



地底という極限環境に生きる微生物は 地上世界に影響を与える

——メタン資源生成と気候変動との関わり

清水 了 Satoru Shimizu

公益財団法人北海道科学技術総合振興センター 幌延地圏環境研究所 主任研究員

地底、いわゆる大深度の地下は私たち生物にとって過酷な世界だ。その理由をあげればキリがない。たとえば、生物が住める空間、酸素、栄養源となる有機物はほとんどない。太陽光も届かないから光合成によって有機物を作り出すこともできない。そんな過酷な世界に生きる生物と人間社会との関わりを紹介する。

1 地底を研究するために つくられた施設は 日本にたった2カ所しかない

地底は地上世界とは隔絶されており、人が直接アクセスできる場所は限られている。日本国内においてはいくつかの鉱山を除いて、純粋に科学研究のために地底にアクセスできる場所は2カ所しかない。一つ目が私たちが主に研究フィールドとしている北海道北部の幌延町にある深地層の研究施設(図1)で、二つ目が岐阜県瑞浪市にある深地層の研究施設だ。

幌延の施設は数百万年前に植物プランクトンが深海で堆積してできた堆積岩の地層に建設されており、2016年現

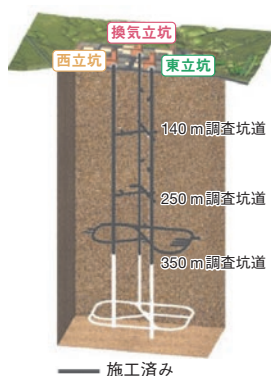


図1 幌延深地層研究センターの概略図(<http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/index.html>)と地下坑道の様子

在、地下350 mまで人が入ることのできる水平坑道が展開されている。瑞浪の施設はマグマが冷えて固まってできた花崗岩に建設され、地下500 mまで

水平坑道が展開されている。

施設内には地上から人キブルとよばれるエレベーターで地下深部へと降りていく。坑道内は徒歩で移動し、さま

【関連する領域】

組織：大学（微生物生態学系、環境系、資源工学系）、産業技術総合研究所、経済産業省・資源エネルギー庁
業界：環境、エネルギー資源開発
学科：生物、地学

学問：環境工学、生物学、環境学

情報源：経済産業省・資源エネルギー庁HP、環境省HP、幌延深地層研究センターHP

さまざまな地底研究の様子を見学することができる。基本的に申請さえすれば誰でも見学が可能なので、興味のある方は実際に地底の世界を体験してみることをお勧めする。



2 石炭の地層も地底生物を研究する絶好のフィールドだ

石炭^{*}は化石燃料の一種で主に火力発電所や製鉄所の燃料として使われているが、日本ではそのほとんどを輸入に頼っている。現在、国内では北海道の釧路市にある釧路コールマインが地底深くから石炭を直接採取することができる唯一の炭鉱として稼働している。テレビ番組でも紹介されたことがあるのでご存知の方も多だろう。

この炭鉱では海底下約200 mにある石炭の地層から石炭を削り出している。私たちはここでも地底に住む生物の探索をおこなっている。こちらの施設も研究目的であれば、入坑することが可能である。

この炭鉱での地下へのアクセス方法は地上から人車とよばれるケーブル式の列車に乗車して海底下200 mまで降下する(図2)。そこから徒歩で石炭層の掘削現場(切羽)^{*}まで数kmを移動する。掘削現場では最先端のドラムカッターという装置で石炭の掘削がおこな

図2 釧路コールマインの石炭掘削現場と人車

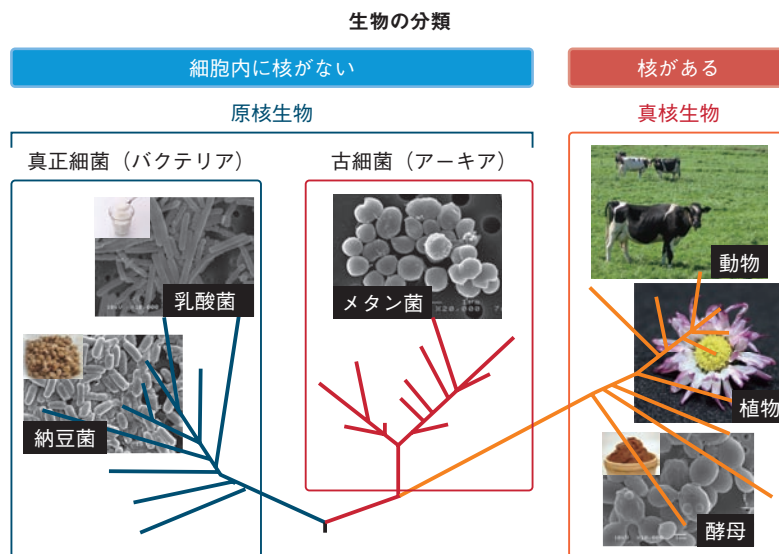


図3 生物の分類と微生物

われている(図2)。この切羽では酸素に触れていない、すなわち地上の影響を受けていない地下の新鮮な石炭を採取することができる。私たちが生物研究用の石炭を採取するのもこの「切羽」という場所である。

みる(図3)。生物は細胞内に遺伝子を収納する核という構造物があるかないかで二つに分類できる。核を持っているのが真核生物で我々動物や植物、カビや酵母などがこれに分類される。一方、核を持たない生物は原核生物といわれ、ここに真正細菌や古細菌が含まれる。真正細菌には身近なところでは納豆菌、乳酸菌、大腸菌などが含まれ、古細菌には天然ガスをつくるメタン生成古細菌などが含まれる。

地底においても非常に多様な真正細菌と古細菌がこれまでに発見されている。本稿で以降、微生物と書く場合には真正細菌と古細菌のことを指していると考えていただきたい。

3 地底に住む生物の分類

地底に住む生物のうち研究の対象となっているのは微生物であり、主に真正細菌(bacteria: バクテリア)と古細菌(archaea: アーキア)である。

ここでいったん、これらが生物学上どの分類群に属しているのか整理して

用語解説 Glossary

【石炭の種類】

石炭化度を指標にして、品質の良い順に「無煙炭」「瀝青炭」「亜瀝青炭」「褐炭」がある。2007年時点の世界の石炭埋蔵量の内訳は高品位炭である無煙炭・瀝青炭が50.8%(4,308億トン)、低品位炭である亜瀝青炭と褐炭がそれぞれ31.5%(2,668億トン)、17.7%(1,497億トン)となっている。

【切羽】

「きりは」と読む。鉱山などの坑道における掘削面をいう。

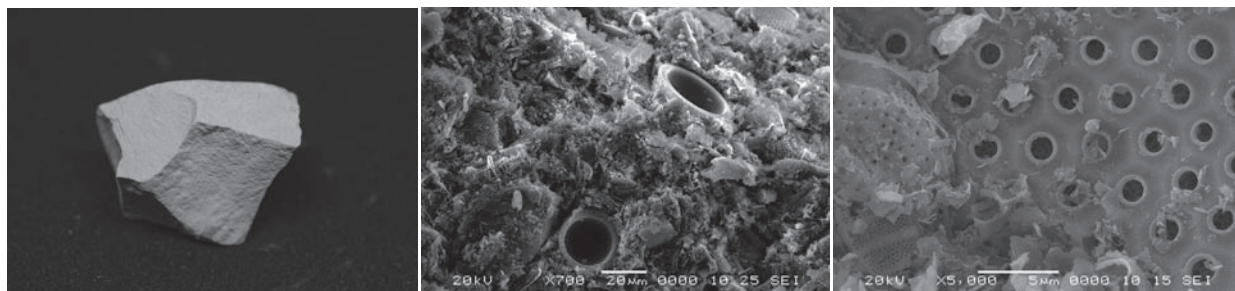


図4 幌延珪藻岩の走査型電子顕微鏡写真

石炭（天北炭田の褐炭）



図5 石炭の構造

4 微生物は地底の岩石の どの部分に棲んでいるのか？

微生物が地底の岩盤の中にどのように住んでいるのか想像できるだろうか。幌延の岩石は珪藻岩とよばれる珪藻（植物プランクトン）の化石が固まってできた岩石である。電子顕微鏡で観察すると珪藻化石がビッシリと詰まっているのが見て取れる（図4）。この岩石の隙間の大きさを調べてみると半径 $0.1\ \mu\text{m}$ に満たない（ $1\ \mu\text{m}=1/1,000\ \text{mm}$ ）。これに対して、微生物の細胞サイズは通常 μm のオーダーだから、そもそも住むことができる大きさの空間がないことになる。では微生物はどこに住んでいるかというと、岩石にできた割れ目（ひび割れ・亀裂）の地下水の中だと考えられている。

石炭層の場合も珪藻岩の地層と似ている。石炭はマトリクスが継ぎ合わさった構造をしている（図5）。このマトリクスの継ぎ目をクリートという。マトリクスの空隙の大きさはわずか $1\ \text{nm}$ 未満（ $1\ \text{nm}=1/1,000\ \mu\text{m}$ ）であり、微生物はサイズの住むことができない。そのため石炭の地層においても微生物はクリートとよばれる亀裂システムの地下水中に存在していると考えられている。

5 良いメタン、悪いメタン

——地底と人間社会との関わり

地底と人間社会との関わりを考える上でメタンは非常に重要な物質である。メタンは天然ガスの主成分であり、その一部は地下で微生物がつくっている。

たとえば、日本国内で現在稼働中のガス田の中では千葉県の南関東ガス田が微生物起源のガス田として有名である。南関東ガス田で産出される天然ガスはメタンが約99%を占めている。

このようにメタンはエネルギー資源として活用すれば人間社会の役に立つが、大気にそのまま放出すれば二酸化炭素の20倍以上もの温室効果ガスとして地球の気候変動に大きな影響を与え、人間社会に災厄をもたらすことが懸念されている。

そのため、地底でメタンが生成されるメカニズム*を知り、それをコントロールすることは人類にとって重要な課題である。このような背景のもと、世界中でメタンの生成プロセスを明らかにするための研究が盛んにおこなわれているが、地底環境においてはそのメカ

ニズムはほとんどわかっていない。これが明らかになれば人間社会におけるエネルギー資源生産および気候変動の諸問題への大きな貢献が期待できる。

6 石炭層とメタン資源生産

世界各地に分布する地下深部の石炭層には莫大な量の炭層メタンが胚胎されており、その総量は140兆 m³以上であると推定されている¹⁾。そのため、炭層メタンは非在来型エネルギーとして注目を集めている。石炭層においても微生物起源のメタンが世界各地で確認されており、中には天然ガス資源として商業生産されている炭田も少なくない。アメリカ合衆国では生産される天然ガスのうち約10%が石炭層に由来するメタンであり、そのうち約半分が微生物起源のメタンといわれている。日本においても北海道の天北炭田の褐炭や釧路コールマインの亜瀝青炭の地層に含まれるメタンは微生物起源であることがわかっている。しかし、石炭層ではメタン生成古細菌の存在は確認されているものの、そのメタン生成プロセスはほとんどわかっていない。そのため、プロセスと制御方法が明らかになれば石炭層の微生物メタンを増産してエネルギー資源としての活用が期待できる。

7 地底と二酸化炭素の貯留とエネルギー資源生産

温室効果ガスである二酸化炭素の大気中への放出を削減するための手段として、発生源から二酸化炭素を回収し、地底深くに貯留・隔離することが検討されている。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) における二酸化炭素回収・貯留 (Carbon Dioxide Capture and Storage; CCS) に関する特別報告書 (2005年) によれば、世界全体におけるCCSによる貯留ポテンシャルは、2100年までに世界全体の排出削減対策のうち累積で15~55%の貢献が見込まれている。温室効果ガス削減のロードマップの中では、石炭層、枯渇ガス田・油田などの深度800 m以深の地層がCCSに適した候補地とされている。

この地層内に二酸化炭素を貯留すると同時に地層内に胚胎するメタンや石油の増産を狙った事業も世界各地でおこなわれている。近年、石炭層においても圧入した二酸化炭素で炭層メタンを置換することによりエネルギー資源である炭層メタンの回収増進を目指したプロジェクト (CO₂-Enhanced coal bed methane recovery; CO₂-ECBM) が世界各国で進行中である²⁾。日本では、2002年から北海道の石狩炭田南部の夕張地域において、CO₂-ECBMの調査プロジェクトが、経済産業省の補助

事業によりおこなわれた³⁾⁴⁾。

石炭層に限らず、油ガス田においても同様のプロジェクトがおこなわれているが、これらのサイトにおいて微生物の作用により地層内のメタンや石油の増産回収を目指した研究もおこなわれている。たとえば、地底の石炭、枯渇油田に残存する石油あるいは地底に貯留した二酸化炭素を微生物作用によりメタンに変換して回収する試みである^{5)~7)}。しかし、いずれも基礎研究の域を出ておらず今後が期待される研究分野である。

8 天然ガスをつくる メタン生成古細菌が住む 珪藻岩の地層

北海道幌延地域の堆積岩の地層は日本海側に広く分布する珪藻岩の地層である。この珪藻岩には岩石1 m³あたり最大2 m³程度のメタンガスが含まれていて、ガスの安定同位体*分析の結果から微生物起源のメタンであることが推定されている。この珪藻岩の地層に建設された地下施設を使って、地下140 mから350 mまでの深さの地下水から微生物の探索をおこなった結果、ほとんどの地下水からメタン生成古細菌が確認された。調査に用いた方法は、地下水中に含まれる微生物細胞からダイレクトに遺伝子を抽出して微生物種を分析するものである。なぜなら、地底に限らず環境中に存在する微生物を生きた状態で育てること (専門用語で“培養する”という) は非常に難しいからである。現在の技術で培養可能な微生物は全体の1%に満たないといわれている。そのため、培養を介さないで直接、微生物遺伝子を分析する方法で調査すれば、そこに存在する微生物種の全体像を把握することができるというわけ

用語解説 Glossary

【メタンの起源】

メタンの起源には、「非生物化学反応」、「有機物熱分解」、「水素酸化型微生物代謝」、「発酵型微生物代謝」の4種類がある。非生物起源のメタンには、フィッシャー・トロプシュ (Fischer-Tropsch) 型反応とサバティエ (Sabatier) 反応により生成されるものがある。有機物熱分解起源のメタンは、有機物が地下の熱源により分解されて生じる。水素酸化型微生物代謝起源のメタンは、メタン生成古細菌により二酸化炭素と水素から合成される。発酵型微生物代謝起源のメタンは、メタノールなどのメチル化合物がメ

タン生成古細菌により分解されて生じる。これらのメタンの起源はメタン分子中の炭素と水素の安定同位体比を分析することにより推定することができる。

【安定同位体】

同位体とは陽子数は同じだが中性子数が異なるために重さ (質量) が異なる元素のことをいう。同位体のうち放射性同位体は時間経過により崩壊し放射線を発するが、安定同位体は時間経過の影響を受けず安定している。たとえば、炭素 (¹²C) には安定同位体の¹³Cがある。

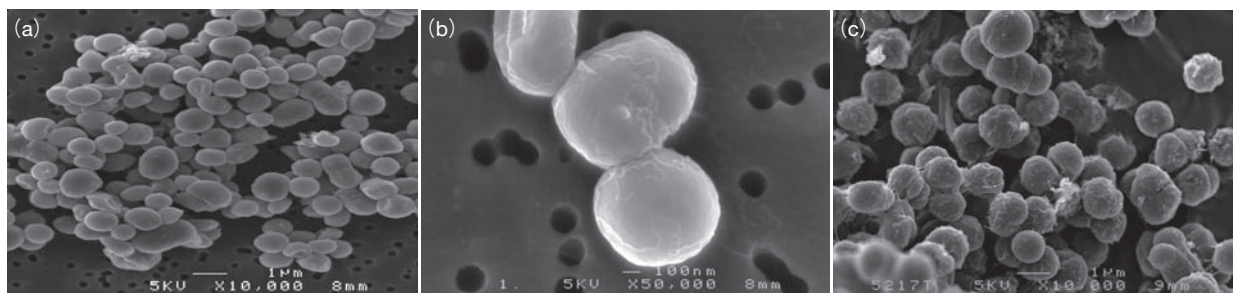


図6 幌延珪藻岩の地層から分離した新種メタン生成古細菌の走査型電子顕微鏡写真

(a) *Methanoculleus horonobensis* (メタノクレウス・ホロノベンシス), (b) *Methanosarcina horonobensis* (メタノサルシナ・ホロノベンシス), (c) *Methanosarcina subterranea* (メタノサルシナ・サブテラニア)

である。

さらに幌延の地底からは培養実験においても多くのメタン生成古細菌の獲得に成功し、その生理学的な性質が明らかにされ、そのうちの3種類は新種として登録されている(図6)^{8)~10)}。

9 多様なメタン生成プロセスの存在

地底では微生物はどのようなプロセスでメタンを作っているのだろうか? 幌延の珪藻岩の地層では遺伝子分析の結果、水素と二酸化炭素を原料としてメタンを作る微生物が多く分布していると推定されている¹¹⁾。培養実験の結果からはさらに多様な原料からメタン生成が可能であることがわかっている。たとえば、ギ酸、酢酸、あるいはメタノールなどのメチル化合物である^{8)~10)}。これは石炭層においても同様である¹²⁾。このように地底におけるメタン生成プロセスの中でも末端部分はメタン生成古細菌の培養に成功さえすれば推定することができる。なお、このメタン生成末端プロセスに関しては地上と地底のメタン生成古細菌の間に違いはみられない。しかし、地底のメタン生成プロセスについては、初期プロセスおよび中間プロセスがほとんど実験的には

証明されておらず、今後の大きな研究課題となっている。

10 地底に住む生物研究の今後

資源、気候変動、および科学的分野において地底に住む生物についてはいまだ不明な点が多く、工学的な応用段階に達するにはまだまだ時間がかかりそうである。今後、地底におけるメタン生成プロセスの全容と制御方法が明らかになることにより、エネルギー資源生産や地球環境保全の分野における社会貢献が期待される。

[謝 辞]

本稿で紹介した著者の関係する研究成果は、経済産業省資源エネルギー庁の深地層研究施設整備促進補助事業によるものである。研究試料の提供には国立研究開発法人日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターおよび株式会社釧路コールドマインから多大なる協力をいただいた。

[文 献]

- 1) Shimada, S. *J. MMIJ.* **111**, 135–43 (1995).
- 2) Damen, K. Faaij, A. Bergen, F. van. Gale, J., et al. 2005. *Energy.* **30**, 1931–1952 (2005).
- 3) Nako, M. & Fujioka, M. *J. MMIJ.* **121**: 461–464 (2005).
- 4) Yamaguchi, S. Ohga, K. Fujioka, M. & Nako, M. *Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour.* **13**, 64–9 (2006).
- 5) Mayumi, D. Mochimaru, H. Yoshioka, H. Sakata, S. Maeda, H. et al. *Environ. Microbiol.* **13**, 1995–2006 (2011).
- 6) Mayumi, D. Dolfing, J. Sakata, S. Maeda, H. Miyagawa, Y. et al. *Nature Commun.* DOI: 10.1038/ncomms2998 (2013).
- 7) 前田治男, 五十嵐雅之, 宮川喜洋, 小林肇, 佐藤光三, 他. 石油技術協会誌. **76**, 530–7 (2011).
- 8) Shimizu, S. Ueno, A. Naganuma, T. & Kaneko, K. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* **65**, 1167–71 (2015).
- 9) Shimizu, S. Ueno, A. Tamamura, S. Naganuma, T. & Kaneko, K. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* **63**, 4320–3 (2013).
- 10) Shimizu, S. Upadhye, R. Ishijima, Y. & Naganuma, T. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* **61**, 2503–7 (2011).
- 11) Shimizu, S. Akiyama, M. Ishijima, Y. Hama, K. Kunimaru, T. et al. *Geobiology.* **4**, 203–13 (2006).
- 12) Shimizu, S. Akiyama, M. Naganuma, T. Fujioka, M. Nako, M. et al. *Geobiology.* **5**, 423–433 (2007).



清水 了 Satoru Shimizu

公益財団法人北海道科学技術総合振興センター 幌延地圏環境研究所 主任研究員

略 歴: 農学博士。岩手大学大学院連合農学研究科にて学位取得後、2003年より現職。

専 門: 微生物生態学、地下圏の嫌気性微生物探索など