

のための地球の維持という観点からは、議論の余地がないように思える。ただ、人間という極度にわがままで近視眼的な動物がこれを本気で実行するかというと、疑問をもたざるを得ない。これは自分のことを考えただけでも、すでに明瞭だ。ポスト成長エコノミーを実現するには、個人のモラルに頼るだけでは足りず、社会のシステム、世界全体のシステムが大転換をしなければならないだろう。

それでも、これまでにドイツで実現した環境政策、いまや世界の各所でみられる政策の多くも最初は個人や市民グループの草の根運動から始まったことを考えれば、たとえリバウンド効果は伴うにせよ、そしてたとえ個人の行動がいくつもの矛盾を抱えているとしても、じわじわと実行していくことが、いつしか大きな転換につながるのかもしれないとも思える。ポスト成長エコノミーとか消費からの転向といった言葉が浮上し、広がってきたことだけでも、大きな進歩だとみなすこともできるだろう。

文献

- 1—たとえば“Wirtschaft ohne Wachstum” Institut für Forstökonomie Universität Freiburg, 2012 <http://www.ife.uni-freiburg.de/wachstumswende/woynowski-boris-et-al.-2012-wirtschaft-ohne-wachstum-notwendigkeit-und-ansatze-einer-wachstumswende.pdf>
- 2—“Grundzüge einer Postwachstumsökonomie”, Niko Paech http://postwachstumsoekonomie.org/html/paech_grundzuge_einer_postwach.html
- 3—“Befreiung vom Überfluss”, Niko Paech, oekom Verlag München 2012
- 4—“Spiegel” Nr. 14, 2014
- 5—<http://www.zeit-statt-zeug.de/#project>
- 6—“Absolventenstudie 2012–2013” Ernest & Young, [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-Absolventenbefragung_2013/\\$FILE/EY-Absolventenbefragung-2013-Studie.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-Absolventenbefragung_2013/$FILE/EY-Absolventenbefragung-2013-Studie.pdf)
- 7—“Grünes Wachstum” gibt es nicht. Süddeutsche Zeitung 電子版, 2014年10月17日 <http://www.sueddeutsche.de/wissen/oekonomie-und-oekologie-gruenes-wachstum-gibt-es-nicht-1.1865075>
- 8—この調査についての解説 [Sharing economy — “Deutschland teilt” <http://www.leuphana.de/news/publikationen/leuphana-magazin/titelstories/2013/sharing-economy.html>](http://www.leuphana.de/news/publikationen/leuphana-magazin/titelstories/2013/sharing-economy.html)
- 9—www.kleiderkreisel.de

- 10—www.dietauschboerse.de
- 11—www.foodsharing.de
- 12—www.airbnb.de
- 13—<http://stadtaecker.net/SitePages/Homepage.aspx>
- 14—<http://mundraub.org/>
- 15—<http://www.containern.de/content/>
- 16—“Spiegel” Nr. 1, 2014

コラム 分子で地球を読む No.13

デルタ(δ)の話

大河内直彦 おおこうち なおひこ
海洋研究開発機構

物質がもつ天然レベルの安定同位体の組成比を知るという方法論は、過去半世紀以上にわたって地球科学の分野で大きく花開いた¹。そのきっかけとして忘れてはならないのが、海の中でつくられる炭酸カルシウムの酸素同位体比が古水温計になることの強烈なインパクトである²。この星に生命が生まれて以降、いつの時代においても海底に大量に沈殿してきたこのベージュ色の鉱物の酸素同位体比は、地球史の謎を紐解くのに大きく貢献するだけでなく、多くの地球科学者を安定同位体の世界へいざなう呼び水となってきた。

同位体の組成比を用いる方法論が地球科学で発展した理由は、もう1つある。断片的な観測結果から全体像を理解することができるというこの方法論の長所が、複雑な地球を理解するのに大いに役立つからである。

地球を巡る炭素サイクルの一面を例にとりて考えてみよう。火山から噴き出す二酸化炭素は、かつてプレートとともに地球内部へと沈み込んだ海底堆積物が、地下深部で熱せられて二酸化炭素に化学変化したものである。海底にたまっている炭酸カルシウムの炭素同位体比は約0パーミルで有機物は約-25パーミルだから、平均すると-8パーミルの火山ガスとは両者がおよそ3:1の割合で混合したものであることが、ざっと推定できる。同位体組成から得られたこういった情報は、炭素循環の描像をあぶり出してきたのである。

水素、炭素、窒素、酸素、硫黄など多くの元素の同位体組成は、以下の示すデルタ(δ)値で表示される慣習となっており、IAEAによっても推奨されている³。

$$\delta = R_{\text{試料}}/R_{\text{標準物質}} - 1$$

この式でRとは、($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)や($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)などといった2種の同位体の存在比のことである。ふつう分数の分母には主要な同位体種を、分子には希少な同位体種をとる。自然界における同位体比の変動が小さいうえ、ふつう試料と標準物質との間にわずかな違いしかないため、右辺第一項はきわめて1に近い数字となり、それゆえ δ 値は1より数桁小さな小数となる。しかし頭にゼロをいくつも並べる表記は面倒ということで、 δ 値を1000倍してパーミル(‰)を単位とする「千分率」として表現することが、長らく慣習として定着してきた。

この一風変わった表記法は、同位体比を測定する際に、複数の検出器をもつ特殊な磁場型質量分析計が用いられてきたことと決して無縁ではない。自然界で生じるわずかな安定同位体比の違いを正確に定量するために、測定試料と標準物質を交互に測定して、電圧など微妙な測定環境の変動を相殺するという苦肉の策が編み出されたわけである⁴。どの試料に対しても同じ標準試料と比較することによって、相対的な違いとして記述しようというわけだ。かくして、試料中に含まれる ^{13}C や ^{15}N といった同位体の割合は、「標準物質に対する標準偏差」という直感的にきわめて捉えにくい数値として表示されることになったのである。

ごく限られた研究グループだけがデータを生み、限られたテーマにだけ応用される時代は、それでもよかった。しかし同位体比分析の黎明期から半世紀以上が経ち、もはやそここの研究室で日々大量のデータが生み出される時代になった。さらにその目的も年々多様性が増すようになり、この表記法が足かせになり始めている。安定同位体比は工学や医学などにも広く応用可能な手法であるはずだが、現実はそのような分野への応用はきわめて限られている。この方法論が広がらない最大

の理由は、おそらく上述した独特の表記法にあると私はみる。大学で地球科学を専攻すれば、いやでも δ 値に慣れさせられる。しかしそうではない他の分野の研究者にとってみれば、きっと秘密結社の合言葉にしか聞こえないに違いない。

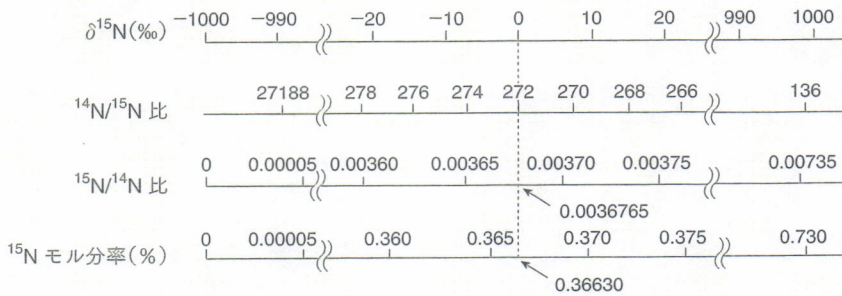
もちろん、 δ 値で表示するメリットがないわけではない。特に、環境中に分布する軽元素の同位体比の違いは速度論的に決まることが多く、その速度定数の比と直接的に関係づけられるからだ。物理化学的な定数と直結することによって、測定値は物理的に解釈可能となる。ただ研究が広がりを見せるにしたがって、このことがあまり意味をもたないケースが増えている。たとえば、麻薬の犯罪捜査や産地偽装判別といったケースでは、同位体比をマーカーとして用いるだけで、物理化学的な裏づけは必ずしも必要ではない⁵。

ではどうすればいいだろう？ 1つの可能性が、試料中に含まれる同位体のモル分率、平たく言うと濃度として示すことである。たとえば ^{15}N の存在量は、

$$[^{15}\text{N}](\%) = 100 \cdot [^{15}\text{N}] / ([^{14}\text{N}] + [^{15}\text{N}])$$

とすることだ。メリットはもちろん、直感でその数字の意味がつかめることだ。これまで報告された δ 値からモル分率への換算は、標準物質の正確なモル分率さえわかれば簡単な算術計算のみだ。決して人気のある研究ではないが、標準物質のモル分率を知る研究は細々と続けられてきた。窒素同位体比の場合、標準試料である大気中の N_2 の $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比を272とするとIAEAが定めている⁶(図)。これはモル分率に換算するとおよそ0.3663%になる。

標準試料のモル分率もつ不正確さはもちろん、測定試料のモル分率の計算値にも伝搬してしまう。しかし、ちょっと想像してみるといい。同様のことはこの世に存在するあらゆる「測定値」につきまとう問題なのだ。私たちは、何かの長さを測るときに、定規やメジャーを日々何の気なしに使っている。そういった「測器」には、ごく些細とはいえ誤差がつきものである。でも幸いにして、そのことが原因で困ったためしは私の人生でただの



図一窒素同位体(¹⁵N)の存在度を表す4つの指標とその関係
上から順にδ値(‰), ¹⁴N/¹⁵N比, ¹⁵N/¹⁴N比, ¹⁵Nモル分率(%). δ値と他の3つの指標を関係づけるには、標準物質(窒素の場合は標準大気)の窒素同位体比を知る必要がある。ここでは、IAEAによって定められた関係を用いた。詳しくは本文参照。

一度もない。あえて言うなら、毎年の健康診断で私の身長が1~2 mm 伸びたり縮んだりする程度の話である。私が推測する限り、同位体比だって困ることはほとんどない。

ふと思いついて、私の机の引き出しの中に入っていた3本の30 cm 物差しを比べてみた。予想通りそれらは、ごくわずかだが違いがあった。その中の1本はJIS規格を満たしているの、その定規を「標準」としてδ値で表すと、短い方は-0.33‰で、長い方は+1.3‰となる。やはりこれでは何のこともやらよくわからない。短い定規は29.99 cm、長い方は30.04 cmと表現すべきなのである。

そもそも私たちは、あらゆる事象が0か1に丸められるデジタル化された社会に暮らしている。安定同位体の業界も、厳密性という縛りの中から、勇気ある一步を踏み出す時期がすでに訪れているのではないだろうか。

文献

- 1—酒井均・松久幸敬: 安定同位体地球化学, 東京大学出版会(1996)
- 2—H. C. Urey et al.: Bull. Geol. Soc. Am., **62**, 399(1951)
- 3—T. B. Coplen: Rapid Commun. Mass Spectrom., **25**, 2538(2011)
- 4—C. R. McKinney et al.: Rev. Sci. Instrum., **21**, 724(1950)
- 5—Y. Suzuki et al.: Food Chemistry, **109**, 470(2008)
- 6—T. B. Coplen: Pure Appl. Chem., **64**, 907(1992)

格納容器冠水計画の危険性

筒井哲郎 ついでつらう
プラント技術者の会

現行の政府・東電が計画している福島第一原発事故炉の「後始末」に関する「中長期ロードマップ」では、1, 2, 3号機のメルトダウンした燃料デブリを取り出すために、格納容器の破損部分を補修し、冠水状態にする、としている¹(図)。

これはスリーマイルアイランドの事故炉(TMI-2)においてなされた処置を参考にしてしているようであるが、決定的に違う作業条件は、TMI-2では原子炉压力容器の破損がなくて、冠水範囲は原子炉压力容器内に限定することができた、という点である。

燃料デブリを取り出すに際しては、冠水後に内部状態の検査、デブリの破碎、デブリの取り出しという難作業をシリアルに実施しなければならず、その期間を通じて冠水状態を保たなければならない。つまり、空洞状態の荷重条件で設計した格納容器ドライウェルを数年間にわたって冠水状態で保つことになる。結果として、地震に遭遇する確率が高くなる。このリスクはたとえば、現在4号機で作業中の使用済み燃料プールから燃料キャスクを取り下ろす際にクレーンで吊り上げて移動中に地震に遭遇するリスクと桁違いの高確率である。