

II. 気候変動による沿岸域の環境と生態系への影響

II-2. 海洋酸性化の環境・資源への影響

原田尚美

1. はじめに

海洋酸性化は、温室効果ガスの二酸化炭素 (CO_2) が引き起こすもう1つの問題として、近年、温暖化に加えて深刻な全球規模の環境ストレスとされ、その進行の把握や海洋生物並びに海洋生態系への影響把握が喫緊の課題となっている。海洋表層に CO_2 が溶け込むと水 (H_2O) と反応し、炭酸水素イオン (HCO_3^-) を形成する。その際、水素イオン (H^+) が放出されるために海水の水素イオン濃度が増加し、その結果、水素イオン濃度を表す水素イオン濃度指数 (pH: potential hydrogen) が低下する。全海洋表層水pHの平均値は約8.1とアルカリ性であるが、徐々に酸性方向にpH値が変化していくさまを海洋酸性化と称する。2012年に開催された国連の持続可能な開発会議 (リオ+20) の合意文書「The Future We Want」に於いて、各国が取り組まねばならない世界共通の課題として特に海洋酸性化がクローズアップされ、現在では2015年9月国連サミットで採択された「持続可能な開発のための国際目標 (SDGs)」No.14の海洋生物多様性やバイオマスの維持への影響を明らかにするために、引き続き海洋酸性化への取り組み強化が喫緊の課題とされている。ここでは海洋研究開発機構での海洋酸性化の取り組みについて紹介する。

2. 二酸化炭素の吸収域としての海

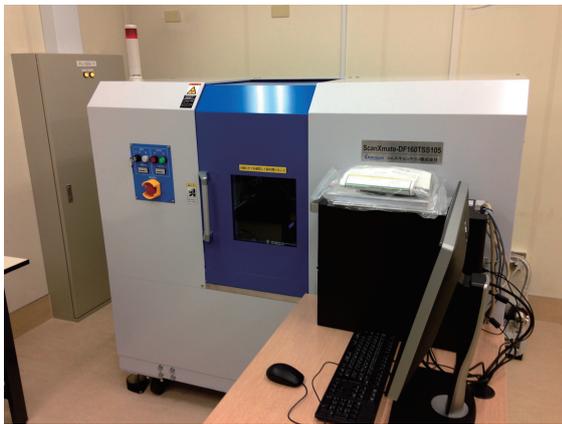
IPCC第5次評価報告書によると、現在、大気中に毎年6.4ギガトンの炭素が放出され、その内、海洋には2.4ギガトン吸収されていると見積もられており海洋は地球上で最大の炭素の貯蔵庫となっている。では一体、海洋のどこで吸収されているのだろうか？海洋表面での大気-海洋間の二酸化炭素収支の現場観測や逆解法モデルを駆使して地域別の温室効果ガスの収支を見積もった結果、全海洋の中でも北太平洋、南太平洋、南インド洋で主に吸収されていることがわかった (Patra *et al.*, 2014)。このように日本の前浜である北太平洋における温室効果ガス吸収は、海洋酸性化の深刻な進行を懸念させる。外洋域の酸性化に関して、太平洋、大西洋、インド洋など熱帯から亜寒帯域までの全海域にて継続実施されている世界の9つの時系列観測点における海洋表層の長期にわたるpHの観測結果が2014年に報告された (Green-

house Gas Bulletin 2014 世界気象機関発行)。それによると、全球海洋における酸性化はpH値で年間0.0011~0.0024の低下として進行しており、わが国の近傍である北西部北太平洋St. KNOT/K2 (北緯47度, 東経160度) で観測された年平均のpH低下速度0.0024 (Wakita *et al.*, 2013) は9つの観測点の中でも大きな数値であり、酸性化の進行が深刻であることがデータからも示された。

3. 海洋生物への影響

現在、地球を脅かす10大ストレスが提唱されている (Steffen *et al.*, 2015)。海洋酸性化についてはまだ安全レベルの範囲内とされているが、生物については種や機能の多様性がすでに危機的領域にあるとされており、酸性化の進行がわずかであっても昇温など他の要素と複合的に飛躍的に影響を及ぼす可能性がある。生物への影響を考える上で重要な指標が炭酸塩飽和度 (Ω) である。1以上が過飽和, 1未満が未飽和の状態であることを示す。 Ω が未飽和になると貝やサンゴなど炭酸カルシウムの骨格を持つ生物が骨格を作りにくくなる上、溶解の恐れがある。では、具体的にはどのような反応が起きているのだろうか？先にも述べたように海洋に CO_2 が溶解すると、 HCO_3^- と、 H^+ に変化し、 H^+ 濃度が増加していく。海洋には変化するとその変化を元に戻そうとする緩衝作用があり、 H^+ 濃度が増えると減らそうと、海洋中の CO_3^{2-} と結びつく反応が進み、 HCO_3^- を作り出す。次に量が減った CO_3^{2-} 濃度を増やす反応が起きる。それが炭酸カルシウムの溶解で、海洋中に生息する生物の炭酸カルシウム殻の溶解や、海底に化石となって堆積した炭酸カルシウムが溶解するなど、 H^+ 濃度を減らす緩衝作用が起きる。以上が、酸性化によって殻が溶解するという一連の反応になる。真っ先に影響を被るとされる生物は微小炭酸塩有殻プランクトン、ホタテ、カキ等の貝類、エビやカニなどの甲殻類などである。微小サイズの炭酸塩有殻プランクトンは、全海洋の80%もの炭酸塩沈降量を占める世界最大の炭酸塩生産生物である。にもかかわらず、海洋酸性化に対する応答を定量的に評価する世界標準的な手法がないため、海洋酸性化に対する影響評価が全く行われてきていない。そこで海洋研究開発機構では東北大学と共同で、炭酸塩有殻プランクトンの海洋酸性化に対する応答を定量的に評価するためにマイクロX線コンピュータトモグラフィーによる炭酸塩殻の骨格密度を計測する手法 (MXCT) を新たに開発してきた (第1図)。この手法は、対象とする生物にX線を照射し、2次元で骨格の空隙率 (CT

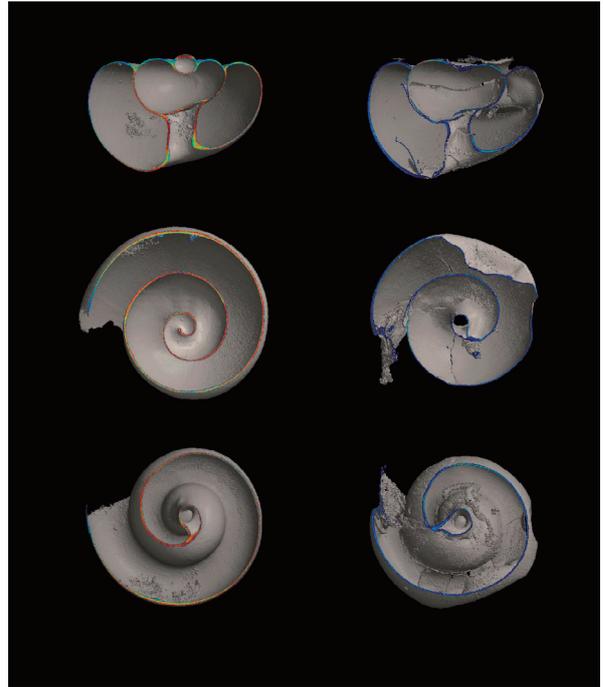
値)を測定し、最終的に1個体全ての2次元データを3次元データにコンパイルして容積を求める。1個体の炭酸カルシウムの含有量をICP質量分析計で求め、CT値と標準物質とから求められた経験式を用いて骨格密度を計算する。この手法により求められたプランクトン生物の炭酸塩骨格密度が現場のpHや炭酸塩飽和度と相関関係があり(木元私信)、海洋酸性化による生物の応答を定量的に評価する手法として確立しつつある(第2図)。我々が研究対象としているプランクトンサイズの炭酸塩生物は、高次の生物の餌となり、食物網を通じて生態系全体に酸性化の影響が及ぶ。水産資源となる魚類など高次生物への影響評価が重要になってくる。



第1図 マイクロX線コンピュータトモグラフィー(MXCT)装置(海洋研究開発機構 木元克典)。

4. 経済的インパクト

南北極や亜寒帯域など冷水塊海域では、海水に二酸化炭素が良く溶け込むことから海洋酸性化の進行が深刻で、2100年にはこの海域の海洋表層が炭酸カルシウム(アラゴナイト)の未飽和海域になると予測される。一方で、熱帯や亜熱帯域では未飽和にはならないまでも酸性化の進行は確実に生じ、その「変化」そのものが生息する生物にとって脅威となろう。世界各地で海洋酸性化のモニタリング観測が始まっており、どこの海域でどの程度酸性化が進行しているのか、その情報を共有し交換するための国際観測ネットワークが構築され(Global Ocean Acidification Observing Network, <http://goa-on.org/>), 4年に一度、国際ワークショップが開催されている。この国際ワークショップでも紹介された海洋酸性化の経済的影響



第2図 西部北極海にて採取された翼足類の骨格の平面図(MXCTで測定)。色が赤いほど密度が高く、青いほど低い。左は健康な個体の骨格。右は溶解が進み、殻がスカスカの個体の骨格(海洋研究開発機構 木元克典)。

は甚大である。ユネスコ政府間海洋学委員会の試算によると、多様な水産資源に加えて観光産業を支えるサンゴ礁海域は3~37.5兆円、魚類は6.5兆円、甲殻類で3.7兆円、貝類では2.4兆円の経済価値を失うとされている。

一方、日本の国内漁業への影響評価はまだ行われていないものの、沿岸域では、海洋生物環境研究所、北海道大学、東京海洋大学、筑波大学、琉球大学、水産研究・教育機構、海洋研究開発機構などが忍路(北海道)、厚岸(北海道)、大間(青森)、宮古(岩手)、館山・御宿(千葉)、下田(静岡)、柏崎(新潟)、瀬底(沖縄)など全国で水中のCO₂分圧やpH値の定点観測を実施している。沿岸域の大きな特徴は、1日の間でpHやCO₂²⁻濃度が大きく変化することであり、pHの日周変動幅は場所や季節、大雨等の気象イベントや付近の富栄養化など様々な要因によって変わる。現時点で西日本には観測定点がないことから、各沿岸域における定点観測網の充実と、日周変動を含めたpH動態の把握が急務となっている。加えて、貝や魚類などの水産資源に海洋酸性化の影響が及ぶことも一般には知れ渡っていない。国内観測ネットワークの構築と生物への影響評価、養殖漁業を担

う漁業者などへの周知や、海洋酸性化の現状を知りたい人々が知りたいときに直ぐにアクセス可能な情報環境づくりが大切である。

引用文献

- Patra, P.K., Krol, M.C., Montzka, S.A., Arnold, T., Atlas, E.L., Lintner, B.R., Stephens, B.B., Xiang, B., Elkins, J.W., Fraser, P.J., Ghosh, A., Hints, E.J., Hurst, D.F., Ishijima, K., Krümmel, P.B., Miller, B.R., Miyazaki, K., Moore, F.L., Mühle, J., O’Doherty, S., Prinn, R.G., Steele, L.P., Takigawa, M., Wang, H.J., Weiss, R.F., Wofsy, S.C. and Young, D. (2014). Observational evidence for interhemispheric hydroxyl-radical parity. *Nature*, **513**, 219–223.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Rayner, B. and Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, **347**, 1259855.
- Wakita, M., Watanabe, S., Honda, M., Nagano, A., Kimoto, K., Matsumoto, K., Kitamura, M., Sasaki, K., Kawakami, H., Fujiki, T., Sasaoka, K., Nakano, Y. and Murata, A. (2013). Ocean acidification from 1997 to 2011 in the subarctic western North Pacific Ocean. *Biogeosciences*, **10**, 7817–7827.