



放射線で生きる微生物 —放射線と生物地球化学—

長沼 毅

Naganuma Takeshi

1. はじめに

“放射線と生物”というと普通はDNA鎖の切断やタンパク質の損傷など、ネガティブな影響が想起される。その過程にはまず、放射線、特に粒子線そのものがDNAやタンパク質に当たるような直接作用（物理的過程）がある。そして、放射線により細胞内の水分子 H_2O からラジカルや過酸化水素などが発生し（化学的過程）、それがDNA切断やタンパク質損傷を引き起こすような間接作用もある。それは細胞内の水だけでなく、細胞外の水でも同じだ。その場合、細胞外で発生したラジカルや過酸化水素は細胞の外でどのような作用をするのだろうか。もしそれが、体内（しかし細胞外）ではなく、自然環境中で起きたらどのような過程——生物地球化学的過程——があり得るだろうか。

これまで“放射線と生物”はよく語られてきたが、“放射線と生物地球化学”はほとんど論じられてこなかった。しかし、2008年10月に米国の*Science*誌に掲載された地下微生物の論文は衝撃的だった¹⁾。光のない暗黒の地底で、しかも、栄養源となる有機物がほとんどない岩石中でも、放射線による水の分解から始まる地球化学的過程からエネルギーと材料を得て生を営むという微生物である。この微生物はとて多芸多才で、ほかの微生物との共同作業なしにこの1種類だけで完結的に生を全うできる。

あの論文からもう8年になるが、今でも、いや、地球外生命探査（いわゆるアストロバイオロジー）が現実的に議論されるようになった今こそ、この微生物の生命活動を支える“放射線と生物地球化学”が注目されている。この微生物の驚きの生態を通して、学問的に認知されるようになってまだ間もない“地下生物圏”と呼ばれる生息場所（ハビタット）の広がりや、地球外における生命存在の可能性について展望してみよう。

2. デスルフォルディス・アウダックスヴィアトル

前述の地下微生物は、学名は*Desulforudis audaxviator*という（図1）。南アフリカの金鉱山、深度2,800mの地下水から採取されたもので、属名の*Desulfo-*は“硫酸を還元する”，*-ruides*は“棒状の”を意味するので、専門的にいうと“硫酸還元桿菌”だと想像できる。種小名の*audaxviator*は152年前のSF名作「地底旅行」（ジュール・ヴェルヌ著）に出てくる“大胆な旅人”を意味するラテン語にちなんでいる。聡明で勇気ある鉱物学者に火口に入って地底旅行することを促す暗号文の一節だ。火口とはさぞ熱いことだろう。そして、この微生物が採られた深部地下水も水温60℃と熱かった。

細かい話になるが、学名についてもう少し説

それぞれ 15.7×10^3 個, 5.3×10^3 個, 4.5×10^3 個の H_2 分子が生じたという²⁾。水の完全解離エネルギー ($H-O$ 結合 2 個分で約 10 eV) から単純計算すると 10^5 個の H_2 になるが、実際にはその 1~10% 並みというところか。そして、この程度のエネルギー、あるいは、この程度の H_2 供給で生命活動が維持できるのだろうか。最近の総説によると、微生物 (細菌) の生命活動に必要なエネルギーは 1 細菌当たり 1 日当たり 3.3×10^{-10} J とのこと³⁾。ただし、これは室内実験からの結論であり、自然界ではこの $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 程度、すなわち $10^{-13} \sim 10^{-16}$ J のオーダーになると推定されている。これはおおむね 1 keV ~ 1 MeV のオーダーでしかないことを考えると、岩石中の放射線のエネルギー (球速) で生命活動を維持することは可能だと論理的に頷けるだろう。あとは放射能 (球数) 次第で、維持される生命体の数が決まってくるはずだ。

エネルギーの方はよいとして、細胞の成分や栄養分となる“物質”の方についても、その地球化学的なセッティングを考えなければならない。例えば、硫酸還元 (硫酸呼吸) するための硫酸はどこからくるのか。岩石中によくある黄鉄鉱 (パイライト FeS_2) が過酸化水素によって酸化されて硫酸イオン SO_4^{2-} が生じたと考えられている¹⁾。水の分解で生じた還元力が硫酸イオンに移ったと考えてもよい。

では、独立栄養の原料である二酸化炭素はどこからきたのか。これは、やはり普遍的な炭酸塩鉱物である方解石 (カルサイト $CaCO_3$) から地下水に溶出した重炭酸イオン HCO_3^- から CO_2 を得られるし、重炭酸イオンに放射線が当たってできたギ酸イオン HCO_2^- から CO_2 を得ることができる。前者の反応は炭酸脱水素酵素 (カーボニックアンヒドラーゼ) によって反応速度がとても速く——生化学反応において最速級に——なる。この酵素は反応前の基質と反応後の生成物のどちらも無機物という点で珍しい酵素である。いずれにせよ、 CO_2 を水素分子 H_2 で還元して有機物、例えば $(CH_2O)_n$ と総称

的に略記される炭水化物などが合成されるのである。

方解石からの重炭酸イオンの溶出とともに、カルシウムイオン Ca^{2+} も溶出する。すると、粘土鉱物中のアンモニウムイオン NH_4^+ と陽イオン交換して NH_4^+ が溶出し、これが微生物の細胞に取り込まれてタンパク質や核酸 (ATP や DNA の材料) などの窒素含有分子を作る材料となる。

リンは岩石中のリン酸塩鉱物に含まれている。硫酸還元 (硫酸呼吸) の結果として生じた硫化水素 H_2S がこの鉱物と反応すると、リン酸イオン PO_4^{3-} が溶出し、これも微生物の細胞に取り込まれて核酸やリン脂質 (細胞膜の材料) になる。このようにして、岩石に囲まれた地下水空間だけで生命活動が完結的に営まれている事例が発見されたことの意義は大きい。

4. 地球外生命の存在可能性を占う鍵

太陽も食べ物も要らない、地球からのエネルギーがあればよい、という生物はこれまでも人口によく膾炙されてきた。例えば、海底火山から噴出する熱水中の火山ガス——水素 H_2 や硫化水素 H_2S など——の酸化反応から遊離した化学エネルギーを用いる化学合成独立栄養を営む生物が知られている。しかし、それを営むためのセッティングにはしばしばほかの生物の働きが必要、若しくは、あった方が良かった。これに比べれば、*Desulforudis audaxviator* は、太陽も食べ物もほかの生物も要らないという、完全に独立独歩の自給自足である。

太陽系内には地球と同じ、若しくは、よく似た素材でできていて、かつ、(固体や液体かは問わず) 水が存在する岩石天体がたくさんある。すると、その天体を造る岩石内で“水の放射線分解”により育まれる生命がある、と考えることに然程の論理的飛躍はないと思えるだろう。

さらに、太陽系外にも惑星がたくさん発見され、その小さからぬ割合は“地球に似た惑星”

明したい。生物学者の間では、学名はイタリック、つまり斜字体にするのが普通だが（ほかの字体と異なっていればよいので、必ずしもイタリックでなくてもよいが）、この微生物については立字のままである。なぜなら、これはまだ純粋培養した上で諸々の生物学的な特徴や性質が分かっていないからだ。ただし、そこに生息していることは明らかだし、全ゲノム情報に基づいて体の作りやエネルギー代謝などに関する情報も大方分かっている。このような場合、“候補”を意味するラテン語“*Candidatus*”の方を斜字にして学名の前に付すことで“暫定的な

学名候補”であることを示す。後で培養に成功して諸性質などが明らかになったら *Candidatus* が外れ、立字だった暫定学名が斜字になって正式学名になる。

さて、この微生物が“放射線で生きる”メカニズムの概略を説明する（図2）。まず、細胞外の環境水、ここでは地下水 H_2O が放射線により分解して過酸化水素 H_2O_2 と分子状水素 H_2 が発生することを前提にする（ほかにもラジカルが発生するが省略する）。過酸化水素は酸化剤、分子状水素は還元剤として作用するが、このことは後段で重要になる。

分子状水素は細胞膜の外側にあるヒドロゲナーゼという酵素の働きで水素イオン H^+ になる。これが細胞膜の外側に溜まると、あたかも“ H^+ のダム”のようになる。ダムの堤に相当するのが細胞を包む細胞膜である。堤と包みのアナロジーだ。ダムに溜まった水の落水でタービンを回して発電するように、細胞外に溜まった H^+ を細胞内に“落として”ATP合成酵素というバイオタービンを回転させると、高エネルギー分子・ATPが作られる。バイオタービンとか回転とかいうのは比喩ではなく、ATP合成酵素という部品が実際に回転しながら高エネルギー分子ができるのだ。生物界で回転する部品はATP合成酵素と“鞭毛モーター”くらいである。鞭毛は鞭を打つように動いて推進力を発揮すると思われがちだが（そう見える場合もあるが）、鞭毛全体が基部のモーターでぐるぐる回転させられる、例えば、ワインのコルク栓を開けるコルクスクリーのように回することで推進力を得るのである。

高エネルギー分子ATPのフルネームは“アデノシン三リン酸”という。これはエネルギーが入り出す多くの生化学反応で使われる重要な分子であり、例えば米国ドルがほとんどの国で使えるのと似ているので“生体エネルギー通貨”と呼ばれることもある。ATPが作られれば、その細胞は生命活動に必要なエネルギーを得たことになる。そして、ATP

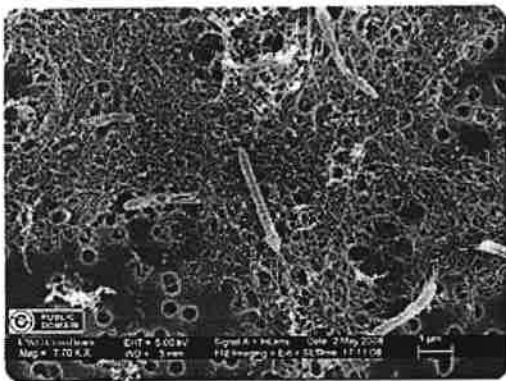


図1 *Desulforudis audaxviator* の走査型電子顕微鏡写真（パブリックドメイン）

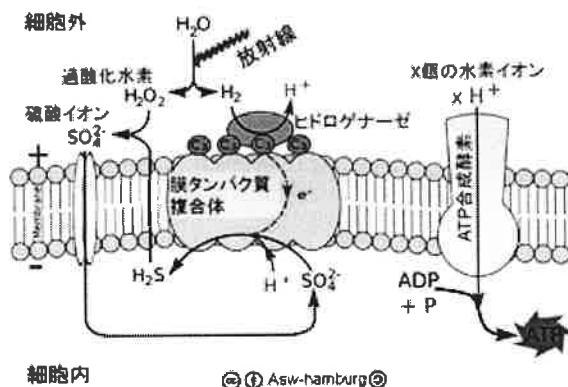


図2 *Desulforudis audaxviator* に想定されるエネルギー代謝過程とそれを支える“放射線による水の分解”のイメージ（オリジナル作者 Asw-hamburg；Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International）

を作るのに必要な H^+ が“水の放射線分解”，英語でいうと radiolysis of water に由来することが、この地下微生物で特筆すべき点なのである。

この微生物は“硫酸還元桿菌”なので硫酸を還元する。その還元剤こそ、細胞内に流れ込んだ H^+ と、ヒドロゲナーゼから膜タンパク質複合体（別名・電子伝達系）を經由して細胞内に送られた電子 e^- なのである。元はといえば水の放射線分解で生じた分子状水素 H_2 が還元力の由来である。これを硫酸で還元するわけだが、見方を変えると、 H_2 を硫酸で酸化するともいえる。 H_2 を酸素 O_2 で酸化すれば普通の燃焼あるいは呼吸（酸素呼吸）だが、ここでは O_2 の代わりに硫酸が酸化剤になるので“硫酸呼吸”といってもよい。つまり、硫酸還元とは物事の一面的な見方であって、硫酸呼吸と考えた方が生物学的な意義を理解しやすくなるのである。呼吸なので、この反応からも化学エネルギーを獲得でき、生命活動に使うことができる。

化学エネルギーと ATP があれば、二酸化炭素 CO_2 から細胞の成分や栄養分などの有機物——タンパク質やデンプンなど——を自給自足することができる。これを専門的には“独立栄養”という。有機物を自給自足できない者、例えば人間を含む動物は“ものを食べる”が、これは従属栄養という。植物は化学エネルギーの代わりに太陽光などの光エネルギーを使って独立栄養を営むが、これは光合成独立栄養である。放射線で生きる地下微生物の場合は化学合成独立栄養という。英語で簡単にいうとリソトロフィー lithotrophy, 無機物 (litho-) の酸化還元反応から遊離する化学エネルギーを用いた独立栄養 (-trophy) という意味だが、字義どおりに訳せば“岩石栄養”となる。正に、この地下微生物の特徴をよく表した言葉ではないだろうか。

3. 放射線で生きるための地球化学的セッティング

地下微生物 *Desulforudis audaxviator* が放射線

で生きていける細胞内のメカニズムは想像できたとして、それを支える細胞外すなわち環境のセッティングはどうなっているのだろう。まず、水を分解する放射線源として岩石中の放射性同位元素を想定するのが当然だが、普通に考えると放射性カリウム (^{40}K) が想起される。水分子 H_2O すなわち $H-O-H$ を $H\cdot$ と $\cdot O-H$ に解離するのに必要なエネルギーは約 5 eV (493 kJ mol^{-1}) であるのに対し、 ^{40}K の壊変から生じる β 線は β^+ , β^- ともに 100 万 eV (1 MeV) 以上、 γ 線も 10 万 eV (100 keV) 以上なので、 ^{40}K の放射線で十分に水分子を分解できる。

放射線のエネルギーは野球に例えればピッチャーが投げる球の“球速”のようなもので、エネルギーのほかに“球数”も問題になる。こちらは放射能 (1 秒当たりの壊変数) が相当する。広島県辺りの花崗岩の ^{40}K なら、だいたい kg 当たり 1,000 Bq (10^3 Bq kg^{-1}) だ。ちなみに人体の ^{40}K はおおむね 10^2 Bq kg^{-1} というご存知だろう。

Desulforudis audaxviator がいる地下水の帯水層の岩石では、 ^{40}K よりも、閃ウラン鉱 (ウランナイト UO_2) に含まれる放射性ウラン ^{235}U や ^{238}U の寄与が大きいと想定されている¹⁾。また、放射性トリウム ^{232}Th の寄与もあるだろう。放射能 (野球の“球数”に相当) はさておき、エネルギー (野球の“球速”に相当) を比べると、表 1 のようになる。

また、放射線 1 MeV 当たりの水の分解産物 H_2 の数は線種ごとに異なる。それを求めた一例によると、1 MeV の α 線・ β 線・ γ 線からそ

表 1 岩石中の放射線源となる放射線同位元素の代表例とその壊変から生じる放射線のエネルギー (MeV)

線源	α 線	β 線	γ 線
^{40}K	0	1.18	0.16
^{232}Th	35.95	2.84	2.24
^{235}U	34.03	10.45	0.55
^{238}U	42.87	6.09	1.70

だと考えられている。しかし、中心恒星からの距離あるいは宇宙放射線を遮蔽する磁場や大気の有無などによって、地表は生命存在が困難かもしれない。しかし、深部地下なら大丈夫だ。地下の岩石中にやはり“水の放射線分解”に支えられた生命活動があるかもしれない。もしかしたら、宇宙全体で見るとそのほうが普遍的なのであって、地球表面のように太陽光に支えら

れた生命活動の方が異端なのかもしれない。

参考文献

- 1) Chivian, D., *et al.*, *Science*, **322**, 275-278 (2008)
- 2) Blair, C.C., *et al.*, *Astrobiology*, **7**, 951-970 (2007)
- 3) Hoehler, T.M. and Jørgensen, B.B., *Nature Rev Microbiol*, **11**, 83-94 (2013)

(広島大学大学院生物圏科学研究科)