

**地球表層システムにおける海洋酸性化と生物大量絶滅**  
Study on ocean acidification and mass extinction of  
biosphere in the earth surface' environmental system

川幡 穂高 (KAWAHATA HODAKA)

東京大学・大気海洋研究所・教授



研究の概要

大気中の二酸化炭素の増大は、海洋の pH を下げ、生物起源炭酸塩の生産を抑制し、炭酸塩の溶解を促進すると危惧されている。精密飼育実験の結果、高二酸化炭素濃度でも、溶存二酸化炭素を使用することにより逆に炭酸塩の生産が増大する種のあることがわかった。陸の水環境については、栄養塩が淡水の pH に影響が非常に大きいことがわかった。河川下流では、土壌起源の二酸化炭素により酸性化が顕著に進行していた。

研究分野：地質学・地球化学・物質循環学・環境学

科研費の分科・細目：数物系科学・地球惑星科学・地質学・環境地質

キーワード：環境変動、地球変動予測、海洋科学、地球化学、生物硬化作用

1. 研究開始当初の背景

<海洋酸性化問題：二酸化炭素に関連したもう一つの地球環境問題>

大気中の二酸化炭素濃度 (PCO<sub>2</sub>) は産業革命以前の 280ppm から 380ppm まで増加しており、地球温暖化問題に至るといふ道筋はプロセスが複雑なため議論が多い。人為起源の CO<sub>2</sub> の約 30% が海洋に吸収されている。CO<sub>2</sub> は酸性気体なので、海洋の表層水の平均 pH は産業革命以前の 8.17 から現在 8.06 と下がってきている。海洋酸性化問題は「海水 pH の減少」に起因し、着実に溶解反応は進行しているので、状況は将来確実に悪化すると予想され、「海洋酸性化」として、もう一つの地球環境問題として近年注目をあびている。

2. 研究の目的

この現象が将来も続くと、海洋でよくみられる炭酸塩殻をもつ生物群に損傷を与え、5500 万年前と同様、深海底での大量絶滅を引き起こすと危惧される。本研究では、①水環境の酸性化に伴う生物の応答を精密飼育実験で明らかにする。②酸性化の生物起源炭酸塩の微小領域への影響を解析する。③「大量絶滅海洋酸性化説」を検証する。④中和機能がある陸の風化過程を明らかにする。最終的に、地球表層（大気圏、水圏、生態圏、岩石圏）システム全体の中で、海洋酸性化の位置づけ、pH を支配する地球システムと将来の

生物圏への影響を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究の目的の遂行に際し 4 つの方面より研究を行う：①生物の海洋酸性化への応答を解析するため、環境をコントロールした精密飼育実験（サンゴ、有孔虫、翼足類）を行う。②長尺サンゴコアを用いた近過去の pH 変動復元と海洋酸性化が生物起源炭酸塩の微小領域にどのような影響を与えるのかを調べるため、ICP-MS レーザーアブレーションを用いて微小領域の化学分析を行う。③「大量絶滅海洋酸性化説」の検証のため白亜紀と P/E 境界での酸性化を復元する。④酸性化を抑制する陸の働きを明らかにするため、河川、地下水、湧水などを国内と世界の大河を対象に水質の観点より分析・解析する。

実験室での飼育実験、微小領域化学分析、現代の水質フィールド調査、過去の環境復元という 3 つを組み合わせる研究を行う。

4. これまでの成果

<精密飼育実験>結論：サンゴ礁に生息する底生有孔虫には海洋酸性化に全く逆に応答する種がいることが精密飼育実験からわかった、使用するイオン種が異なるためらしい。

海洋酸性化によって負の影響を受ける生物が圧倒的に多いと言われているが、円石藻などでは正の影響を受けるといった報告も

なされている。サンゴ礁を構成する重要な底生有孔虫（星砂を含む）は、高マグネシウム方解石という、炭酸塩の中でも最も pH に対して不安定な殻をもっているが、まだほとんど酸性化に関する報告例がなかった。

海水の pH が低下する海洋酸性化という現象がサンゴ礁棲大型有孔虫の石灰化に及ぼす影響を評価するために、精密に海水の二酸化炭素分圧 ( $p\text{CO}_2$ ) を制御した飼育実験による検証を行った。その結果、高  $p\text{CO}_2$  海水に対して石灰化量が減少する種 (*Amphisorus kudakajimensis*) と反対に増加する種 (*Calcarina gaudichaudii*) がいることが明らかになった。また、炭酸種組成を調整した海水において飼育実験をおこなったところ、石灰化に強く影響する炭酸種は種によって異なることが明らかになった。これらの種では共生藻の種類が異なっている。これらの結果より、今後は  $p\text{CO}_2$  増加における共生藻ごとの光合成活性度の違いについての議論が、海洋酸性化に対するサンゴ礁の生物応答研究において必要となることが示唆された。

<陸域水環境> 結論: 湖沼では  $\text{PCO}_2$  は栄養塩によって大きく影響を受けていることが明らかとなった。

湖沼には酸性とアルカリ性の二つのタイプがあり、その支配要因を解明すべく、猪苗代湖（酸性）、霞ヶ浦（アルカリ性）を調べた。

海水と違い、湖沼では栄養塩が  $\text{PCO}_2$  に大きく影響を与えることがわかった。この原因として、湖水は淡水なので、緩衝能力が低いいため、栄養塩は一次生産に影響を与え、それが pH を介して  $\text{PCO}_2$  を支配するためと考えられた。実際、富栄養湖では栄養塩によって光合成が駆動され、湖の  $\text{PCO}_2$  が低く保たれていました。酸栄養湖でも同様に、酸性だった湖がアルカリ性に向かうほどの pH 変化が起こり、 $\text{PCO}_2$  にも大きな影響を与えていた。このまま猪苗代湖にそそぐ長瀬川の流量減少が続くと今後ますます光合成の働きが強まり、pH 上昇、 $\text{PCO}_2$  に関してもより低くなっていくのではないかと考えられる。これらの湖沼では栄養塩が炭素循環を制御していた。

<中生代の高  $\text{PCO}_2$  での中和化> 結論: 白亜紀の  $\text{PCO}_2$  は 1,500ppm 程度で、3,000ppm を越すような高い値ではなかった。

地質学的にみて、高  $\text{PCO}_2$  の時代には、海洋は必ず酸性化していたのであろうか？この答えは「NO」である。1 億年前は炭酸塩が大量に堆積していた。まず、前提となる  $\text{PCO}_2$  に信頼できるデータがなかったため、中生代の未変質のアンモナイトを用いて、酸素同位体比で水温を、ホウ素同位体で pH をそして、アルカリ度を仮定して  $\text{PCO}_2$  (約 1,500ppm) を世界で最初に推定した。

現生・白亜紀 (70, 73, 75–80, 80, 86Ma)・ジュラ紀 (162Ma)・石炭紀 (307–312Ma) オウムガイ・アンモナイト殻の  $\delta^{11}\text{B}$  を測定し、海洋 pH・ $p\text{CO}_2$  の復元を試みた。殻の  $\delta^{11}\text{B}$  は、注目する時間スケールによって異なる解釈ができた。時間変動なし（同一時間面）の場合には、海洋表層の pH 鉛直勾配を反映していた。一方、時間変動ありの場合には、pH 変動よりも  $\delta^{11}\text{B}_{\text{sw}}$  変動を大きく反映していた。深度プロファイルを作成することで、長期間の  $\delta^{11}\text{B}_{\text{sw}}$  変動を推定することができた。80、86Ma では、 $p\text{CO}_2$  が最大でもそれぞれ 1750ppm、1540ppm と推定された。これは、Breecker *et al.* (2010) の主張とも整合的であった。本研究では、アンモナイト・オウムガイ殻の  $\delta^{11}\text{B}$  が pH に依存する可能性を定量的に示した。生息深度の異なる個体を用いることで、より厳密に pH・ $p\text{CO}_2$  を定めることができると考えられる。

## 5. 今後の計画

学術研究船「白鳳丸」を用いて、バングラデシュ、ミャンマーの沖で研究航海を行い、陸の水環境が海の沿岸環境に与える影響を評価する。また、陸域での水試料のサンプリング地点を、ミャンマーなどに拡大して、アジアモンスーンにより降水量が大きな地域での酸性化の実態を解析する。

本研究の仕上げとして、精密飼育実験、微小領域の解析、中生代との比較および陸域水環境の解析より地球表層システムのもつ緩衝作用についてモデルを提出する。

## 6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

Ushie, H., Kawahata, H., Suzuki, A., Murayama, S. and Inoue, M. (2010) Enhanced riverine carbon flux from carbonate catchment to the ocean. *Journal Geophysical Research*, 115, G02017.

Hikami, M., Fujita, K., Kuroyanagi, A., Irie, T., Ushie, H., Nojiri, Y., Suzuki, A., and Kawahata, H. (2011) Contrasting ocean acidification responses of calcification between two coral reef benthic foraminiferal species. *Geophysical Research Letters*, 38, Doi:10.1029/2011GL048501.

ホームページ等

<http://ofgs.ori.u-tokyo.ac.jp/~ofgs/member-j.html>

[http://www.k.u-tokyo.ac.jp/pros/person/hodaka\\_kawahata/hodaka\\_kawahata.htm](http://www.k.u-tokyo.ac.jp/pros/person/hodaka_kawahata/hodaka_kawahata.htm)  
[kawahata@aori.u-tokyo.ac.jp](mailto:kawahata@aori.u-tokyo.ac.jp)