が大きいために、40 年程度の観測データでは地球温暖化に由来する長期的な水温上昇率を見積もるのはこれまで困難であった。本研究では、海底堆積物に記録された大阪湾の水温を復元し、過去 100 年間の水温上昇率を明らかにすることを目的とし、水温指標となる底生有孔虫殻の Mg/Ca 比を分析した。

## 手法

本研究では、過去の水温を復元するための代替指標として古海洋学の分野でよく用いられている、有孔虫殻の Mg/Ca 比を用いて水温を求める。これまで水温との関係式が多くの有孔虫種で求められており、大阪湾に生息が確認されている底生有孔虫の一種 *Ammonia beccarii* の殻の Mg/Ca 比と水温との関係が培養実験から明らかになっている (Toyofuku et al., 2011)。分析に用いた試料は、大阪湾の水深 18m で採取された長さ 104 cm の海底柱状試料 OS3 (図 1) (Yasuhara et al., 2007) で、Pb-210・Cs-137 の放射能測定により約 140 年分に相当する、生物攪乱の影響が少ない試料であることが確かめられている (Yasuhara et al., 2007)。試料は約 2.3 cm の間隔で切り分け、4.7cm 間隔の

10年程度の時間解像度で分析した。Mg/Ca比分析は、有孔虫殻を10~30個体を顕微鏡下で拾い出し(Tsujimoto et al., 2008)、物理的・化学的手法で有機物や酸化物等の不純物を取り除いた後、酸へ溶解してICP-MS(Agilent Technologies 7500 series)にて分析した。

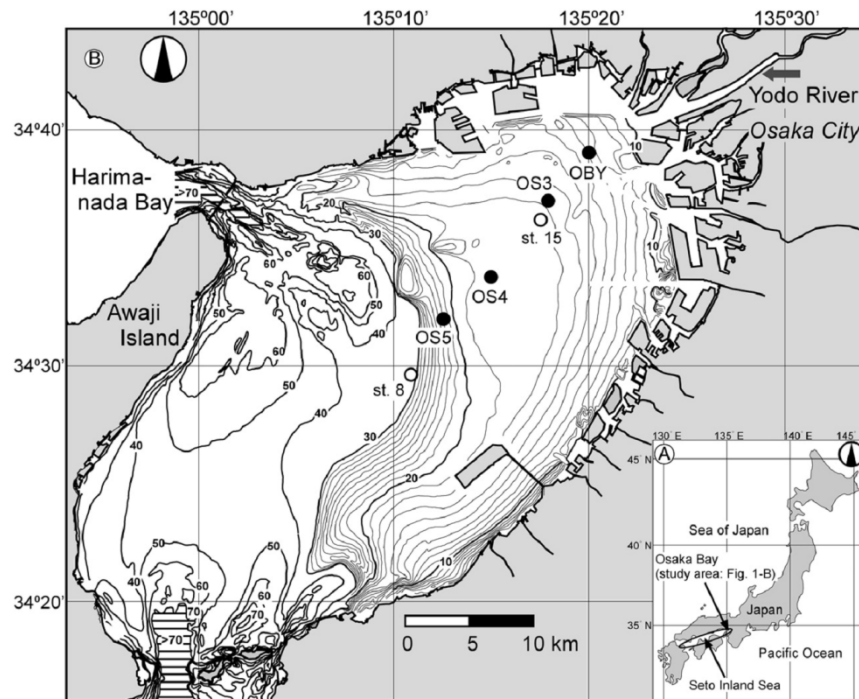


図1 分析に用いた海底堆積物柱状試料の採取位置(OS3)と浅海定線観測点 St. 15(大阪府水産試験場, 1974-2000)

## 結果

*Ammonia beccarii* の Mg/Ca 比は、全期間の平均が 3.0 mmol/mol であった。通常、1900 年初頭以前では±20 年程度の年代誤差があるものの、1900 年以前は 2.4 mmol/mol 以下で、1900 年代前期に 7.5 mmol/mol の高い値を示し、その後 1920-40 年で 1.5 mmol/mol の低い値を示した(図2)。1940 年以降(5 年程度以下の年代誤差)では、ゆるやかな上昇を示し、80 年代、90 年代に低い値を取るものの、1920-40 年に比べて高い値を示す時期が多い。Mg/Ca 比は、以下の培養実験から求められた式(Toyofuku et al., 2011)から水温に変換することが可能である。

$$\text{Mg/Ca (mmol/mol)} = 0.575 \times e^{-0.0531T}$$

$$\text{Mg/Ca (mmol/mol)} = 0.095T - 0.105$$

T: 水温

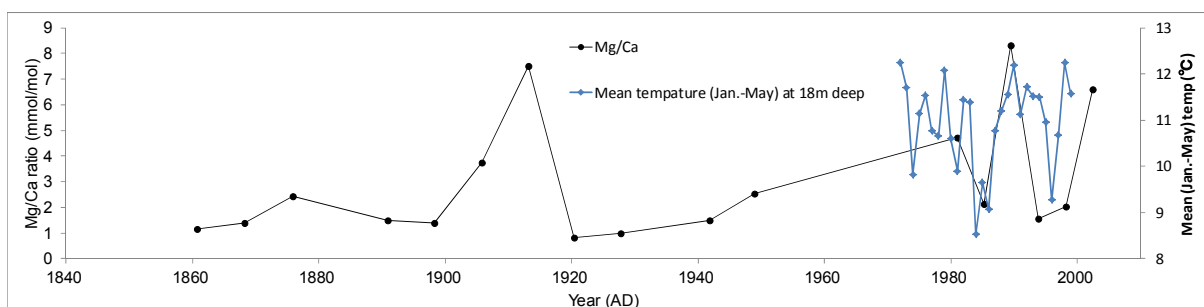


図2 底生有孔虫殻の Mg/Ca 比と大阪湾底層水温（水深 18m、1-5 月平均）

これらの式に基づくと、水温は Mg/Ca 比の指数関数あるいは一次関数で表される。1972 年以降では、柱状試料が得られた地点に近い St. 15 の底層水温（水深 18m）には、Mg/Ca 比と類似した十年スケール変動が認められる。Mg/Ca 比の時間解像度が粗いことや堆積速度を一定と仮定した年代モデルに基づくため、観測水温と Mg/Ca 比とではややズレが生じているが、Mg/Ca 比の変動は観測水温の数十年スケールの大まかな変動パターンを捉えていると考えられる。しかし、Mg/Ca 比から上述の式により水温を求めると現実の底層水温（有孔虫殻の成長する 1-5 月平均、図 2）よりもかなり高い値を取ることとなった。その原因については今後詳しく調査する予定であるが、（1）実験に用いられた海水の Mg/Ca 比と大阪湾底層の Mg/Ca 比が異なり大阪湾の方が高い値を取る、あるいは（2）用いられた殻のサイズが異なる（培養実験は >300um、本研究では 180-300um）ことで、Mg/Ca の較正式が培養実験のものとは異なることが考えられる。今後較正式を求めることが課題であるが、本報告では図 2 の観測水温と Mg/Ca 比との関係から得られる線形回帰式を用いることで Mg/Ca 比から水温を推定することが可能である（図 3）。



図3 海底堆積物から復元された大阪湾の底層水温

得られた水温の変動幅は、約 3.2°C であり、過去 140 年間の時系列の回帰式から、水温上昇率は約 0.8°C/100 年が求められた。

## 考察

今回得られた水温記録は十年スケールの変動は認められるものの、過去 140 年間での上昇率は 0.8°C/100 年であると推定された。St. 15 の底層水温（水深 18m）では、1972 年以降十年規模の変動が大きく、顕著な水温の上昇トレンドは認めら

れなかったが、より長期の水温変動記録から見れば、十年スケール変動に上昇トレンドが加わって緩やかな温度上昇があることがうかがえる。同様の方法により求められた豊後水道の冬季～春季の底層水温（水深 50m）にも同じオーダーの水温上昇率（ $1.5^{\circ}\text{C}/100$  年）が確認されており(Kuwae et al., 2009)、冬季～春季の水温上昇トレンドは、瀬戸内海の広い範囲で起こっている可能性が考えられる。気象庁の観測によると、四国周辺海域の表層海水温には、冬（1-3 月）は  $1.50\pm 0.30^{\circ}\text{C}$ 、春（4-6 月）は  $0.92\pm 0.30$  の上昇トレンドが認められており、やはり大阪湾や豊後水道の上昇率と同じ規模の水温上昇であることがわかる。

大阪湾の 1972 年以降の水温上昇トレンドについては、海面熱フラックスや外洋水の水温変動が関わっていることが指摘されており(高橋 and 清水, 2004)、夏の大阪湾底層水温の数十年スケール変動については、黒潮流軸変動に伴う外洋水侵入に起因することが指摘されている(Sugimatsu and Isobe, 2010)。大阪湾の水温変動は、大気からの熱フラックスや外洋環境の変化に影響を受けていると考えられ、今回見られた冬季～春の水温の上昇トレンドや数十年スケール変動もまた、両者が決定していることが予想される。IPCC 第 5 次報告書に基づけば、気温上昇トレンドは、温室効果ガス濃度の増加に起因し、海洋の温暖化は海面熱フラックスの増加に起因すると考えられる。今後、大阪湾の水温は黒潮流軸変動に伴う数十年スケールの水温変動が予想されるとともに、二酸化炭素濃度増加に伴う  $0.8^{\circ}\text{C}/100$  年の上昇率で温度の増加が数十年スケール変動に上乗せした温度になると予想される。

## 引用文献

- Kuwae, M., Hayami, Y., Oda, H., Yamashita, A., Amano, A., Kaneda, A., Ikehara, M., Inouchi, Y., Omori, K., Takeoka, H., Kawahata, H., 2009. Using foraminiferal Mg/Ca ratios to detect an ocean-warming trend in the twentieth century from coastal shelf sediments in the Bungo Channel, southwest Japan. *The Holocene* 19, 285-294.
- Sugimatsu, K., Isobe, A., 2010. Intrusion of Kuroshio-Derived bottom cold water into Osaka Bay and its possible cause. *Journal of Oceanography* 66, 191-199.
- Toyofuku, T., Suzuki, M., Suga, H., Sakai, S., Suzuki, A., Ishikawa, T., de Nooijer, L.J., Schiebel, R., Kawahata, H., Kitazato, H., 2011. Mg/Ca and  $\delta^{18}\text{O}$  in the brackish shallow-water benthic foraminifer *Ammonia* 'beccarii'. *Mar Micropal* 78, 113-120.
- Tsujimoto, A., Yasuhara, M., Nomura, R., Yamazaki, H., Sampei, Y., Hirose, K., Yoshikawa, S., 2008. Development of modern benthic ecosystems in eutrophic coastal oceans: The foraminiferal record over the last 200 years, Osaka Bay, Japan. *Mar Micropal* 69, 225-239.
- Yasuhara, M., Yamazaki, H., Tsujimoto, A., Hirose, K., 2007. The effect of long-term spatiotemporal variations in urbanization-induced eutrophication on a benthic ecosystem. *Limnol Oceanogr* 52, 1633-1644.
- 高橋, 暁., 清水, 祥., 2004. 瀬戸内海の長期水温変動. *海と空* 80, 11-16.