



温泉を科学する「生命の起源としての温泉」

杉 森 賢 司¹⁾

(平成 28 年 11 月 29 日受付, 平成 28 年 12 月 2 日受理)

Scientific Research for Hot Spring “Life was begun in hot spring water”

Kenji SUGIMORI¹⁾

1. はじめに

日本人にとって入浴は日常不可欠であり、現在ではどこの家庭にも「浴槽」を備えた「浴室」がある。世界的にみても「風呂」好きといわれている要因には日本独自の文化とまで言われている「温泉入浴」があり、それは水で身体を清めるといった神道での「禊ぎ」や仏教での「沐浴や業」などの宗教儀式にも由来していると考えられている。入浴にはこのような宗教的要素も加わり、日常何気なく行っている「風呂に入る行為」についても実はその経緯を辿れば深い意味がある。

また、環太平洋の火山帯やプレートが沈み込む所に位置する日本列島は地殻や火山等が関与する自然災害が多発するが、その反面、自然の恵みが豊富なのも事実である。その自然の恵みのひとつに「温泉」があり、我が国の源泉数や泉質の種類は世界に類を見ないほど多く、これも「風呂好き」を表す要因のひとつとなったのではないかと考える。温泉は多くの地球内部の情報（地球が作られた時に集められた物質等）が熱水に溶け、地球内部でエネルギーを得た熱水が湧出する現象を指し、その種類は温泉が湧出している地域や条件によって様々で、多種多様な泉質をもった温泉が点在するのも日本独特とされている。また、温泉の成分やその変化等により地球内部の情報を知る事が出来ることから、温泉や湧水が多くの地球科学者の研究対象とされているのも事実である。当講演に続く野上氏、鈴木氏の講演内容にも様々な温泉の情報が生かされている。何気なく、日常利用している温泉だが、地球科学的に考えるとこの様に奥深いものがある。

約 40 億年前に生命が誕生したとされている。約 50 億年前に原始地球は多くの天体衝突により次第に大きく成長しながら誕生したと考えられ、その後、様々な要因が重なり冷えはじめた地球表面に「水」というものが存在できるようになったが、それは熱水環境であり今とは全くといって異

¹⁾ 東邦大学医学部生物学研究室 〒143-8540 東京都大田区大森西 5-21-16. ¹⁾ Department of Biology, Toho University Faculty of Medicine, 5-21-16, Oomori-nishi, Oota-ku, Tokyo, 143-8540

なった世界であったと推測できる。この様な原始地球に約 40 億年前に生命が誕生したとされているが、生命が誕生したのはどのような環境であったか？という問いかけに対し、有力であるのは「現在の海底熱水噴出口付近だ」という説である。つまり、「海底の温泉」が生命の誕生と密接な関係があるという事で、生命の起源として温泉（熱水）と生命体の関わりについて、我々が計り知れないところの能力を持ったミクロの世界を紹介する。

2. 生命が生息する環境と好熱性微生物

我々が暮らす環境はマイナス数十度から砂漠や熱帯の 40℃～50℃といった地球上のあらゆる環境に対応しており、そのために人は少しでも快適な状態に近づけるため、衣服や居住空間等の生活環境を調節しながら生活している。また、ヒトの体温は 36℃前後の一定に保つように調節されており、これを「恒常性の維持」とよび、それは身体の働きを円滑に保つ為に必要な基本的な働きを指す。また、日本人が入浴する場合、個人差があるにせよその適切な温度は概ね 39～41℃前後だが、湯の温度が 1℃違うと相当な温度差となって感じられる。

我々の周りに生息している生命体の生息温度域については、Brock (1978) 著の “Thermophilic Microorganisms and Life at High Temperature” を参照¹⁾すると、地球上にて生息する生命体がどのくらいの温度まで生育可能かといった報告がなされている (Table 1; Brock 著作より引用)。これによると微生物は真核生物 (核膜を持っている生命体) であっても 50℃という比較的高温域まで生息が可能で、原核生物 (いわゆるバクテリア等の単細胞生命体で、核膜が無い生物) にいたっては 90℃以上での生育が可能であることがわかる。実際に 100℃近い熱水環境においても生命体の生息が確認されており、箱根大涌谷噴気地帯 (100℃近い温度の熱水で pH1) の熱水から好酸好熱性菌の *Sulfolobus* (現在は *Metallosphaera*) *hakonensis* が新種として報告された (杉森; 2010, Photo 1; 右端のスケールは 5μm)²⁻⁵⁾。また、源泉が湧出し、温泉 (熱水) の自然な流れが形成されている場所には緑色の生命体の集団 (生命体が形成するマットと呼ばれている) が観察され、それを顕微鏡下で観察すると、様々な形態の藻類が確認できる²⁻⁴⁾。実際、群馬県の湯ノ小屋温泉の源泉があふれ出し排水されている 63℃の熱水にも緑色のマットが観察 (Photo 2 の→) され、そこでは数種のシアノバクテリア (らん藻) が確認されている⁴⁾。また、湯河原温泉の源泉が湯溜まりからあふれ出ている所や温泉街の至る所にある飲泉場においては高温の湯にもかかわらず緑色のマットが観察され、これを研究室に持ち帰り人工培地 (MDM 培地) を用い 52℃で培養したと

Table 1 各生物種における生育可能最高温度

生物種	生育可能最高温度 (℃)
真核生物	
動物：魚類および水生脊椎動物	38
昆虫	45 - 50
甲殻類	49 - 50
植物：維管束植物	45
コケ類	50
微生物：原生動物	56
藻類	55 - 60
真菌類	60 - 62
原核生物	
シアノバクテリア	70 - 73
光合成細菌	70 - 73
従属栄養細菌	>90
独立栄養細菌	>90

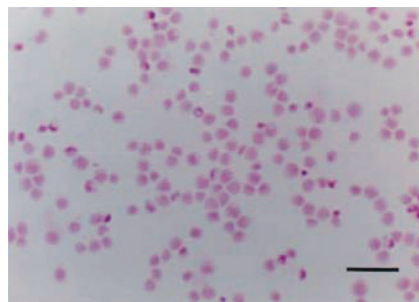


Photo 1 箱根大涌谷熱水の好熱性細菌

ころ、地球において最初に酸素を発生させたと考えられている好熱性の *Synechococcus* sp. というらん藻が確認された (Photo 3 はその顕微鏡写真で右下のスケールは 10 μ m).

1996年1月2日のロシア・カムチャツカ半島に位置するカリムスキー火山 (1,486 m) の大噴火に伴い、そこから 5 km 離れたカリムスキー湖においても湖底噴火があった。噴火から 1 年 7 ヶ月後に行った現地調査により、その火山活動により湧出した新たな熱水の流れについて興味ある知見が得られた。その流れに沿って緑色のマットと茶色のマットが観察され、緑色マットの熱水の温度は 58 $^{\circ}$ C、茶色マットの熱水の温度は 60 $^{\circ}$ C であった。それらの試料を持ち帰り、顕微鏡観察を行ったところ、緑色のマットは *Phormidium* sp. というらん藻で、ほぼ単一の藻類で構成されていた。また、茶色のマットの主たる藻類は *Anabaena* sp. で、次いで *Synechococcus* sp. や *Phormidium* sp. 等も多数観察された。この様にわずか 2 $^{\circ}$ C の違いで、あたかもそこに線を引いたかのように生物種がはっきりと棲み分けしているのが観察された⁶⁾。また、熱水の流れの湿潤な岸に 57 $^{\circ}$ C の所があり、ここでも同様の緑色マットが観察されたが、顕微鏡観察によってそのマットを構成している藻類についてみると、前述の緑色マットを構成しているらん藻とは異なる種により構成されていた⁶⁾。

海底の温泉に着目すると、深海の熱水噴出口においては 300 $^{\circ}$ C 以上の熱水が噴出している場所があり、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) のチームによる調査が行われている⁷⁾。その調査でインド洋中央海嶺の深海熱水環境 (水深 2,450 m, 360 $^{\circ}$ C) の試料を採取し、それを高圧環境が保持できる特殊な培養装置内で培養したところ、122 $^{\circ}$ C もの高温で微生物の増殖が確認された (Takai *et al.*; 2008)⁸⁾。この 122 $^{\circ}$ C もの高温で増殖する細菌や先に示した、箱根大涌谷の熱水から分離された好酸好熱菌は大腸菌や乳酸菌等の一般の細菌とは異なる性状を持ち、特に遺伝子解析 (16S rRNA に関する系統的解析等) により、遺伝学的に我々の細胞に近い要素を持っている事がわかっている。この様な特殊な性状を持った微生物群は第三の生物群として「アーキア (Archaea)」と総称されており、それは生命進化と密接な関係を持つ「特殊な細菌」である^{9,10)}。また、アーキアには様々な種類があり、好熱菌の他、メタン生成細菌や高濃度の塩環境に生息する好塩菌等がそれに属している。また、それらの生体膜を構成している特殊な脂質についての研究や代謝についても研究されている¹⁰⁾。

3. 我々の細胞の原点とされる特殊環境に生息する微生物

この様な「特殊な環境にて生息している微生物」をはじめとした熱水環境の生命に関する講義をした後によく耳にする事は「どうして好熱性の生物は熱いところをわざわざ好んで生活しているの



Photo 2 熱水中のらん藻マット



Photo 3 細長いソーセージ様のシネココッカス

か？」という質問だ。だが、逆の発想として考えてみると、本来地球が出来て少し安定し始めた頃はまだまだ地球は熱環境であったという事である。この様な環境で、様々な物質から生命が出来てきたと考えられているが、生命が出来る以前にも単純な物質が生体を構成する物質へと進化した事があった。これを化学進化と呼び、様々な実験で確かめられている。高等学校の生物の教科書にも掲載されている「ミラーの実験」はその中でも有名な実験で、その他オパーリンの「コアセルベート説」¹¹⁾や柳川氏の実験(柳川;1995)がある¹²⁾。柳川氏の実験とは海底熱水噴出口付近の熱水を材料として用い、それを様々な条件下で加熱加圧したところ、われわれのタンパク質を構成しているアミノ酸が合成されたということである。さらに、これらアミノ酸をある条件下で加熱したところ、アミノ酸が長くつながったポリペプチドや中空の微小球(φ1.5~2.5 ミクロン)が出来る事がわかった。これらの事から、生命誕生のシナリオは海底熱水噴出口といった海底温泉の高温高压環境下において生命の材料が合成され、その後、原始生命の誕生へとつながったのではないかとといった説が現在では有力視されている¹³⁾。さらに、その様な環境下で生息する特殊な性状を持った微生物が発見された事からも、生命誕生と海底の温泉は益々密接な関係があるのではと考えられるようになった。また、先に述べたように特殊な環境に生息している生命体は真核生物に近い遺伝的性状を有し、真核細胞が出来た過程において、ある細胞(生命体)に別の細胞(生命体)が入り込む(寄生や共生)事によって誕生したのではないかと考えられている。他の生命体が進入していった先のホストとなった細胞がアーキアであったと考えられる。この真核細胞が誕生する一連のシナリオは細胞共生説とよばれている¹⁴⁻¹⁶⁾。

4. 生命進化

生命とは①外界と区切られた入れ物がある②子孫を残す③代謝(エネルギーを生産)する④進化する(生命の連続性)といった4つの原則を満たしたものを指し、この様な生命が誕生したのが今から約40億年前とされている。それは遺伝情報を担う核酸を膜で包んだ様な単純な生命体が最初で、その後30億年もの長い年月を経て多細胞生物へと進化したと考えられている。それが、今から10億年前の出来事だ。この様な生命進化が多く時間をかけて原始の地球で行われていたのだが、約25万年前に誕生した我々の祖先のヒト(ホモ・サピエンス)と比較すると、単細胞が30億年もの間試行錯誤を繰り返して進化しながら生活していたのだから、我々ヒトの歴史がいかに短いもので、微生物の進化がとても気の遠くなるような長い道のりであったと想像する。

5. 温泉およびその周囲は生命にとってとても棲みやすい場所

高温の特殊な環境に着目し温泉と生命の関係を論じてきたが、生命体にとっても温泉は四季を通じ環境変化の少ない場所で、年間を通し大変棲みやすい場所である事がわかっている。一例として、オンセンアブ(*Stratiomyia japonica*)の幼虫は温泉で過ごす事が確認されており、一般の淡水にくらべ温度が高い(約32℃)温泉に生息する種の幼虫は成長が早い事が観察されている。また、温泉の湯溜まりの縁や温泉に生息する藻類の上に群れをなしているオンセンバエ(*Scatella calida*)については四季を通じて生殖活動を行っていることが判明している^{2,17)}。

さらにみてみると、一般の生命体が生育できないような酸性土壌環境や硫黄を含むガスに暴露されているような場所を好んで生育する一群の植物がある。酸性硫黄泉(pH3前後)やその湿地に好んで生育しているチャツボミゴケ(*Jungermannia vulcanicola*;別名マリゴケ)は群馬県中之条町六合(くに)地区の穴地獄(かつて鉄鉱石の露天掘りをしていた跡地)に鮮やかな緑色のジュー

タンを敷き詰めたように自生している。この植物は重金属を体内に取り込み蓄積する性質がある事がわかっている。また、地衣類に属するイオウゴケ (*Cladonia vulcani*; 別名ユオウゴケ) は硫黄地帯を好んで生息場所としている。箱根大涌谷の噴気地帯から神山に登る登山道付近で観察することができるイオウゴケはその葉体が緑がかった灰色で、吹きつけ塗装をしたかのような表面をしており、枝がでてくるかのごとく観察される子柄の先には真っ赤な唇のような子器 (胞子が蓄えられている) が見られるのが特徴である。これらの植物は総称して硫黄孔荒原植生植物とよばれている。他の植物と競争する事がなく独自の植生を構成している²⁾。

6. ま と め

我々の周囲には様々な特殊環境が存在する。この様な一見生命体の生息が考えられない環境にもその環境を上手く利用した様々な生命体が生息し、独自の生態系を営んでいる。特に、この様な特殊な環境に生息する微生物にはそれぞれ特有の性状があり、様々な分野でそれらが有する耐熱性の酵素等の特殊性が利用されている。我々の知らないところでこれら微生物の持っている特殊性について生活に密接している分野での応用、活用がなされているので、これら微生物に関しては非常に身近な存在であると認識する必要がある。一方、遺伝子の有効的利用等が話題になっているが、この様な特殊環境に生息する微生物の遺伝子には先に述べたとおりの“特殊性”が潜んでおりその探索も盛んである (佐藤ら; 2013⁸⁾, Sato *et al.*; 2013⁹⁾)。この様な事からも温泉は生物資源が豊富に存在する宝箱だと考える。

引用文献

- 1) Brock TD : Thermophilic Microorganisms and Life at High Temperature. Springer-Verlag, 465 p, 1978
- 2) 杉森賢司 : 温泉・熱水・噴気と生命. 温泉科学, **60** ; 177-194, 2010
- 3) 杉森賢司 : 温泉の生物学—特殊環境に生息する藻類と細菌類—. 温泉科学, **44** ; 159-182, 1994
- 4) 杉森賢司 : 生命の起源に触れる温泉観察に出かけよう ! . 自然保護, **536** ; 4-5, 2013
- 5) Takayanagi S, *et al.* : *Sulfolobus hakonensis* sp. nov., a Novel Species of Achidothermophilic Archaeon. Int. J. Syst. Bacteriol., **46** ; 377-382, 1996
- 6) 杉森賢司 他 : カムチャッカ・カリムスキー火山噴火に伴う熱水の微生物学的研究. 温泉科学, **50** ; 21-33, 2000
- 7) 稲垣史生 : 海底下の生命圏フロンティアと生命生息限界に挑む. JGL, **12** ; 8-10, 2016
- 8) Takai K, *et al.* : Cell Proliferation at 122°C and Isotopically Heavy CH₄ Production by a Hyperthermophilic Methanogen under High-Pressure Cultivation., PNAS, **105** : 10949-10954, 2008
- 9) 毎日新聞 2013年1月29日号 23面記事
- 10) 古賀洋介 : 古細菌. 149 p, (UP BIOLOGY) 東京大学出版, 1988
- 11) Опарин А И (石本 真 訳) : 生命 — その本質, 起原, 発展 —, 221 p, 岩波書店, 1974
- 12) 柳川弘志 : 熱水環境と生命の起源. 温泉科学, **45** ; 168-172, 1995
- 13) 大島泰郎 : 生命は熱水から始まった. 141 p, (Science in Action Series 24) 東京化学同人, 1995
- 14) Margulis L : Origin of Eukaryotic Cells., 349 p, Yale University Press, 1970
- 15) Margulis L (永井 進 訳) : 細胞の共生進化 [上] 第2版, 199 p, 学会出版センター, 2002

- 16) Margulis L (永井 進 訳) : 細胞の共生進化 [下] 第 2 版, 512 p, 学会出版センター, 2004
- 17) 伊東祐一 : 温泉生物, 84 p, (科学の泉 11) 創元社, 1944
- 18) 佐藤智子 他 : 鹿児島県霧島地域の酸性硫黄源泉における細菌群集構造の解析. 温泉科学, **63** : 100-117, 2013
- 19) Sato T, *et al.* : Archaeal Community Structures in the Solfataric Acidic Hot Springs with Different Temperatures and Elemental Composition. Hindawi Publishing Corporation, Archaea Volume 2013, Article ID 723871, 11 pages, 2013