

始原的な気体「メタン」と地球生命科学の眺望

海洋研究開発機構 高野 淑識

水をたたえる青い星，地球。その表面積 70%を占める海洋，さらに，その海底下では，いま何が起きているのか。まだ人類が見たことのない地球深部に，果たして，地下生命圏は存在するのか。そこに微生物による炭素循環は存在するのか。生命圏を超えた非生命圏は，どのような世界か。その大きな扉の前に立った私たちが，始原的な気体「メタン」の扉をどのようにして開けたのか。先人達による 40 年にわたる学術的背景，そして，これからの将来展望を交えて解説したい。

進んでおり，生命の共通祖先の探求 (Quest) が続いている。

対 称性のある美しい分子

メタン (CH_4) は，正四面体の美しい分子である。メタンは，最も還元的な炭素の形態で，地球化学そして宇宙化学の視点からも興味深い分子である。別名，Marsh gas (沼気ガス) とも言われる。地球の地下環境で微生物の活動に由来するメタンが生成されていることは，高等学校の化学や大学の教養課程でも触れられている。電圧値 (Volt) の単位としても知られる化学者 A. ボルタ (1745 - 1827) は，沼地で集めたガスをガラス管に捕集し，自ら作製した放電端子をガラス管内に付けて，コルク栓のフタを「ピストル」(Volta's Pistol) のように飛ばしている (図 2)。彼の理知と「童子のような遊び心」が，200 年を超えても伝わってくる。陸域で観察されるメタンは，水圏表層の沼地や湖沼に限ったことではない。陸上深部にも豊富なメタンの貯留場がある。南関東の茂原地域には，将来の「約 600 年」にわたり，高純度なメタンを地域一帯の生活圏に供給できる埋蔵量があるという (関東天然瓦斯開発株式会社の社史案内資料による)。“地球は，巨大なメタン発酵槽” (大河内，2012) なのだ。

筆者および所属する研究グループでは，一つ引っ掛かるところがあった。どうして，海底下に広がる地下圏から微生物によるメタン

生成アーキアの直接的証拠が，全く発見 (記載) されていないのだろうか？ 海底下に生息するメタン生成アーキアは，ひっそりと静かに暮らし，人知の及ばぬ世界なのだろうか？ 科学者たちが，データを可視化できないくらい極小数の存在なのだろうか？ 現在の有機地球化学者による分析技術が，そこまで追いついていないのだろうか？ 先人達の挑戦と挫折の履歴は知っていた。しかし，微生物によるメタン生成の最終酵素であるターゲット分子“補酵素 F430 (Coenzyme Factor 430)”を何と

歴 史的な第一歩

1977 年は，歴史的な年である。C. ウーズと G. フォックスにより，第 3 の生物界「アーキア (古細菌)」が提案されたのだ。原核生物界 (現在でいう，バクテリア，つまり真正細菌) と真核生物界 (ユーカリア) しかり分類されていなかった当時，さぞ大きな反響があったことだろう。今からちょうど 40 年前の New York Times 誌のアーカイブを調べてみると，“Scientists Discover a Form of Life That Predates Higher Organisms”の見出しで，C. ウーズのコメントとともに，大きく報じられ

ている (1977 年 11 月 3 日付け)。当初，アーキアとして提唱されたのは，本トピックの主テーマである，メタン生成アーキア (通称：メタン菌) だけであった。メタン生成アーキアは，通常，無酸素環境でしか存在できないことから，当時も今も，始原的な微生物と考えられている。その後，好熱菌，好塩菌といった極限環境微生物がそれと同じような性質を持っていることから，まもなくアーキアに分類された。C. ウーズらの提唱から 40 年が経ち，いまでは，アーキアは，汎世界的な存在として認識され，全地球規模の物質循環に不可欠な存在であることが理解されつつある (図 1)。最新の知見によると，われわれヒトを含む真核生物の祖先は，新たに提案されたアーキア群 (Asgard 上門) の進化と密接にリンクしているという (Zarembka-Niedzwiedzka *et al.*, 2017)。それを支持する証拠が，他の研究グループからも多数報告されている。真核生物の起源に迫る，興味深い潮流である。現在，われわれの生命進化の理解は飛躍的に

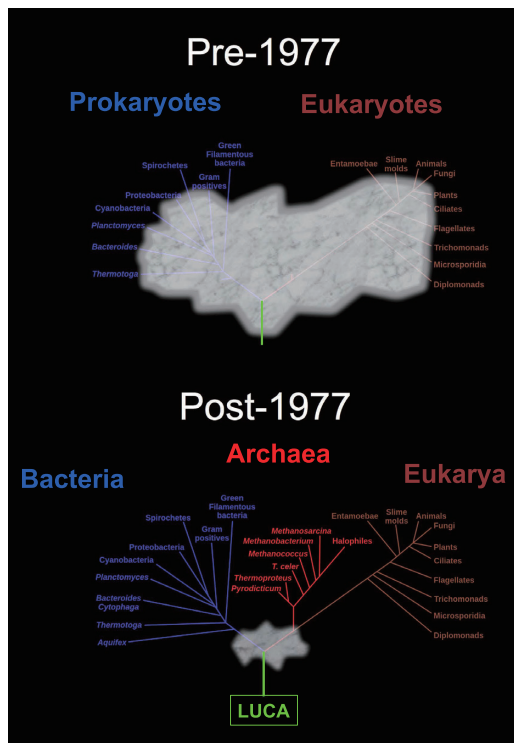


図 1 C. ウーズと G. フォックス (1977) により提案された第 3 の生物界「アーキア」。1977 年以前は，生命の進化系統樹に「雲」がかかっており，地球生命の進化について不明な点が多かったとされる。同氏による PNAS, Vol. 74, pp. 5088-5090, および，2007 年 11 月 3 日 アーキア発見記念シンポジウムでの C. ウーズらの述懐に基づいて，筆者作図。LUCA は，Last Universal Common Ancestor (共通祖先) とされる。2017 年現在，地球生命は，アーキア (Archaea: 和名で古細菌)，バクテリア (Bacteria: 真正細菌)，ユーカリア (Eukarya: 真核生物) の 3 つに分類される。LUCA は，Last Universal Common Ancestor (共通祖先) とされる。

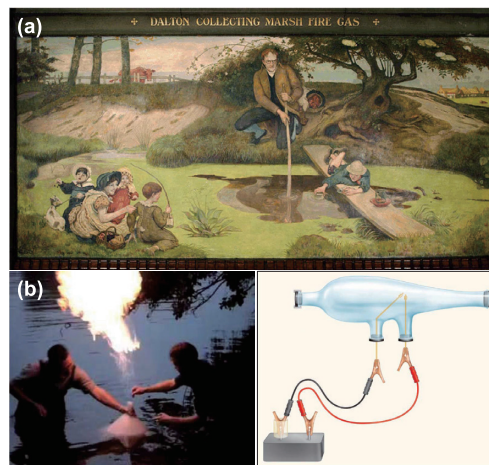


図 2 (a) 沼地の底質から沼気ガスを集める化学者 J. ダルトン (1766 - 1844)。原子や分子の質量を表す単位ダルトン (Da) は，彼の名前に由来している (写真提供：Manchester City Art Galleries)。 (b) 「ボルタの実験」でのメタンの燃焼の様子 (写真提供：Dept. Biol., York Univ.)。放電端子およびコルク栓を使った「ボルタのピストル」。(図提供：R. S. Wolfe, American Society of Microbiology)。

しても捉えたい(図3)。時折訪れる近隣の公園の池では、暖かい正午近くになると、底質からゆっくりと“泡”が出てくるのが観察できる。池のほとりで遊ぶ子供たちと「ボルタの実験」を重ねながら、悶々と静かに、次の一手を考える日々が続いた。

新しいアイデアの源泉

初秋のある日、ドイツのマールブルグを訪れた。マックス・プランク研究所を訪問するためである。メタン生成アーキア研究の先駆者 R. タウアー教授、そして嶋盛吾グループリーダーらは、筆者らが答えを見いだせない領域について、どのようなご意見をお持ちか、お二人の巨匠やグループメンバーから、率直なご意見を何としてもお聞きしたかった。私の専門分野である地球化学とは異なる、微生物学分野の巨匠から、自然に出てくる一言ひとことは、実にヒントにあふれている。幸運なことに、所内で講演をさせて頂く機会も得た。「いま、海底下で何が起きているのか。メタンを軸に、生化学的な視点で解析し、かつ、地球惑星科学的に俯瞰するのは、とてもユニークである。その実態を私たちも見てみたい。」と好意的な意見が多数寄せられた。自分の頭の中で散在したパズルが、一つひとつ結びついて、整然と配置されて行きそうな心地よさと、初秋のマールブルグの涼しい空気が記憶に残っている。アルフレッド・ウェグナー(1880-1930)を称える石盤が、パンゲア(Pangaea)の絵とともに目に留まる。かつて、マールブルグ大学で物理学の教鞭をとっていたウェグナーは、「大陸移動という考えが最初に私の頭に浮かんだのは、世界地図を見ているときだった。大西洋をはさむように、両側の形が同じであることが目に焼きついた」と述懐している。その近くには、近代微生物学の礎を築いたロバート・コッホ(1843-1910)の名前を冠した街路がある。異分野との交流、生の情報交換は、実に、新しいアイデアの源泉になる。

隠れた急所「アキレス腱」

天然物中には、機能性を持った有機分子が存在する。例えば、クロロフィルは光アンテナの機能を有し、酵素は特定の生化学反応の触媒機能を果たし、脂質は細胞の恒常性維持を担うといった具合である。一方、有機化学的な分析には、独特の見えにくい「アキレス腱」が多い。これは、有機分析に限ったことではなく、各分野にはその分野独特の急所がつきものなのだろう。要諦は、その「隠れた急所」を強靱にすることである。このプロセスを創意工夫しながら(時には楽しんで)できる人は、実験ベースの科学研究に向いている方ではないか、と常々思ってい

る。いくつかの合意の後、マックス・プランク研究所と室間比較検証(Inter-Laboratory Comparison Study)をスタートさせた。これは、地球深部掘削船「ちきゅう」で採取された同じ試料を用いて、異なる機関の、異なる分析ラインで、異なる分析者が、定性的・定量的な評価を独立して行い、分析の確度と精度が保証できるかどうかを検証することである。両者の(時には、多機関の)ベスト・エフォートが集結する瞬間は、とてもエキサイティングである。この契機により、画期的な分析の信頼性を担保でき、以降の研究を一気に加速させることとなった(Takano *et al.*, 2013)。当時、グループメンバーであった気鋭の金子 雅紀研究員(現 産業技術総合研究所 主任研究員)も加わり、本分析法は、さらなる進化を遂げ、世界で初めてとも言える良質なデータが次々として出てきた。マクロスケールで言えば、海域、陸域、そして地圏、水圏を問わず、地球上で微生物により生成されているメタン生成の「証拠」と「現場」を抑えたことになる(Kaneko *et al.*, 2014)。メタン生成アーキア1細胞当たりのF430の存在量が判明したことから、試料の性状を問わず、そこにメタン生成アーキアの菌数を推定することが可能となった。

ミクロな化学反応で言えば、ゲスト分子のメタン前駆体は、ホスト空間(活性中心部位)に進入すると、奥に控えるホスト分子F430の触媒作用を受ける(図3)。精密な「鍵と鍵穴の関係」と同じように、両者のマッチングによる反応生成物が、メタンであり、副産物の自由エネルギーをうまく利用しているのである。微生物学的メタン生成は、無酸素の環境下で行われているメタン生成アーキアに特有の始原的なエネルギー代謝なのだ。ちょうど同じ頃、共同研究者の井町 寛之 主任研究員(海洋研究開発機構)は、海底深部から採取した同試料を用いて、3年にも及ぶ実証試験の末、メタン生成アーキアの純粋培養に初めて成功した(図3)。同氏の成功は、われわれのF430分子の直接的なデータと双方向的に、強力にサポートしあえるエビデンスとなった。

濃い霧の中を手探りで歩いていたら、突然、ふっと霧が消えた。これまで見えなかったも

のが、クリアに見えるようになり、日々驚きの連続であった。海底下2 km(キロメートル)以深で、微生物によるメタン生成プロセスが起きているとは、おそらく誰も予想できなかったのではないだろうか。地球深部への科学的アクセスと海底下生命圏(Deep Biosphere)の存在限界(~2.5 km)に関する知見は、稲垣(2016)で本誌に詳述されているので、ご参照されたい(JGL, Vol. 12, No. 1, 2016)。

メタンにまつわる、もう一人の影の立役者

メタンは、温室効果ガスでもある。二酸化炭素の地球温暖化係数を「1」とすると、メタンは「25」になる。A. ミルコフらの推定によると、海底下には、~10000 Gt(ギガトン)のメタンリザーバーがある。メタンは、大気に拡散する前に酸化され、その放出が面的に防がれている。海底下におけるその主役、いわば、縁の下の力持ちは、嫌氣的メタン酸化アーキ

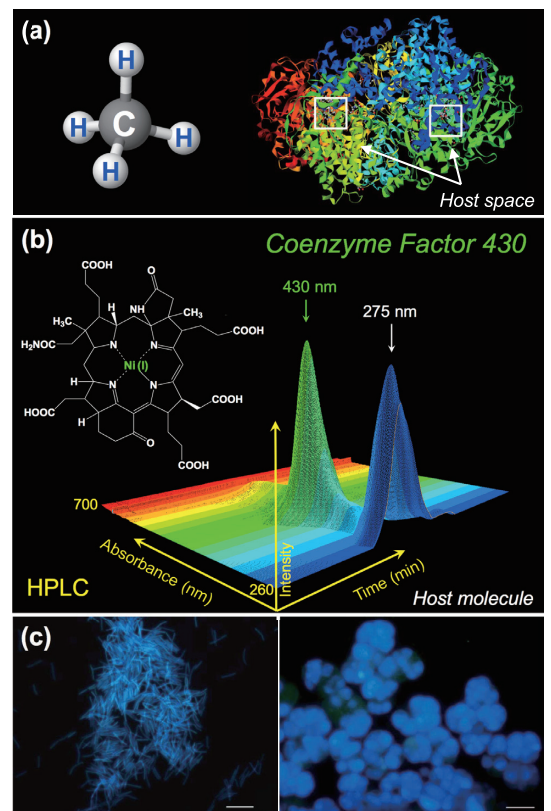


図3 (a) メタン(CH₄)と微生物学的メタン生成反応のホストスペース(活性中心部位)を有するメチルコエンザイムリダクターゼ(MCR: Methyl-coenzyme M reductase; e.g., *Methanosarcina barkeri*)の立体構造(図提供: JAMSTEC, 高野 淑識)。 (b) 微生物学的メタン生成の最終酵素である補酵素F430(Coenzyme Factor 430)の化学構造とスペクトル。化合物の名称は、430 nm(ナノメートル)に極大吸収スペクトルを有することに由来する。テトラピロール環の中心には、ニッケル(Ni)が配位する。高速液体クロマトグラフィー(HPLC)で分離したカルボキシル基をメチルエステル化する前のNative F430分子を示す(図提供: JAMSTEC, 高野 淑識)。 (c) 世界で初めて海底深部試料から培養に成功したメタン生成アーキアの蛍光顕微鏡写真。右側が、メタノサルシナ属、左側がメタノバクテリウム属。メタン生成アーキアに紫外線を当てると、酵素特有の青白い蛍光を発する。右下のスケールバーは、10マイクロメートルを示す(写真提供: JAMSTEC, 井町 寛之)。

ア (ANaerobic MEthanotroph archaea (ANME: 和称=アンメ, もしくは, エーエヌエムイー) と呼ばれるアーキアである。あくまで仮定の話であるが, もし, 微生物学的なメタン酸化プロセスが, 地球に一切存在しないとするならば, 温室効果ガスのメタンは大気中に無尽蔵に放出され, 地球気候システムの均衡を崩す要因になることは想像にかたくない。

そんな影の立役者である ANME は, 生化学的にどうやってメタンを酸化しているのか。奇しくも, W. リーバーによる嫌氣的メタン酸化プロセスの提唱から 40 年が経過するが, つかみどころの無い ANME の性状と生化学反応の仕組みは, まだよくわかっていない。その新たな扉を開ける鍵は, 既存の枠に収まらない有機化学的なアプローチがひとつ有望な一歩ではないか, と静かに東京湾を眺め

るこの頃である。

—参考文献—

Takano, Y. *et al.* (2013) *Org. Geochem.*, **58**, 137-140.

Kaneko, M. *et al.* (2014) *Anal. Chem.*, **86**, 3633-3638.

Zaremba-Niedzwiedzka, K. *et al.* (2017) *Nature*, **541**, 353-358.

■ 一般向けの関連書籍

大河内 直彦 (2012) 『地球のからくりに挑む』, 新潮新書。



著者紹介 高野 淑識 Yoshinori Takano

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 生物地球化学研究分野・主任研究員。

専門分野: 生物地球化学・有機地球化学・有機宇宙化学。有機分子レベル分析手法の技術開発や物質科学的な応用研究を軸に, 有機地球化学および有機宇宙化学に関する研究を行なっている。

略歴: 筑波大学第一学群自然科学類 化学専攻 卒業, 横浜国立大学大学院工学研究院 物質工学専攻 博士課程修了。博士(工学)。産業技術総合研究所 海洋資源環境研究部門, 北海道大学大学院理学研究院 自然史科学部門, 海洋研究開発機構 海洋・極限環境生物圏領域などを経て, 現職。

TOPICS

火山研究人材育成コンソーシアム

東北大学 大学院理学研究科 西村 太志

2016 年 10 月より始まった火山研究人材育成コンソーシアム構築事業では, 現在 11 大学と 4 つの研究機関がコンソーシアムを組んで, 多様な火山現象への理解を深め, 広範な知識と高度な技能をもって火山研究を進めるとともに, 研究成果を社会へ還元し, 噴火災害の軽減に貢献することのできる人材を育成することを目指している。2014 年御嶽山の火山災害を契機に構想されたこの事業が提供する, 修士課程大学院生を主対象とした火山研究人材の育成プログラムを紹介する。

経緯

多くの犠牲者が出た平成 26 年御嶽山の噴火を契機として, 平成 27 年 7 月に活動火山対策特別措置法(昭和 48 年法律第 61 号)が改正され, 火山防災協議会への火山専門家の参画が必須となった。そのため, 社会防衛的な知識を身に付けた火山研究人材の供給が必要とされている。また, 高度化した社会に対応できるように, 火山活動の評価と推移予測の信頼性を高める必要があることから, 「観測・予測・対策」の一体的な火山研究を推進できるよう, 従前の観測研究に加え, 他分野との連携・融合のもと, 広範な知識と高度な技能を有する火山研究者の育成と確保が必要とされている。

しかし, 文科省によれば, 観測を基盤として火山噴火現象の解明や噴火予測研究を実施している研究者は現在 80 人程度とされる。このうち火山観測をベースに研究する大学教員 50 名弱のうち, 40 歳以上が 8 割, 50 歳代以上が 5 割を占める。火山活動の評価には

多分野の専門知識が必要となることを考えると, 研究者総数は明らかに少なく, かつ, 10 年後には火山噴火予測研究に携わる研究者が急減する可能性があり, このままではわが国の火山研究および火山防災そのものが立ち行かなくなる恐れがある。

これらの課題に応えるには, 周辺学問分野の研究者にあらたに火山研究に参画してもらうことが短期的にはひとつの方策である。中長期的には, 大学院生を火山研究者や火山専門家として養成することも必要である。2016 年に文部科学省委託事業として始まった「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト」は我が国の火山研究コミュニティが総力を挙げて取り組む 10 年プロジェクトである。「火山研究人材育成コンソーシアム構築事業」は, そのプロジェクトの重要な柱であり, 「次世代火山研究者育成プログラム」として 2016 年 10 月から開始された。

コンソーシアムの構築

本プログラムでは, 11 大学(東北大, 北大, 山形大, 東大, 東工大, 名大, 京大, 九大, 鹿児島大, 神戸大, 信州大)と 4 研究機関(防災科研, 産総研, 気象研, 地理院)がコンソーシアムを組んでいる(今後, 新たな大学や自治体等を追加予定)。各大学には火山研究を主とする教員が所属していても, 限られた一部の分野を専門とする教員しか在籍していない場合が多く, 本コンソーシアムで大学や研究機関が連携することにより, 主要 3 分野(地球物理学, 地質・岩石学, 地球化学)をはじめとする広い範囲にわたる火山学の基礎知識と専門性を養える講義の提供が可能となった。また, コンソーシアムに参加する教員・研究者が研究対象としているフィールドを活用し, 多くの大学院生が国内の多様な活火山の現場を学べる機会も提供できる。

近年, 火山学は災害科学の一部であることをより意識して研究を進める気運があるものの, 大学院生には, 社会からの要請とそれに対応する研究者が見えない状況であった。そこで, 実際の火山地域で行われている防災行政の状況や災害対応活動を学べるように, 複数の地方自治体によるインターンシップや講師派遣の提供が今年度末から始まる予定である。そのほか, 最新の技術や研究成果を