

重元素を集める微生物の分子メカニズムに迫る

大貫 敏彦

重元素生物地球化学研究グループ

Toshihiko Ohnuki Research Group for Heavy Elements Biogeochemistry

微生物の秘められた能力を探り、医療やものづくり、環境浄化などに応用する研究が盛んに行われている。重元素生物地球化学研究グループは、ウランなどの重元素を集める能力を持つ微生物の研究を行っている。「その能力を分子レベルで探る研究を行っているのは、世界でも私たちとイギリスのグループの2つしかありません」と大貫敏彦グループリーダー（GL）は言う。分子メカニズムが明らかになれば、それを人工的に応用して、海水中からウランを採取したり、家電製品からレアメタルを回収する技術を開発できる可能性がある。

重元素と微生物

「このひげのようなものが、ワイン酵母に集まったウランの鉱物です」。大貫敏彦GLは、電子顕微鏡画像(図1)を指さしながら説明する。

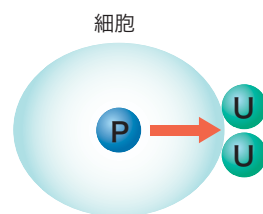
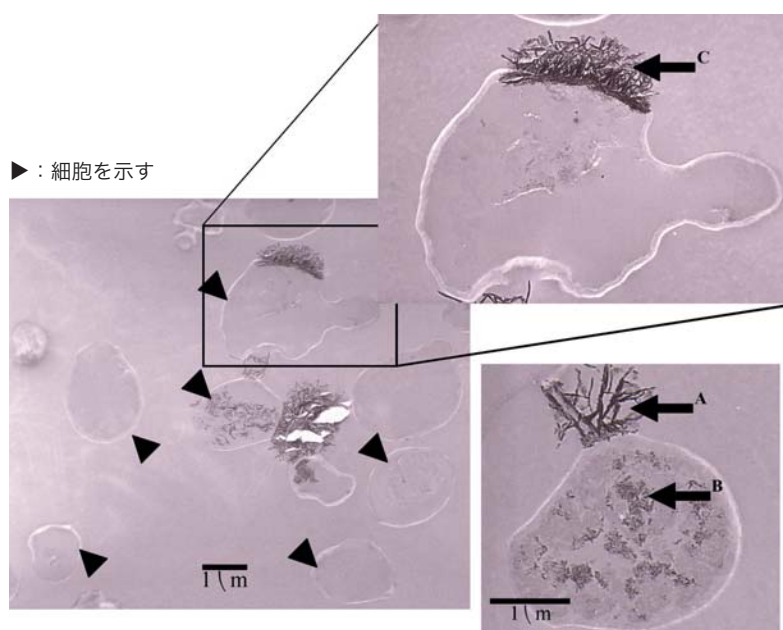
地球化学が専門の大貫GLは長年、地球表層にある重元素の挙動を探るため、無機的な鉱物と重元素の反応を探る研究を進めてきた。ではなぜ、微生物に注目するようになったのか。

「地層処分する廃棄物に含まれる放射性核種の長い年月での移動挙動を知るために、ウラン鉱山を調査しました。するとウランの移動は、無機的な鉱物とウランとのマイクロメートル以下のスケールで起きる化学反応が左右していることが分かりました。それならば、マイクロメートル以下の微生物も、ウランの

移動に関係しているかもしれないと思ったのです。また、1992年にアメリカの研究者が、硫酸を呼吸に使う硫酸還元菌が、ウランを呼吸に使い還元できることを発見しました。これは面白い、と思いました」

酸化還元反応はウランの移動に大きな影響を与える。6価のウランは水に溶けるが、4価に還元されると水に溶けにくくなるからだ。

「実は、地球が誕生したとき、すべてのウランは4価の状態の水に溶けにくく、地球表層に散在したまま移動しなかったと考えられています。今から約27億年前、微生物の光合成によって地球の海洋や大気に酸素が増え始め、酸素によりウランは6価に酸化されて水に溶けるようになりました。水に溶けたウランが移動し、ある特定の場所に集まり還元されてウラン鉱床ができたのです」



細胞表面でU（ウラン）とP（リン）が出合うことで、ウランリン酸塩鉱物ができる

図1 ウランを集めるワイン酵母

細胞膜の特定箇所(矢印A・C)でウランが濃集している。一部のウランは細胞内にも浸入している(矢印B)。ただし、同じ種類のワイン酵母でもウランを集めない細胞も見られる。



大貫 敏彦（おおぬき としひこ）

1955年、茨城県生まれ。1980年、北海道大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、日本原子力研究所入所。環境安全研究部、環境科学研究部を経て、2005年より現職。博士(理学)、専門は地球化学。

ワイン酵母がウランを集める

1990年代後半から大貫GLは、無機的な鉱物から微生物へと研究対象を大きく転換した。地下深くにも微生物が大量に存在していることが解明され始め、地球化学でも微生物の研究が大いに注目されている。「しかし、日本の地球化学者で微生物の研究に足を踏み入れる人はとても少ないですね。私も最初はややこしい微生物の名前を覚えるのが大変でした(笑)」

大貫GLはまず、入手しやすく扱いやすい微生物を対象に、本当に重元素を集める能力があるのかどうかを調べることにした。「知人から酒酵母を何種類かもらってきて、ウラン溶液に入れてみました。すると1種類だけ、細胞膜にウランを集める酵母が見つかりました。それがワイン酵母だったのです」

硫酸還元菌のようにウランを呼吸に使う微生物もある。しかし多くの微生物にとって重元素は有毒だ。微生物がウランなどを集める能力は、有毒な重元素を一個所に集めて隔離し、身を守るために獲得したものなのだろうか。「それは分かりませんが、微生物が体内に入ってきた重元素を一個所に閉じ込めたり、有機物と結合させて体外に排出したりする現象も見つかりました。また、細胞分裂によって娘細胞に重元素を集めて渡してしまうというひどい例もあります(笑)。鉄や亜鉛などの体に必要な必須元素を集めるときに、有毒な重元素も一緒に集めてしまうこともあると思います。とにかく微生物は、いろいろな方法で重元素を集めることが分かってきました」

無機的な鉱物にも重元素を集める能力を持つものがある。微生物の重元素を集める能力は、無機的な鉱物よりも高いのだろうか。「カオリナイトという陶磁器の原料となる粘土鉱物と、土壌のどこにでもいる微生物であるバチルス菌に、プルトニウムの水溶液を与えました。すると、プルトニウムはバチルス菌だけに集まり、カオリナイトには集まっていない

ことが分かりました(図2)」

カオリナイトなどの粘土鉱物は、無機的な鉱物の中でも物質を集める能力の高いものとして知られている。「微生物が重元素を集める能力は、粘土鉱物よりもはるかに高いことが分かったのです」

ウランを集めるメカニズムを突き止める

微生物はどのようなメカニズムで重元素を効率よく集めるのだろうか。ワイン酵母の電子顕微鏡画像(図1)を見ると、細胞膜の特定個所にウランの鉱物ができていることが分かる。

「このワイン酵母は細胞内にリンをたくさん蓄積することが知られています。ワイン酵母が細胞内に蓄積したリンとウランが細胞膜で出会い、ウランリン酸塩という鉱物ができたのです。ウランは鉱物化すると、水に溶けにくく安定な物質になります」

ただし、鉱物ができるには、与えた溶液よりも20～30倍も高い濃度でウランとリンが出合う必要がある。ワイン酵母の細胞膜に、ウランを濃集させる仕組みがありそうだ。細胞膜には、細胞が外部と情報や物質をやりとりするためのさまざまな膜タンパク質が存在している。何らかの膜タンパク質がウランを濃集している可能性が高い。

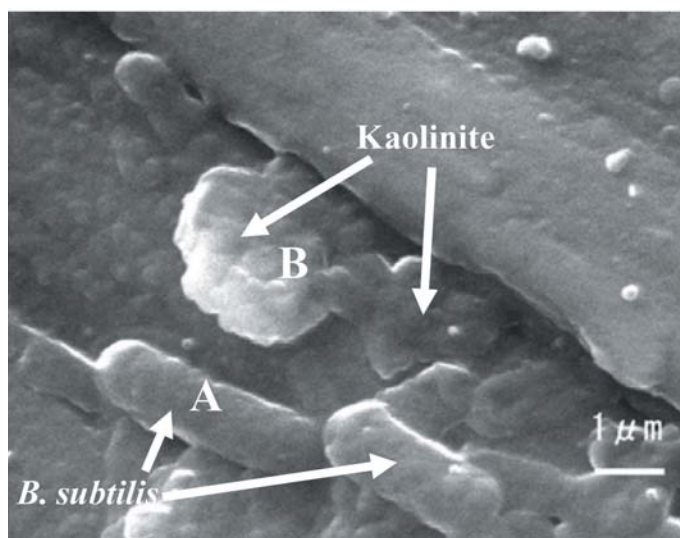


図2 プルトニウムを還元して集めるバチルス菌 粘土鉱物のカオリナイト(Kaolinite)とバチルス菌(*B. subtilis*)にプルトニウム水溶液を加えると、バチルス菌だけにプルトニウムが濃集した。ある種の微生物は無機的な鉱物よりも重元素を濃集する能力がはるかに高いことが分かった。

一方、バチルス菌はどのようにプルトニウムを集めるのか。「水溶液として入れたのは6価のプルトニウムでしたが、バチルス菌に集まったプルトニウムは4価になっていました。6価から4価へと還元されたのです。つまりバチルス菌からプルトニウムに電子を受け渡していることが分かりました。ウランと同様に、プルトニウムも4価になると水に溶けにくくなり、安定化します」

このような微生物が重元素を還元して集める反応では、酸化還元能力を持つ酵素などのタンパク質が働いている可能性がある。

ウランを集めるタンパク質を発見！

それでは、ウランやプルトニウムを集めるタンパク質は本当に存在するのだろうか。大貫GLたちは、ウランを吸着した状態の酵母の細胞膜からタンパク質を溶かし出し、液体クロマトグラフィー装置とICP質量分析器を組み合わせ、膜タンパク質を大きさごとに分けて分子量を測定すると同時に、ウランの濃度を測定した。

「やはり、あった！という感じでした」。分析データを見たときの感想を、大貫GLはこう語る。分子量

約10万という大きさのタンパク質の部分にウランが検出されたのだ(図3)。

この実験は、環境中有機物の分析研究で開発された手法を、タンパク質の研究に導入したものだ。「カリウムなど生体の必須元素とタンパク質の関係を探っている研究者はたくさんいます。しかしウランとタンパク質の関係を分子レベルで探る研究は、世界でも私たちとイギリス・マンチェスター大学でしか行っていない。マンチェスター大学の研究グループは微生物が専門なので、重元素の化学には詳しくありません。さらに、プルトニウムを使った微生物の研究となると、ほとんど例がありません。そもそもプルトニウムを扱える研究所は、世界でも極めて限られています。最近、アメリカのロスアラモス研究所が始めたようですが、プルトニウムを使った微生物の研究では、私たちが世界の先端を独走している状態です」

大貫GLたちは現在、分子量約10万のタンパク質の正体を突き止める分析を行っている。「そのタンパク質が1種類なのか複数なのかはまだ分かりません。アミノ酸の配列を読み取り、タンパク質を特定しようと思います」

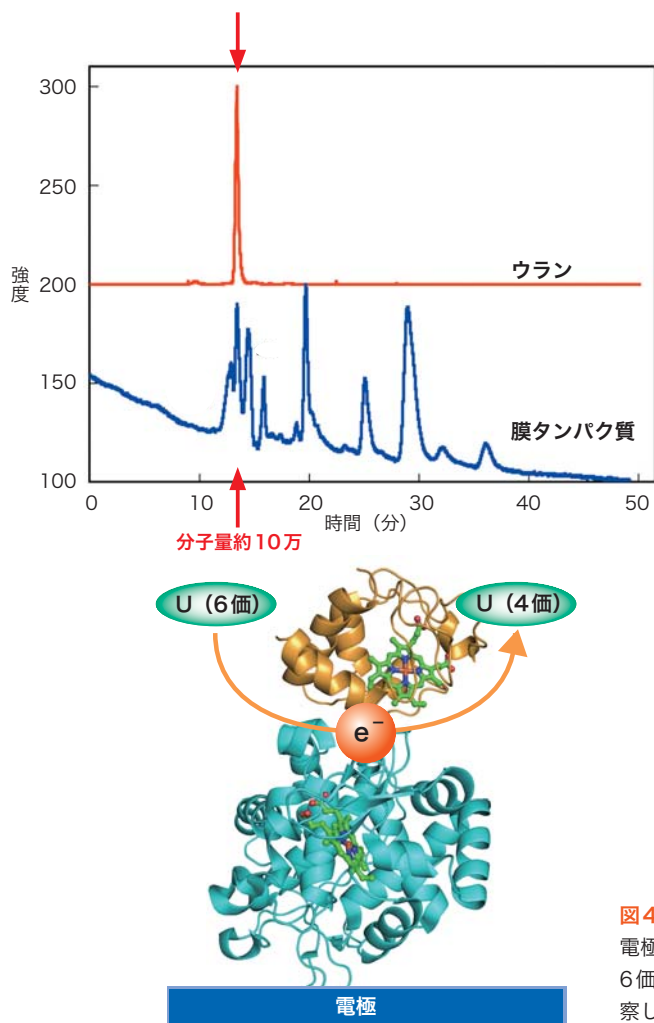


図3 ウランを集める膜タンパク質のデータ(左)と分析装置(液体クロマトグラフィー) 左図のウラン(オレンジの線)および膜タンパク質(青い線)は、ウランを吸着した酵母の膜タンパク質をカラムにより分子量の違いで分離した後に出したデータである。ウランのピークは、膜タンパク質の約13分後(分子量約10万)のピークと一致することから、ウランを濃集する分子量約10万のタンパク質が存在することが分かった。

図4 細胞膜を模した装置 研究グループでは、電極からタンパク質に電子を与え、ウラン(U)を6価から4価へ還元する様子をリアルタイムで観察しようとしている。

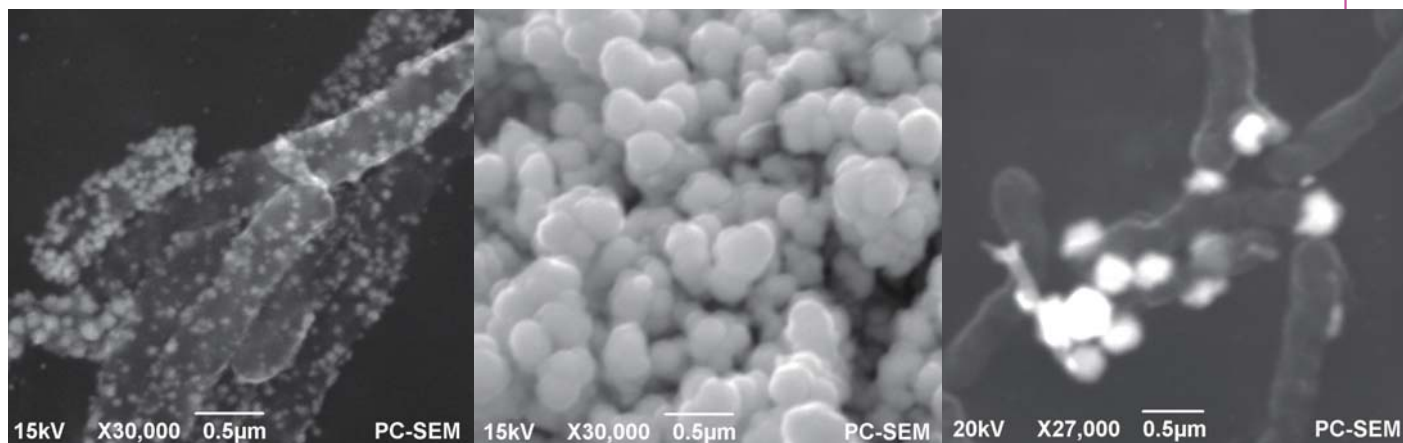


図5 鉄還元菌の細胞表面上にナノ粒子化した白金とパラジウム 鉄還元菌の細胞表面に、白金あるいはパラジウムのナノ粒子が生成している(左)。鉄還元菌を加えない場合(中)や滅菌した鉄還元菌(右)では、生きた鉄還元菌よりも直径の大きな粒子が生成される。粒子の直径を小さくすることで表面積が大きくなり、高価で希少な白金やパラジウムを触媒として有効利用することができる。

さらに、ウランを集めるタンパク質を探すためのもう一つの実験も進めている。「ウランを微生物に与えて培養したとき、細胞内でたくさんつくられるようになるタンパク質を見つける実験です。こちらでも、ウランを集める別のタンパク質が見つかりそうです」

大貫GLたちは、細胞表面を模した人工的な装置で、タンパク質などの生体分子が重元素を集める仕組みを解明する実験も進めている(図4)。「電極の上に還元能力のある酵素のタンパク質を付けた装置をつくります。そして電極からタンパク質に電子を与え、その電子をタンパク質から重元素へ受け渡して還元が起きる様子を調べようとしています」

エネルギー・資源問題の解決にも役立つ

ウランなどの重元素を集めるタンパク質を特定できれば、それを人工的な装置に用いて、濃集メカニズムを分子・電子レベルで探ることができる。

このような研究は、地球表層にある重元素の挙動を知ることに役立つだけでなく、特定の重元素だけを集める技術を開発することに役立つ。「元素によって還元のしやすさが違うので、電極にタンパク質を付けて、電圧のかけ方をコントロールすることでプルトニウムだけを還元して集め、ウランは還元せずに集めないといった使い方もできるでしょう」

大貫GLが「将来、可能性がある」と語るのが、このようなバイオ手法を用いて海水からウランを効率よく採取する技術だ。原子力発電の燃料であるウランも、限りある資源である。ただし、海水中にはばく大な量のウランが溶けており、それを採取して利用できればエネルギー問題の解決に大きく貢献できる。

家電製品には白金などの高価なレアメタルが使われている。レアメタルの多くは産出国が偏在してお

り、資源枯渇も心配されている。資源の乏しい日本は特定の国から高価なレアメタルを輸入している。レアメタルの回収にも微生物の能力を応用できるかもしれない、と大貫GLは語る。

「私たちは名古屋大学との共同研究で、白金やパラジウムの鉄還元菌による還元、細胞表面の酵素が関与している可能性があることを明らかにしました(図5)。このような基礎研究は、「都市鉱山」からレアメタルを効率的に回収する技術へと発展する可能性があります」

大貫GLたちが進める日本原子力研究開発機構ならではのユニークな微生物研究から、私たちの暮らしに貢献する新技術が生まれてくることだろう。

(取材・執筆:立山 晃)

●参考文献

- [1] T. Ohnuki, T. Yoshida, T. Ozaki, M. Samadfam, N. Kozai, K. Yubuta, T. Mitsugashira, T. Kasama, A. J. Francis, Interactions of uranium with bacteria and kaolinite clay, *Chem. Geology*, **220**, 237-243 (2005).
- [2] T. Ohnuki, T. Ozaki, T. Yoshida, F. Sakamoto, N. Kozai, E. Wakai, A. J. Francis, H. Iefuji, Mechanisms of uranium mineralization by the yeast *Saccharomyces cerevisiae*, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 5307-5316 (2005).
- [3] T. Ohnuki, T. Yoshida, T. Ozaki, N. Kozai, F. Sakamoto, T. Nankawa, Y. Suzuki, A. J. Francis, Chemical speciation and association of plutonium with bacteria, kaolinite clay, and their mixture, *Environmental Science & Technology*, **41**, 3134-3139 (2007).
- [4] T. Ohnuki, T. Ozaki, T. Yoshida, N. Kozai, T. Nankawa, F. Sakamoto, T. Sakai, Y. Suzuki, A. J. Francis, Concurrent transformation of Ce (III) and formation of biogenic manganese oxides, *Chem. Geology*, **253**, 23-29 (2008).

Research on molecular mechanisms of heavy elements accumulation by microorganisms

The veiled ability of microorganisms is attracted by many research scientists in the field of medical science, separation technology, environmental remediation, etc. T. Ohnuki and his colleagues have found biomineralization of U^{VI} on the cell surface of *Saccharomyces cerevisiae*, bioreduction of U^{VI} and Pu^{VI} . They have been studying the mechanisms in molecular level.