

海のホメオスタシス

大河内直彦 おおこうち なおひこ
海洋研究開発機構

ホメオスタシス。辞書には次のように記されている。

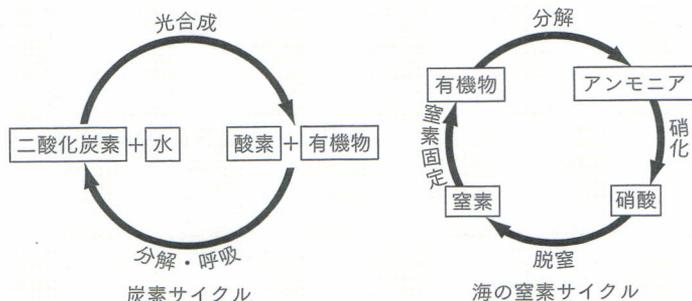
生物の生理系が正常な状態を維持する現象を意味する言葉で、〈等しい〉とか〈同一〉という意味の homeo と、〈平衡状態〉〈定常状態〉の意味の stasis を結びつけた造語。恒常性とも訳される¹。

要するに、生き物の生理現象に限った用語ということらしい。しかし地球科学者の私からすれば、この言葉は私たちが暮らすこの星の環境にもびったり当てはまる。かつて James Lovelock が「ガイア理論」という切り口で提唱したように²、ホメオスタシスは地球表層で起こるさまざまな現象の中に見ることができ、そしてそれがシステムをコントロールしているようにさえ映る。

身近な例で考えてみよう。私たちは、日々呼吸によって酸素を体内に取り込み、二酸化炭素を排出している。口から取り込んだ食物(有機物)を酸素で酸化して二酸化炭素に変え、その際に生まれるエネルギーを利用して、私たちの細胞はさまざまな活動を行っているのである。その一方で、植物は二酸化炭素を取り込んで酸素を排出している。こちらは炭素源として二酸化炭素を取り込んでいくわけだ。とにかく両者を合わせると、反応はくりりと一周してサイクルを形成する(図左)。反応

は一方向にのみ進むのではなく、逆向きの反応を伴っているわけだ。おかげで、特定の物質がどんどん蓄積していくということはない。このサイクルを駆動するのは、もちろん太陽エネルギーである。ホメオスタシスという視点で捉えた場合、このサイクルにフィードバック・メカニズムが備わっていて、システムの暴走に歯止めをかけられることが重要だ。つまり二酸化炭素が増加すればそれを減らすようなメカニズム、逆に酸素が増えたとそれを減らすメカニズムである。実際、環境中の二酸化炭素が増えれば、植物の光合成量が増加し、取り込む二酸化炭素が増えることは、あらゆる植物で実験的に証明されている³(ただし、炭素が一時的に有機物へプールされるだけなので、地球温暖化問題には本質的には効果がない)。また逆に酸素が増えれば、山火事が頻発して酸素が減るうえ⁴、そもそも酸素を生み出す植物のバイオマス自体も減少することになる。

海ではどうだろう。最近になって、海の窒素サイクル(図右)にもホメオスタシスが秘められていることが明らかになってきた。海洋における硝酸量は、海洋のバイオマスを決める重要な数字である。それが大小することによって、海の中で暮らす生き物の総量は変わる⁵。ところがその硝酸は、ある種の微生物によって窒素ガス(N_2)に変えられ、海洋から大気へと移行する。脱窒とよばれるプロセスである。その微生物からすると、この反応によるエネルギーの差分を生きるエネルギーとして無邪気に利用しているだけのことだ。しかし海に暮らす他の生物からすると、必須の栄養塩を海から奪い去り、不活性なガスに変えたうえ大気に捨ててしまう「けしからん」プロセスに他ならない。脱窒が起きた分だけ海から硝酸が失われ、生き物



図一地球表層における炭素循環(左)と海洋における窒素循環(右)
いずれもかなり単純化していることに注意。

はその糧を失ってしまうからだ。ただし脱窒を起こす微生物は、酸素のない還元的な環境でのみ生息可能なため、現代の海洋では一部の海域を除いてあまり重要なプロセスではない。

その一方で、海に窒素を補給するプロセスもある。窒素固定である。これは、窒素ガスの強固な三重結合を切断し、生き物にとって必須のアミノ酸を合成するプロセスである。シアノバクテリアや光合成細菌といった特定の原核生物だけがもつ代謝だ。ニトロゲナーゼと呼ばれる酵素が触媒するこの反応は、酸素のたっぷりある酸化的な環境中でも起きる。脱窒菌と窒素固定生物は別種の微生物というだけでなく、全く異なる場所に生息している。前者は嫌気環境に、そして後者は好気環境である。要するに、窒素固定と脱窒は全く何の関係もない現象なのである。

ところがおもしろいもので、両者はある種のメカニズムでつながっている。少なくとも、脱窒が進めば窒素固定も進むことが、ここ10年ほどの研究で確かな事実になってきた⁶。いったい、どのようにしてつながっているのだろうか？ 脱窒が進めば窒素が除去されるため、窒素不足により生息できなくなる生き物が続出する一方で、リンや鉄など他の栄養塩は相対的に余ることになる。そこへ硝酸を必要としない窒素固定を行うシアノバクテリアが、空いたニッチを埋めるように生息域を広げるのである。海は、窒素固定生物の独壇場となる。つまり、窒素を海洋から放出するプロセスと海洋中に取り込むプロセスとが、「風が吹けば桶屋が儲かる」式につながり、うまい具合にバ

ランスをとるのである。

最近になり、実例も見つかった。白亜紀に世界的に海洋大循環が何度も停止し、還元的な海洋が広がった「海洋無酸素事変」時のことである。数十万～100万年にわたって還元的な水塊が広く海洋深層を覆い、大量の有機物がヘドロとなって海底に降り積もった。当時のヘドロは黒色の頁岩として世界中に分布し、一部のものは熱変性して現代社会を支える石油となっている。海洋が還元的になった当時、脱窒菌の活動が活発になり、海洋から脱窒によって失われる窒素はかなり増えたと同時に、海洋表層では窒素固定を行うシアノバクテリアがニッチを大幅に広げ、窒素固定によって海洋に窒素を供給したのである⁷。

生き物が仲介する化学反応の研究は、この星の新たな一面を切り出し続けてきた。自然の美とは、何も風光明媚な景色や生き物が作り出す精巧な結晶などといった視覚に訴えるものだけではない。この星の環境が大きく逸脱しないように備わったからくりによって美しさを見出すことができる。そしてこういったからくりが四方八方に張り巡らされていることが、他の惑星にはみられない地球最大の特徴なのである。私たちが暮らす星は、単に岩石や化学物質からなるボール状の物体ではないのである。

文献

- 1—平凡社: 世界大百科事典, 第2版(1998)
- 2—J. Lovelock: Gaia: A New Look at Life on Earth (3rd ed.), Oxford University Press(2000)
- 3—G. D. Farquhar et al.: In Carbon Dioxide and Climate: Austra-

lian Research(G. I. Pearman, editor), Aust. Acad. Sci.(1980)pp. 105-110

4—R. A. Berner et al.: Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 31, 105 (2003)

5—大河内直彦: 科学, 83, 1324(2013)

6—C. Deutsch et al.: Nature, 445, 163(2007)

7—N. Ohkouchi et al.: Biogeosciences, 3, 467(2006)

コラム 地球の眼 No.23

マリノアン氷河時代終焉の全球的同時性

—オーストラリアの原生代後期氷河堆積物中のジルコンのU-Pb年代測定

東條文治*1 とうじょう ぶんじ

川上紳一*2 かわかみ しんいち

*1 名古屋芸術大学准教授

*2 岐阜大学教育学部教授

原生代後期に地球表面が全面的に凍結したという全球凍結仮説が発表されて以来、論争が続いている。この時代の氷河堆積物が世界的に同一時期に形成されたものかという、地層形成の同時性の問題は、この仮説をめぐる論争において重要な論点の一つであった。Calverら¹はオーストラリア、キングアイランドの原生代後期の氷河堆積物に含まれるジルコンの高精度U-Pb年代測定によって、この氷河堆積物の形成年代が、これまでにナミビアと中国で測定された氷河堆積物の年代値と一致するという注目すべき結果を発表した。

原生代後期の地層には、氷河作用によって作られた堆積物が汎世界的に分布しており、この時代は地球の歴史において最も寒冷な時代の一つと考えられている。この時代の氷河堆積物は当時低緯度に位置した大陸にも見られることなどから、地球が全球的に凍結したのではないかという全球凍結仮説が出された²。Hoffmanら²の仮説によると、地球が全球的に凍結すると火山ガスなどに含まれる二酸化炭素が海洋に溶け込めなくなり、数百万年にわたる大気への蓄積による温室効果が氷河時代を終わらせ、厳しい寒さの時代から急激に温暖な時代への移行を引き起こすと考えられている。



図1—クリオジェニア紀とエディアカラ紀の境界の模式地である南オーストラリアの地層

このことは、この時代の氷河堆積物の上を常に温暖な環境を示す炭酸塩岩が覆っていることもうまく説明する。その一方で、氷河時代から温暖な気候時代への遷移が世界的に同時でなければならない。

オーストラリア、タスマニアの北西100 kmに位置するキングアイランドの南東岸には、原生代後期の氷河堆積物が50~150 mの厚さで露出している。この地層は、層序や岩相などからフリンダース山地(南オーストラリア)のエラチナ層に対比されると考えられている。エラチナ層は、原生代後期のクリオジェニア紀とエディアカラ紀の境界の地層模式地(図1)³とされ世界的な対比が行われているが、その正確な堆積年代は不明であった。キングアイランドに露出する氷河堆積物を含む地層はコットンズ角礫岩と呼ばれ、下部はダイアミクタイト(分級していない堆積物で、氷河作用で運ばれた地層を指す用語)、中部は凝灰質砂岩(火山性の物質を多く含む砂岩)、上部は砂質のダイアミクタイトからできている。氷河堆積物中に凝灰質砂岩が含まれていることは、氷河時代に大規模な爆発的火山噴火があったことを示唆している。

Calverら¹は、氷河時代の終焉の年代を得るため、キングアイランドに露出する氷河堆積物の最上部付近4カ所から岩石試料を採取し、含まれていたジルコン粒子のU-Pb年代を二次イオン質量分析計SHRIMPで測定した。その結果、それぞれの岩石試料で得られた年代値は、いずれも6億6000万年と6億3500万年という、おおむね