

全く新しい生物的メタン生成反応と コールベッドメタン

眞弓大介¹⁾

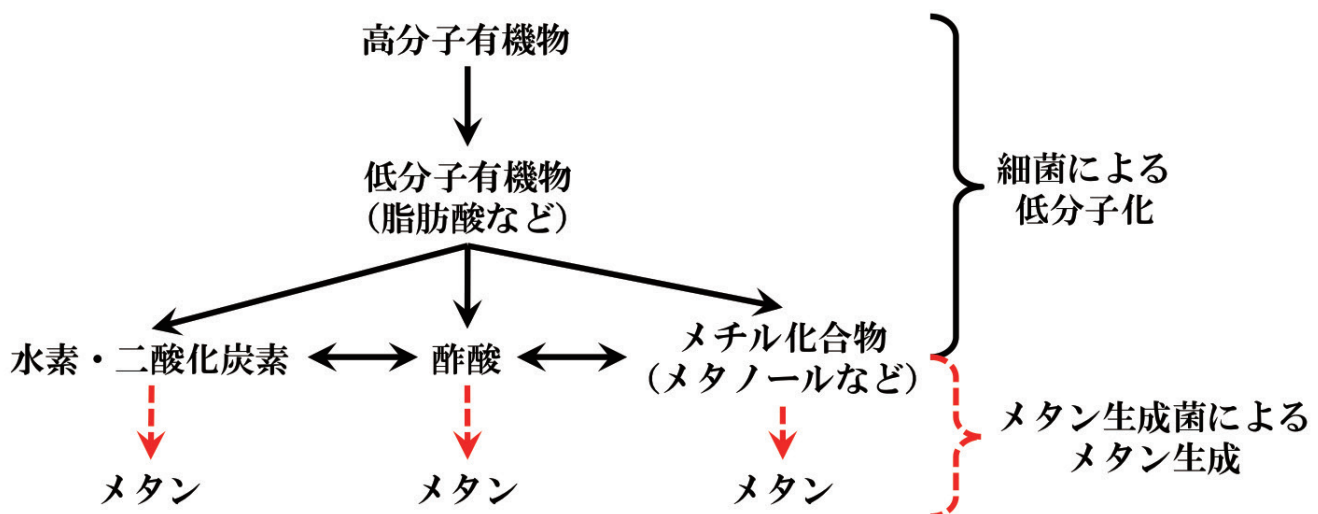
1. はじめに

本誌の読者層を想像するにメタン生成菌という微生物をご存知の方はさほど多くないものと思われる。一方で炭層ガス(コールベッドメタン)は近年、シェールガスと並ぶ非在来型天然ガス資源としての注目度が高いため、本誌の読者層としてはその単語に精通する方のほうが多いだろう。しかし実のところ、コールベッドメタンとメタン生成菌の間には切っても切れない深い関係があり、それはエネルギー資源開発における産業面と地球の物質循環における学術面において今まさに世界的脚光を浴びている。それを象徴する研究成果として、ごく最近、“Science”で取り上げられた研究(Mayumi *et al.*, 2016)をここでご紹介する。

2. 生物的メタン生成

天然ガスの主成分であるメタンの生成起源は、深部地下圏に埋没した堆積有機物の熱分解にともなう生成(熱分解起源)と、堆積有機物および熱分解生成有機物の微生物に

よる生物的分解にともなう生成(微生物起源)に分けられる。コールベッドメタンにも熱分解起源と微生物起源の両方のメタンが存在し、賦存する場所によっては微生物起源のメタンが大部分を占めることがある(Strapoc *et al.*, 2011)。メタンが微生物起源であるならば、メタン生成菌の存在なくしてその生成・蓄積はあり得ない。それがコールベッドメタンとメタン生成菌の切っても切れない関係である。では、微生物起源のコールベッドメタンはメタン生成菌単独によって作られるのかということ、そうではない。一般的認識として、石炭中の有機物がまず様々な複数種の細菌(バクテリア)によって分解・低分子化されたのち、それによって生成した水素・二酸化炭素や酢酸、メタノールがメタン生成菌によってメタンに変換される(第1図)。このような生物的メタン生成機構は水田や湖沼などの地上環境、油田やガス田などの地下環境、牛や人などの生体内環境においてさえも当てはまる普遍的共通事項である。すなわち、メタン生成菌はこれらの3大主要基質の供給を有機物分解を担う細菌に依存しているため、基本的には環境中で独立して生育することはできない。



第1図 生物的メタン生成機構。黒実線は複数種の細菌による有機物の分解・低分子化反応を示す。赤点線は各種メタン生成菌による3大主要基質からのメタン生成反応を示す。これらの細菌とメタン生成菌の間には熱力学的に制約された共生関係が成立している。

1) 産総研 地質調査総合センター-地圏資源環境研究部門

キーワード：石炭・コールベッドメタン・メタン生成菌

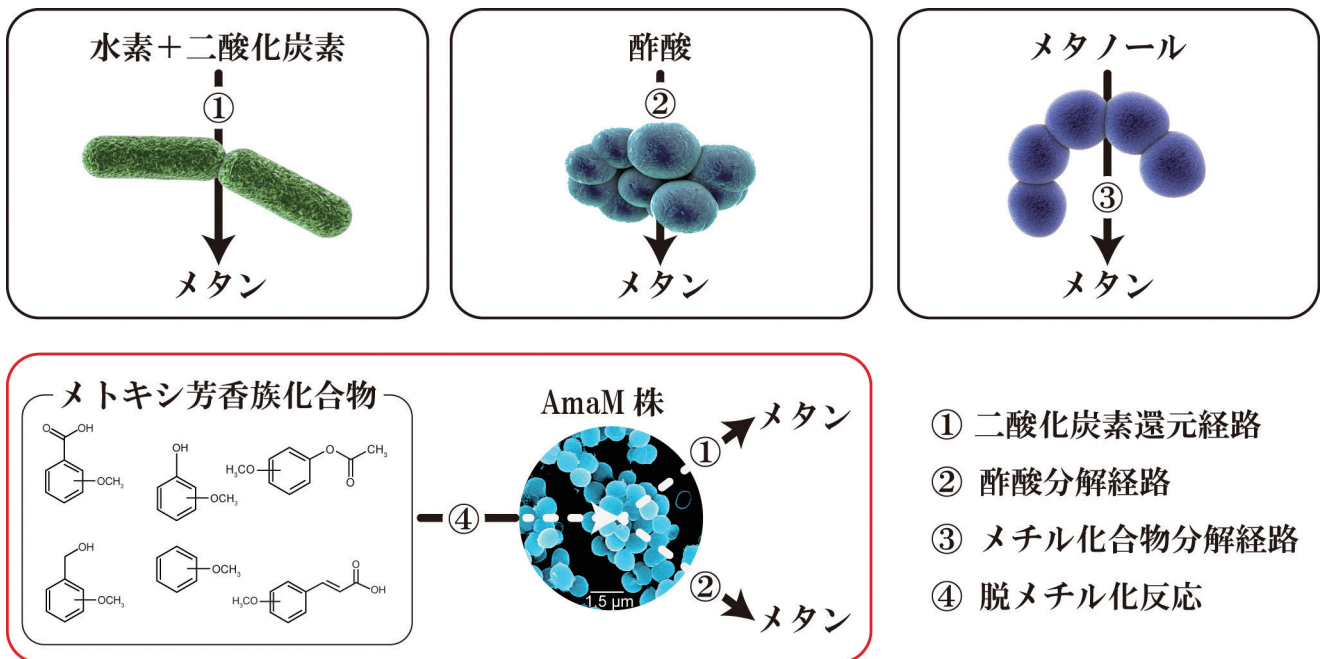
3. 第4のメタン生成基質

上記のように、これまでに発見された150種以上のメタン生成菌の全ては、水素・二酸化炭素や酢酸、メタノールなどのメチル化合物といった極めてシンプルな化合物からしかメタンを作ることはできない(第2図)。それがメタン生成菌の研究が始まって以来の半世紀以上の間、認識され続けてきた常識である。しかし、筆者らは地下環境から獲得したある種のメタン生成菌が比較的炭素数の多いメトキシ芳香族化合物をメタン生成の基質として利用し、そのメトキシ基(-OCH₃)から直接メタンを生成できることを発見した(Mayumi *et al.*, 2016)(第2図)。これまでにメトキシ芳香族化合物を利用する微生物としては、メトキシ基から酢酸を生成する酢酸生成菌が知られている(Ragsdale and Pierce, 2008)。したがって、メトキシ芳香族化合物を出発物質としたメタン生成機構は、酢酸生成菌によるメトキシ基からの酢酸生成とメタン生成菌による酢酸からのメタン生成といった2種類以上の微生物が関与する連鎖反応であると考えられていた。しかし、筆者らが発見したメタン生成菌は少なくとも30種類を超えるメトキシ芳香族化合物を酢酸生成菌の存在なしで利用し、単独でメトキシ基から酢酸を介して(推定)、メタンを生成す

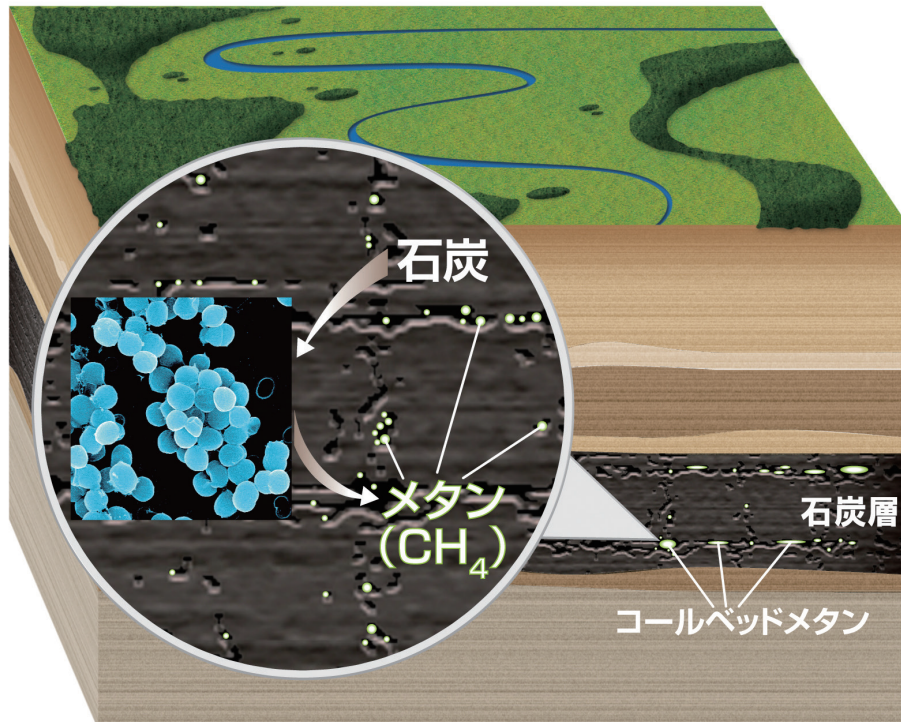
る。極度に限られた基質しか利用できずその供給も他生物に依存するしかない、生物としてあまりに脆弱なメタン生成菌が系統的に大きく離れた酢酸生成菌と同様の代謝機能(推定)を用いて、多様なメトキシ芳香族化合物を基質として独立的に生育できることは、これまで長期にわたって広く認識されてきたメタン生成菌の生化学的・生態学的常識を根底から覆す発見である。

4. メトキシ芳香族化合物とコールベッドメタン

今回発見したメトキシ芳香族化合物を利用するメタン生成菌はコールベッドメタンの形成メカニズムを理解する上で極めて重要な知見となるだろう。これまで、コールベッドメタンの中に微生物起源のメタンが存在することは同位体分析に基づいた地球化学的な研究によって明らかになっていたが、石炭中のどのような有機物が、どのような微生物によって最終的にメタンに変換されるかは全く不明であった。石炭は元々高等植物の木質部に含まれるリグニンが地下に埋没していく過程で地熱作用により熱化学的変性(熟成)を受けて形成される超巨大分子有機物である。したがって、石炭中にはその熟成度に応じてリグニンを構成するメトキシ芳香族化合物が含まれている



第2図 既知のメタン生成反応(上段)とメトキシ芳香族化合物からのメタン生成反応(下段)。それぞれの数字はメタン生成の基質に対応するメタン生成代謝経路を示す。今回発見したメタン生成菌(AmaM株)はメトキシ芳香族化合物のメトキシ基を脱メチル化して酢酸(正確にはアセチルCoA)を生成し、二酸化炭素還元経路と酢酸分解経路の2種類のメタン生成経路を介してメタンを生成する。このようなメタン生成機構はこれまで酢酸生成菌とメタン生成菌の共生条件でのみ起こると考えられていた。



第3図 石炭層におけるコールベッドメタンの形成メカニズム。

今回発見したメタン生成菌は、植物遺体中のリグニンが熟成されて石炭化する過程で、堆積有機物中に含まれるメトキシ芳香族化合物からメタンを生成することでコールベッドメタンの形成に寄与していることが示唆された。

(Vandenbroucke and Largeau, 2007). すなわち、石炭中のメトキシ芳香族化合物は今回発見されたメタン生成菌によってメタンに変換され得る有機物であり、コールベッドメタンの重要なソースであると推定される。実際に筆者らは、今回発見したメタン生成菌を熟成度の異なる石炭と共に培養することで、石炭中に含まれるメトキシ芳香族化合物からのメタン生成反応を観察した (Mayumi *et al.*, 2016). そしてそのメタン生成量は熟成度が低い褐炭で最も多く、このことは特に熟成初期段階において石炭中のメトキシ芳香族化合物から生成されるメタンがコールベッドメタンとして炭層に内包されることを示唆している (第3図).

5. 今後の研究展開

メトキシ芳香族化合物は植物遺体中のリグニン構成分子として陸域由来の堆積有機物中に広く存在するため、そのメタン生成反応はコールベッドメタンのみならず様々な微生物起源の天然ガス資源の形成に寄与している可能性がある。その分布や量的貢献度はいまだ未知数ではあるが、今回の発見を契機にこれまで見落とされてきたメトキシ芳香族化合物のメタン生成に関連する地下圏のメタン生成微生物

物生態研究の飛躍的な発展が期待される。

文 献

- Mayumi, D., Mochimaru, H., Tamaki, H., Yamamoto, K., Yoshioka, H., Suzuki, Y., Kamagata, Y. and Sakata, S. (2016) Methane production from coal by a single methanogen. *Science*, 354, 222–225.
- Ragsdale, S. W. and Pierce, E. (2008) Acetogenesis and the Wood-Ljungdahl pathway of CO₂ fixation. *Biochim. Biophys. Acta.*, 1784, 1873–1898.
- Strapoc, D., Mastalerz, M., Dawson, K., Macalady, J., Callaghan, A. V., Wawrik, B., Turich, C. and Ashby, M. (2011) Biogeochemistry of microbial coal-bed methane. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 39, 617–656.
- Vandenbroucke, M. and Largeau, C. (2007) Kerogen origin, evolution and structure, *Organic Geochemistry*, 38, 719–833.

MAYUMI Daisuke (2016) A novel process of biogenic methane production involved in the formation of coal-bed methane.

(受付:2016年11月21日)