

# Sick seas

## 病める海洋

Nature Vol.442(978-980)/31 August 2006

か弱い命：酸性化した海は、サンゴを溶かし、ウニの棘を鈍らせる恐れがある。

大気中の二酸化炭素濃度の上昇によって、世界中の海の酸性度が高まってきている。海洋の酸性化は、海洋生物に破壊的な影響をもたらすかもしれない。Jacqueline Ruttimann が報告する。

REINHARD DIRSCHERL / VISUAL&WRITTEN / NEWS.COM

1トンの水を想像するのは、それほどむずかしいわけではない。普通の浴槽で1週間に使われるくらいの量だ。10億トンの水となると、思い浮かべるのは少しいへんだ。世界中のすべての男性、女性、そして子どもが入浴に使用する水の総量がだいたい10億トンで、ナイル川を流れる1週間分の水量に匹敵する。では、さらに増えて、10億×10億(10<sup>18</sup>)トンの水はどうだろうか。この量は、人類全員が、それぞれ入浴時にナイル川を流れる1日分の水を使ったと考えた場合の総量だ。宇宙には、この水量より軽い矮星(わいせい) だってある。しかし、地球上の海水量はこれよりさらに多いのだ。

これほど大量の海水を想像するのがむずかしいとすれば、その変化を思い浮かべよ、といわれても戸惑うだけだ

う。しかし、人類は海洋を変えつつある。熱帯から北極まで、海洋には、人間活動によって排出された二酸化炭素が溶け込んでいる。それは、過去200年の間に化石燃料の燃焼、およびセメント工場から大気中に放出された二酸化炭素量の、およそ半分に相当する量だ<sup>1</sup>。二酸化炭素は水に溶けると炭酸となり、結果的に海洋の酸性度は高くなる。「これは化学の基本です」と、米国立大気研究センター(コロラド州ボルダー)の海洋生態学者 Joanie Kleypas はいう。「海洋の酸性度の上昇が進んでいることは、否定できない事実です」。

この数年間、研究者たちは、海の酸性度の上昇傾向によって、いかに数多くの生物の外殻が冒されつつあるかを報告してきた。例えば、ウニの棘の鋭

さが弱くなっていたり、サンゴの表面がもろくなってきたりしているという。人工的に酸性度を高めた水中では、イカなどの動物の泳ぎに異常が生じる。腐食性の水が、動物の呼吸速度を乱してしまうのだ。そのほかにも、特に、炭酸塩を主成分とする殻をもつ微小な生物が酸に冒され、保護性の外殻を失いつつある<sup>2</sup>。しかし、低pH海洋の研究はまだほとんど行われていないのが現状だ。「低pHが海の生物に及ぼす影響を調べる研究については、我々も取り組み始めたばかりです」と、カリフォルニア州モスランディングにあるモントレー湾水族館研究所(MBARI)の海洋生物学者 Jim Barry は話す。

海洋の酸性化は、同じく二酸化炭素に起因する大気温上昇とは異なり、か

なりの程度、予測がつく。将来の動向も、学校で学んだ化学の知識があれば十分にグラフ化できる。気温上昇の予測に精密なモデルを必要とするのは対照的だ。酸性化は、驚くほどの速さで進んでいる。産業革命以前は、大気中の二酸化炭素濃度の上昇は比較的緩やかだった。このため海洋には、酸性度の高くなった浅瀬の海水を取り込み、中和作用をもつ深海の炭酸塩堆積物と循環させるだけの時間的余裕があった。

しかし過去数十年の間に、二酸化炭素は非常に速いスピードで蓄積しつつあり、海洋の酸性化は、堆積物による中和作用の速度を上回る速さで進んできている。この間の変化のスピードは、過去数十万年の間に起きた変化の約100倍にも迫ることが、古代堆積物の同位体元素研究から示されている。今後100年も経てば、海洋生物は祖先が一度も経験したことのないような状況に置かれることになる。しかし、「海洋生物群はこれまで、低pHへの順応を迫られたことはありませんでした。海洋生物にとっては、進化の過程で一度も遭遇したことのない状況に直面することになります」と、ライブニッツ海洋科学研究所（ドイツ）の海洋生物地球化学者 Ulf Riebesell は話す。

### 酸の攻撃

酸性化した水は、多くの海洋生物を保護している炭酸塩を主成分とする骨格を冒す。石灰化の速度は、今世紀中に最大60%低下するだろうとの予想もある。そうなれば、海洋中の二酸化炭素は、生物圏に危機的に作用するかもしれない。大気中の二酸化炭素濃度上昇で危ぶまれているのと同様の話だ。

ロンドンの王立協会が2005年に作成した報告書では、危機的状況の数値化を進めるため、より多くの研究が行われるよう、よびかけられている。全米科学財団、米国海洋大気局、米国地質調査所の米国3機関が7月に発表した別の報告書では、海洋酸性化の問題

に取り組むための研究戦略が取り挙げられた。また、気候変動の影響の定量化に取り組む国際組織、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、2007年初めごろまでに発表を予定している次の報告書で初めて、海洋酸性化の問題を議題として提起する予定だ。

1800年、大気中の二酸化炭素濃度は280ppm、海洋のpHは平均8.16だった。それが現在では、大気中の二酸化炭素濃度は380ppm、海洋のpHは平均8.05だ。さらに推定では、今世紀の終わりまでにpHが7.9まで下がると予想されている。「8.16から7.9への低下は、それほど大きくないように思えるかもしれませんが、実際は大きな差だといえます」とKleypasは語る。pHの1の変化は、酸性度が10倍変化することを意味する。

陸上環境を対象に研究を行っている生態学者が、高濃度の二酸化炭素条件で植物を成長させる実験を行うのと同じように、海洋生物学者は、低アルカリ性の海洋中における生物活動の調査を始めている。

Riebesellはノルウェー南西部のフィヨルドで、棧橋に巨大な容器を取り付けた野外実験施設を設置した。カーボネート樹脂で覆われた「メソコスム」という50リットルの容器には、光合成プランクトン（植物プランクトン）である円石藻が充填されている。そして、この円石藻と海水を充填したタンク内に、50年後および100年後に推定されるレベルの二酸化炭素を送り込む。Riebesellはこの装置を、「未来の海」とよぶ。

「円石（コッコリス）」とよばれる円石藻の外被は、小さなホイールキャップのような形をしていて、炭酸塩鉱物の方解石を主成分とする。Riebesellは、現在の大気中濃度の3倍の二酸化炭素にさらされた場合、円石藻の保護層の約半分が崩壊することを明らかにした<sup>3</sup>。

このような変化は、海洋中に大量に含まれるこの種の植物プランクトンにとってよい前兆ではない。また、植物プランクトンにとっての災難は、プラ

ンクトンが支える食物網にも悪影響を及ぼす可能性がある。円石は、海洋上層に浮かぶ廃棄物（主に魚類の排泄物）の表面で凝集し、そうした廃棄物を海底堆積物へと沈める働きを担っている。こうして、栄養分は海洋中で再利用されているのだ。その円石の働きが弱まってしまうとなれば、海洋の栄養循環にドミノ効果を引き起こす恐れがある。

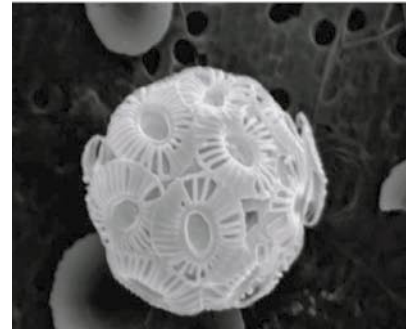
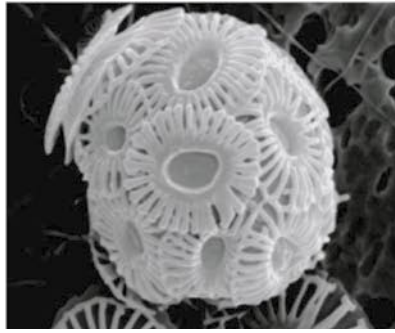
### 危険度上昇

Riebesellは現在、酸性度の上昇がプランクトンの卵と幼生に及ぼす影響を調べている。そのほかにも、ウニやマキガイなどの、より大きな動物が受ける影響を調べている研究者もいる。京都大学の海洋生物学者、白山義久の実験では、ウニとマキガイをそれぞれ、550ppmの濃度の二酸化炭素を含む水で満たした30リットルのタンク内に置いた。すると3か月後、ウニもマキガイも、重量が約8%減ったという。方解石を主成分とする棘は鈍くなり、取り扱い中に簡単にはがれ落ちるほどもろくなった、と白山は話す。

タンク内の二酸化炭素濃度を急激に下げたところ、対象生物は最終的に回復した。だが、高濃度条件を長期間（例えば1年間）維持したところ、大半の個体は死んでしまった<sup>4</sup>。「二酸化炭素濃度の大きな変化に動物が適応できないのは明らかです」と白山はいう。

MBARIの研究者で、研究用ツールとして二酸化炭素を長年使用してきたBarryが行った実験からも、不安な結果が得られている。Barryはかつて、潮間帯に消火器を噴射していた。海水中に二酸化炭素を送り込んで動物を眠らせれば、それらを簡単に捕まえることができたからだ。しかし今では、二酸化炭素は危険な気体だとBarryは考えている。

Barryは現在、ポストクのEric Paneとともに、高濃度の二酸化炭素環境における2種類のカニの反応を調査中だ。予備の実験で、浅瀬に生息するアメリカイチョウガニ（Cancer種）と、深海に生



保護層の崩壊：海水の酸性度が高まると（中央および右の写真）、食物網の基礎となる微小なプランクトン、円石藻の外殻が溶けてしまう。

息するズワイガニ（*Chionoecetes* 種）が高濃度の二酸化炭素環境から回復するのにどれだけの代謝作用を必要としたかを測定したところ、浅瀬のイチョウガニのほうが回復の早いことがわかった。この差には、酸性化が進む海に関する重要な事実が含まれている。「深海に生息する生物は、酸性度の変化に対する感受性が、浅瀬に生息する種に比べてかなり高いといえる」と Barry は語る。

Barry と Pace は、カニの研究で得られた結果を、7月に英国のサザンプトンで開催された深海生物シンポジウムで発表した。また、関連研究の中で Barry は、海底堆積物中に生息する微小動物は、pH がわずかに 0.1 低下した海水に1か月間さらされただけで、その個体数が減少してしまうらしいことをつかんだ。しかし奇妙なことに、1~2週間すると、微小動物の個体数は回復するようにみえる。この理由として Barry は、大型動物もまた死滅した可能性があり、それらに微小生物が捕食される機会が少なくなったこと、あるいは pH 変化によって死滅したほかの小型生物の死骸が海底へと沈んでくるのに伴い、微小生物の餌が増えたことを挙げる。

### 大量死の現場

深海では、非常にゆっくりと成長するサンゴなどの、冷水性サンゴも危機に瀕している。円石藻やウニの成分である方解石より溶解度の大きい炭酸塩、アラゴナイト（あられ石）を主成分とするサンゴは、酸性化に特に脆弱だ。「深

海のサンゴにはすぐに異常が現れる」と、フランスのジフ・シュール・イベットにある気候・環境科学研究所の海洋学者 James Orr はいう。今世紀の終わりごろには、水深の深い場所に生息するサンゴの3分の2が、アラゴナイトを冒しかねない海水にさらされる可能性がある（現在は、まだまったくといってよいほどそうした状況にはない）<sup>5</sup>。

炭酸塩は、高圧および低温で溶解度が高くなるので、酸性度上昇の影響は水深が深くなるにつれて大きくなる。しかし Orr の研究では、アラゴナイトは2100年までに、深海のみならず、南大洋全体のあらゆる水深で不安定になる可能性がある」と指摘する。サンゴが死滅してしまえば、サンゴ礁を安全なすみかとするほかの種にも影響が出てくるだろう。

こうした不吉なモデルが提案されているものの、海洋酸性化が大きな問題になるとすべての研究者が考えているわけではない。5月に発表された *Geophysical Research Letters* 誌の論文では、二酸化炭素濃度の上昇は海洋における生物学的影響にはほとんど関係しない可能性がある」とされた<sup>6</sup>。カリフォルニア大学サンタバーバラ校の水文学者 Hugo Loaiciga は論文中で、堆積物に含まれる炭酸塩は、進行が予想される酸性化に対して緩衝作用を果たすのではないかとしている。

しかし、多くの専門家はこの説に同意できないようだ。海洋酸性化の研究を主導する研究者25人が連名で投稿した反論コメントでは、Loaicigaの主張に対し、1つずつ反論が展開された。

専門家たちはまた、pHが0.2低下すると、多くの海洋生物がその影響を受ける可能性がある」と述べている。このpH変化は、Loaicigaの論文では本質的に重要でない」とされた変化である。

反論を取りまとめたワシントンカーネギー協会（カリフォルニア州スタンフォード）の地球システムモデル学者 Ken Caldeira は、海洋酸性化が問題であること、また、その規模がとてつもなく大きいことについて、一般の人々が知るべき時期に来ていると語る。Caldeira は、ローレンス・リバモア国立研究所（カリフォルニア州）の Michael Wickett と共同で提案したモデルを用いて、2100年ごろにピークを迎えるとされる、現在のところ無規制で行われている化石燃料の燃焼の影響について、シミュレーションを行っている。

大気中の二酸化炭素濃度は、燃焼の進行速度が最大となった少し後にピークを迎える。続いて大気中の二酸化炭素濃度は、炭素が海洋へ取り込まれるに伴って、緩やかに低下していく。そして海中では、水深が深くなるにつれて酸性度は緩やかに高くなる。海面付近では、pHの低下は2750年までに止まる可能性がある。しかし、水深1キロメートル付近では、次の千年紀の始まりごろにも、依然としてpHの低下が続いている可能性がある<sup>7</sup>。「今後10年間の人間行動の影響が数千年にわたって続く可能性があることは、広く一般の人々に知られるべきです」と Caldeira は語る。

その間にも研究者たちには、最初の数十年間の変化の影響を解明するため、取り組むべき課題が数多くある。「行われている研究の数は多くありません」と、カリフォルニア州立大学サンマルコス校の海洋学者 Victoria Fabry はいう。「研究者は、ようやく問題の端緒に触れたような状況です」。一例として Fabry は、石灰化作用をもつプランクトンを対象とした実験室研究は非常に少なく、研究されているのはすべての種のうちわずか 2% にすぎないことを指摘する。

米国の研究機関が 7 月に発表した報告書では、今後の研究の進むべき方向性が示された。提示された道筋には、研究室実験と野外実験の統合や、酸性化がサンゴやプランクトンなどのキーストーン種（要となる種）に及ぼす作用の見極め、さらには、これらの種における変化が生態系全体に及ぼす作用を突き止めることなどが含まれる。報告書はまた、問題をあらゆる空間スケールで検討する必要性

についても触れている。現時点では多くの研究が、大規模な生物地球化学レベルか、または特定の生物に対する影響のいずれかに焦点を当てており、生態系を対象とした研究は少ない。

### 地球全体の問題

こうした状況を正すため、一部の研究者は、森林で数年間にわたって実施される二酸化炭素濃度上昇を調べる実験の海洋版のような、大規模な実験を実施する必要性を訴えている。Barry と MBARI の共同研究者たちは、公海上でのこうした実験系の開発を試みている。実験は、含有二酸化炭素濃度の高いブルームが噴出している深海部に、ケージを設置して行うことになる予定だ。

研究領域の統合も進みつつある。海洋学者は化学者と共同で酸性化反応の定量を始めており、また、エンジニアと組んで、研究用の深海生物を採取するためのロボット潜水艇の開発にも着

手している。社会学者たちも参加を始めている。2007 年 6 月に沖縄で開催予定の次の太平洋学術会議では、自然科学者と社会学者が一堂に集い、沿岸地域の住民に対する対応について討議を行うことになりそうだ。

海洋酸性化の問題に注目が集まる一方で、新たな問題が浮上している。ある説によると、海洋の酸性化は、地球温暖化と平行して進むのではなく、温暖化を増幅する可能性があるというのだ。石灰質の円石藻類は、繁殖時に海面を光らせる。つまり、より多くの太陽光が宇宙空間へと反射される。このような生物の数が減ると、あるいはほかの植物プランクトンが取って代わってその場を占めれば、海面の明るさは弱くなってしまふ。

また、円石藻類は、海洋上の雲の発生過程にも関与している。円石藻類は、大量の硫化ジメチルを産生する。つまり、海洋上の大気中で、硫酸塩の多くがエアロゾル化するのだ。硫酸塩粒子は、雲粒が成長する際の「種」として作用する<sup>8</sup>。もし、硫酸塩粒子が減少するとなると、地球上のかなりの量の雲が取り除かれることになり、地球温暖化がさらに進むかもしれない<sup>9</sup>。

人間の想像力は、海の広さを、そして海中で起こる変化の複雑さを、簡単にはとらえきることができない。しかし、今後数百年の間に、もはや避けることのできない変化が必ず起きることを考えれば、人間社会はそのようない訳をしている場合ではない。 ■

Jacqueline Ruttimann はメリーランド州を拠点とするフリーランスライター。追加取材は Alexandra Witze。

1. Tedesco, T., Feely, R. A., Sabine, C. L. & Cosca, C. E.; available at [www.research.noaa.gov/spotlite/archive/spot\\_gcc.html](http://www.research.noaa.gov/spotlite/archive/spot_gcc.html) (2005).
2. Orr, J. C. et al. *Nature* **437**, 681-686 (2005).
3. Riebesell, U. et al. *Nature* **407**, 364-367 (2000).
4. Shirayama, Y. & Thornton, H. J. *Geophys. Res.* **110**, C09S08 (2005).
5. Guinotte, J. M. et al. *Front. Ecol. Environ.* **4**, 141-146 (2006).
6. Loaiciga, H. A. *Geophys. Res. Lett.* **33**, L10605 (2006).
7. Caldeira, K. & Wickett, M. E. *Nature* **425**, 365 (2003).
8. Charlson, R. J. et al. *Nature* **326**, 655-661 (1987).
9. Gunson, J. R. et al. *Geophys. Res. Lett.* doi:10.1029/2005GL024982 (2006).



ノルウェー南西部のフィヨルドで酸性度を高めた海水を詰めたタンクを使って、低 pH が海洋生物に及ぼす作用が研究されている。