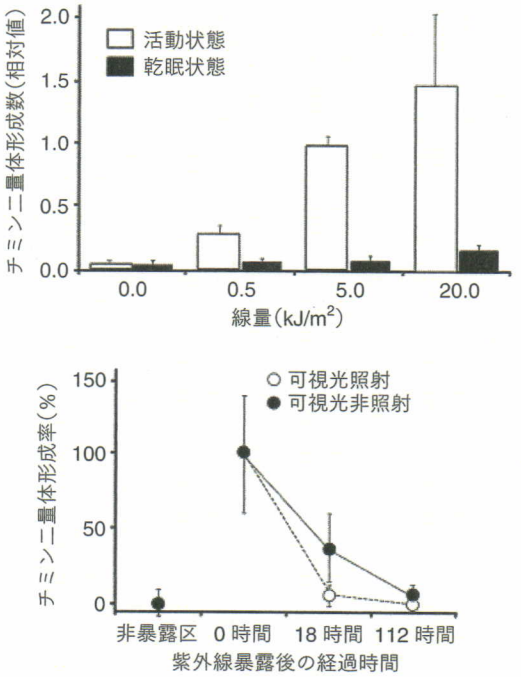


図 2—(上)活動状態および乾眠状態のヨコヅナクマムシ DNA における紫外線照射後のチミン二量体の形成頻度
チミン二量体形成数は，20 kJ/m² の紫外線照射後における大腸菌 DNA のチミン二量体数を 1 とした場合の相対値。
(下)活動状態のヨコヅナクマムシに 2.5 kJ/m² の紫外線を照射後，可視光を照射した場合と照射しなかった場合による DNA のチミン二量体の除去効率の違い

これらの研究から，ヨコヅナクマムシの紫外線耐性は，乾眠状態における DNA の防護能力と，活動状態時での修復能力により支えられているものと考えられる。

そして，多量の紫外線が降り注ぐような環境をもつ他惑星でも，バクテリアのような単細胞生物だけではなく，多細胞生物のようなより複雑な生命体が，クマムシと似たような生存戦略機構をもち，繁栄しているかもしれないのだ。火星の地表やそれに近い環境から，クマムシ型生命体が発見される日も近いかもしれない。

文献
1—K. I. Jönsson et al.: Curr. Biol., **18**, R729(2008)
2—D. D. Horikawa et al.: Astrobiology, **8**, 549(2008)
3—D. D. Horikawa et al.: Int. J. Rad. Biol., **82**, 843(2006)
4—ヨコヅナクマムシゲノムデータベース "Kumamushi Genome Project" http://kumamushi.org/

コラム　分子で地球を読む　**No.6**

分子の年齢が浮き彫りにした研究の「落とし穴」

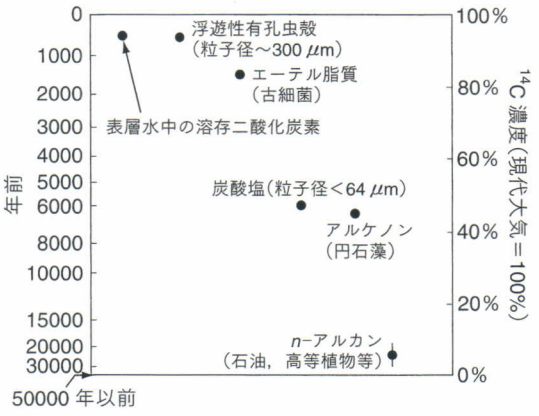
大河内直彦 おおこうち なおひこ
独立行政法人海洋研究開発機構

海辺で両手にすくった海水の中には，数千万もの極微小な生き物が暮らしている。そんな生き物はといえば，さらに小さなタンパク質や脂質，糖，核酸といった有機分子から成り立っている。地球上で生き物が栄えたおかげで，世の中は有機物だらけだ。そしてそれらの命が絶えた後には，有機分子だけが残される。その一部は変質された形で海の中に当分の間留まり，そしてそのほんのごく一部は海底に落下して泥の中に埋もれ，はるか後の世にまで残される。

深海底の泥に含まれるのは，なにも海で暮らす生き物が作った有機物や殻だけではない。陸上で動植物が作った有機物や土壌粒子も，河川や大気を経由して深い海にまでやってくる。なにせ深海底は地球上で最も低い場所だ。重力の作用から逃れられないこの世におけるあらゆる物質は，深海底を目指して移動し続けるのである。

このような物質が集まってできる深海底の堆積物は，さしずめ地球のゴミ箱である。海底堆積物に刻まれるあらゆる記録を読み解けば，海の中で起きていることを知ることができる。喩えは悪いが，ゴミ箱をあさって人の暮らしを類推するのと似ていなくもない。ゴミ箱の中身から，その人がどんな職業か，何を好んで食べているのか，はたまたどんな政治的な志向を持っているかまでわかるかもしれない。

近年の分析技術の発展は，こういった研究を大きく後押ししてきた。有機分子によっては，pg (10^{-12} g)オーダーという極微量であっても，その濃度を正確に知ることができるものもある。深海底堆積物中で測定レベルに引っかかる有機化合物は，ふつう 1000 種類をゆうに越える。つまり海の中で起きている現象を，堆積物という記録媒体



図―北大西洋バミューダ海台の海底に分布する炭素物質，およびこの海域の表層水中の溶存二酸化炭素の放射性炭素年代の分布

右側の軸は，現代大気を100%とした放射性炭素の濃度を表している。なお，横軸にはとくに意味はない。

に記録される有機分子を通して窺い知ることができる。地質時代の地球環境を復元する研究分野は，このようなツールとともに発展してきた。しかし最近になって，個々の有機分子に含まれている放射性炭素年代が測れるようになると，研究に潜む落とし穴が，思わぬ形で顕在化することになってしまった。

北大西洋にぽつんと浮かぶバミューダ島の東北東600 km付近には，バミューダ海台と呼ばれる高さ1 kmあまりの海底山地がある。ここは堆積スピードの大きな堆積物，つまり時間解像度の高い記録媒体が採れる場所として長らく研究者に知られ，重宝されてきた[1,2]。図に示したのは，この海台の海底面に分布する有機物を含むいくつかの炭素物質を年代測定した結果である[3]。

まず，差し渡し数百μmの比較的大きな粒子である浮遊性有孔虫が作り出す炭酸カルシウム殻は，予想どおり現在の表層海水中に溶けている二酸化炭素とほぼ同じ年代を示した[4]。これだけの大きなサイズの粒子になると，海の中をほぼまっすぐ重力落下してくるのであろう。

最大の驚きは，海洋表層を浮遊する植物プランクトンの一種である円石藻が作り出す「アルケノン」と呼ばれる化合物が，6000年以上の古い年代をもっていることだった。これには，どうやら深海で起きる不思議な現象が深く関わっているらしい。ドリフトと呼ばれる，堆積物に含まれる細かい粒子が大量に巻き上がって海の中を長距離運ばれる現象である。カナダ東海岸ノバスコシア沖に広がる巨大なローレンシア海底扇状地付近では，斜面崩壊や「海底嵐」と呼ばれる海底付近の流れの擾乱が大量の細かい粒子を深層水中に巻き上げることがある[5]。その粒子は，霧状になって深層水の流れに乗ってゆっくりと移動し[6]，バミューダ海台付近を通過するときに霧が晴れるように海底へ落下する。深海底に物質が運ばれるやり方にもいろいろあるのだ。

同じ堆積物に含まれる直径64 μm以下の小さなサイズの炭酸塩粒子がアルケノンとほぼ同じ年代をもっている(図)ことは，アルケノンのような有機分子が，主に細かい粒子の表面に吸着してドリフトとともに移動していることを支持している。ノバスコシア沖の海面近くで生まれた有機分子は，いったん海底に落下し，それが再び眠りから覚めるのに平均6000年以上かかったことになる。こういった深海における物質輸送は，一昔前の海洋学で随分研究されたテーマだった[7]。しかし，それによって生じる地質記録の時間的・空間的な歪みが，海洋環境を復元する際に隠れた問題になっていることはあまり認識されることはなかった。つい最近まで，こういった微量成分の年代測定ができなかったからである。最新の分析技術の革新は，記録媒体としての堆積物が時として致命的な欠陥をもつことを浮き彫りにしたのである。

さて，再び図に戻ろう。アルケノンよりもさらに古い年代をもつのが炭化水素(n-アルカン)である[8]。炭化水素は，人類活動によって(多くは陸上で)掘り出されている石油の中に大量に含まれている。放射性炭素をほとんど含まない化石燃料起源の炭化水素が，深海底にまで運ばれている証拠である。放射性炭素濃度がまったくゼロではないのは，陸上の高等植物や土壌に棲息する菌類がワックスとして大量に合成する炭化水素が，ほんのわずかだけ混じっている(ほんのわずかしか混じっていない)ことを示唆している。こういった有機分子の年代測定

の結果はいずれも，研究者の間で共有されてきた従来の常識が，現実の海洋では必ずしも当てはまるわけではないことを示している。

深海底に散らばる有機分子の年代測定は，深海で起きている現象だけでなく研究上の前提についても重い啓示を与えてくれた。分析技術の進歩は，科学の歩みを陰で支えている。しかし時として，研究の中に潜む落とし穴を遠慮もなく暴いて，手痛い罰を与えることもあるのだ。

文献

1—L. D. Keigwin: Science, **274**, 1504(1996)
2—J. P. Sachs & S. J. Lehman: Science, **286**, 756(1999)
3—N. Ohkouchi et al.: Science, **298**, 1224(2002)
4—W. S. Broecker et al.: J. Geophys. Res., **65**, 2903(1960)
5—W. D. Gardner & L. G. Sullivan: Science, **213**, 329(1981)
6—P. E. Biscaye & S. L. Eittreim: Mar. Geol., **23**, 155(1977)
7—B. C. Heezen & C. D. Hollister: Mar. Geol., **1**, 141(1964)
8—N. Ohkouchi & T. I. Eglinton, unpub. result.

コラム　放射線測定の現場から　**No.10**

放射性ストロンチウムの測定法

小豆川勝見[*1] しょうずがわ　かつみ
小森昌史[*2] こもり　まさし
[*1] 東京大学大学院総合文化研究科(環境分析化学)
[*2] 東京大学大学院総合文化研究科修士課程(環境分析化学)

以前このコラムでも簡単に述べたことがあるが，放射性ストロンチウムについて改めてお知らせしたい。福島第一原子力発電所の事故によって放出された放射性物質の測定では，必ずといってよいほど「放射性ストロンチウム」が話題になる。放射性ヨウ素(^{131}I)や放射性セシウム(主に^{134}Cs, ^{137}Cs)*1は報告があるのに，どうして放射性ストロンチウム(^{89}Sr, ^{90}Sr)*2はその数字が示されないのか，何かの陰謀ではないのか，といった声がしばしば測定の現場に寄せられる。なぜ^{89}Sr, ^{90}Srはその分析値が十分に示されないのか，今回のコラムではこれまでに示された値を踏まえて具体的な分析の手法について報告する。

放射性ストロンチウムはどこでできる？

放射性ストロンチウムを理解するためには，この核種には厄介な特性があることを説明しなければならない。その前に，まず^{89}Sr, ^{90}Srがどのように生成されるのかを理解しておきたい。^{89}Sr, ^{90}Srはともに「核分裂生成物」である。核分裂生成物とは^{235}Uを燃料とする原子炉で核分裂反応が起きたときに発生するもので，^{235}Uが1つ核分裂すると2つの核分裂生成物が発生する。このときウランがちょうど半分に割れることはなく，大きい原子と小さい原子に分かれる特徴がある。このとき大きい質量をもった核分裂生成物がおおよそ120から140くらいの質量数を持っており，その代表として^{131}Iや^{137}Csが挙げられる。もうひとつ，小さいほうの核分裂生成物は質量数が80から100くらいであり，これらの代表として^{90}Srや^{85}Krが挙げられる*3。$^{235}UO_2$(二酸化ウラン)を燃料に用いた場合，一般的には^{90}Srの収量は約5%程度である。核分裂生成物の種類や生成量は原子炉を運転する上で非常に重要な情報である。燃料を原子炉に入れる前に，燃料の使用予定年数と核分裂生成物の収量，その崩壊熱は予め入念に計算されている。今回の事故によって拡散した核分裂生成物の飛散量の推定にはこのような計算結果にもとづいていることも付け加えておく。

ガンマ線を出さない放射性ストロンチウム

さて，^{89}Sr, ^{90}Srは核分裂生成物の中でも少し特殊な性質がある。核分裂生成物は多くの場合，

*1—事故当初は原発周辺で^{136}Csも検出されていたが，半減期が約13日である短半減期核種なので現在では検出されることはない。

*2—この他に^{91}Srも放出されていたがこの核種の半減期は6時間であり，実際は娘核種である^{91}Yが検出される。ただ^{91}Yも約58日の半減期なので現在ではほとんど検出されない。

*3—元素記号の左肩にある数字が質量数である。2つの核分裂生成物の質量を足し合わせるとウラン燃料の質量数である235に近づくことがわかる。