

地球最後のフロンティア 地殻内に存在する微生物たち

生命起源の解明や新しい微生物資源の提供など 大きな期待がかかる地殻内微生物圏研究



取材協力：
高井 研 グループリーダー
極限環境生物フロンティア研究システム
地殻内微生物研究領域

今日までの陸上および深海掘削の成果から、かつて無生物の世界と考えられてきた陸域や海底下の地殻内にも、微生物が存在することが明らかになってきた。さらに、こうした地殻内微生物圏が地球全体の生物存在量の半分以上を占める巨大な生物圏であるともいわれている。また、高温・高圧など地殻内の極限環境に存在する未知の生物圏には、私たちの想像をはるかに超える多様な微生物がいる可能性が高いと考えられている。21世紀の新しい研究領域として注目される地殻内微生物圏とはいったいどのような世界なのか、そして、光や酸素、栄養分、水分などが極端に少ないことも予想される地殻内で、微生物たちはどのように存在しているのだろうか。OD21計画（深海掘削）の推進に伴って、生命の起源の解明や新たな微生物資源の発見も期待されている地殻内微生物圏について紹介する。

地殻内は 地球最大の生物圏!?

歴史的に見ると、地殻内微生物の研究は比較的早く始まっている。1926年、米国の油田の深部(150~600m)で採取された地下水から培養された硫酸還元菌についての報告、これが地殻内微生物に関する最初の研究といわれている。数年後には、ロシア人研究者が炭化水素を多く含む岩石のなかから培養した微生物について報告している。

こうした研究によって、地下の奥深くにも微生物が存在する可能性があることが示された。しかし、当時の研究環境では、それらが地表からもたらされた可能性も否定できず、本当のところはよく分からなかったようだ。それからおよそ半世紀後、大量消費時代を迎えた米国で地下水の水質汚染が問題となるなか、地下水に存在する微生物に関する研究が進められた。地下の微生物が、汚染された地下水の浄化に、何らかの関わりがあるのではないかと考えた研究だった。このころになると、サンプリングの技術も進み、表層の微生物の影響も抑えられ、多様な微生物が地下環境に生育していることが明らかになった。さらに時代

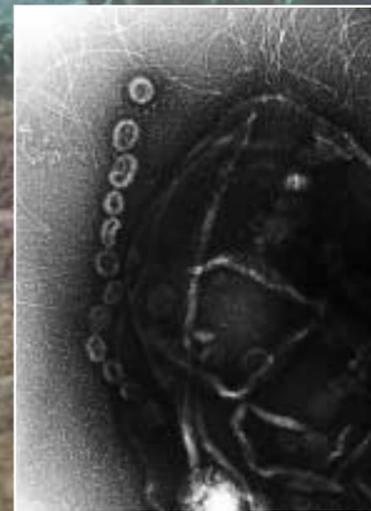
が進むと、ODP(国際深海掘削計画)に微生物学者が参加するなど、海底地殻内微生物研究への本格的な取り組みも行われるようになった。

こうした研究成果をもとに、1998年、米国の研究者らによって、地球全体に地殻内微生物圏があるとしたら、どのくらいの量の微生物が存在しているのかが試算された。

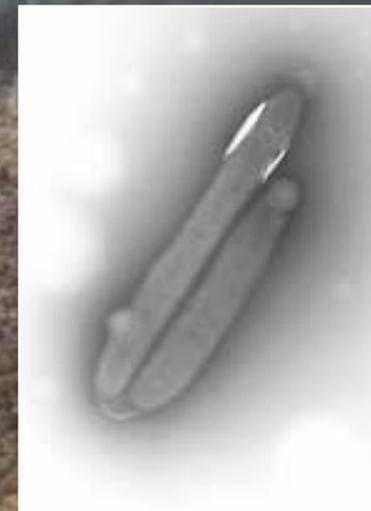
その数字は、驚くべきものだった。全地球の潜在微生物量の90%以上が、陸域および海底下の地殻内微生物圏に存在し、陸域や海域などよりもはるかに大きな生物圏が地殻内にあるというのだ。ただし、この試算は存在する炭素量によって算出されているため、地殻内で活動している微生物だけでなく、活動をとめていたり、すでに死んでいる微生物や分子化石も含まれており、すべてがアクティブな生物圏であるとはいえないことが分かっている。つまり、生物量(潜在量)としては地球最大の生物圏と考えられるが、活動量(生物生産量)はかなり低いのではないかと推測されている。こうした地下の微生物圏は、いったいどれくらいの深さまで存在しているのだろうか。陸域の研究では、南アフリカの金鉱で地

下3,200mの先カンブリア紀の地層から微生物が分離されている。現在のところ、これが実際に見つかった最も深い場所だが、さらに深いところにも存在するだろうといわれている。海底下では、深さ1,000mほどまでしか微生物は見つかっていない。だが、それはまだその程度までしか調査が行われていないということで、現在、海洋科学技術センターによって建造が進められている地球深部探査船「ちきゅう」で深海掘削が行われるようになれば、最深の記録が更新されるのは間違いないと考えられている。

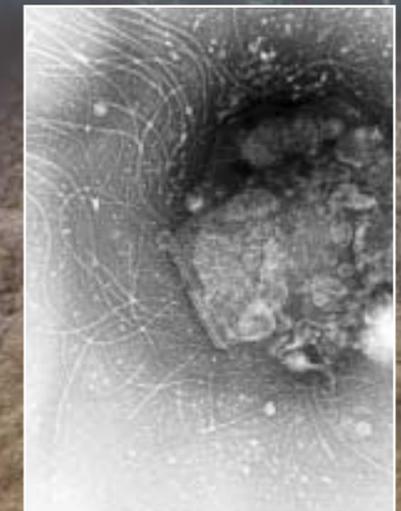
ところで、地殻内微生物圏は巨大ではあっても、やはり活動量の低い“死の世界”なのだろうか。もちろん、長期間安定した条件のもとで形成される海底堆積物のように、活性の低い場所もある。だが、逆に非常に活動的な地殻内微生物群集が存在する場所も見つかっている。それは、活動的な地殻内環境といわれる場所、たとえば、海底では海洋プレートが生まれる中央海嶺や、プレートがマントルへと沈んでいく沈み込み帯などのプレート境界域、火山活動を繰り返すホットスポット、そして、石油やメタンハイドレート、重金属などが不均一に分布するような場所



インド洋の熱水活動域の地下に存在すると考えられるハイパースライムを支える超好熱メタン菌メタノトリスフォルミシカム(命名者 高井研)



沖縄トラフ伊平屋北部の熱水活動域から分離された好熱性発酵菌サーモシホジャポニカス(命名者 高井研)



伊豆小笠原弧明神海丘の熱水活動域から分離された原始的代謝を行う菌ピラエオユッカスフェロフィラス(命名者 高井研)

特集 海洋底から見えてくる地球のしくみ

だ。こうした場所は、ダイナミックな地球内部活動が見られ、その動きに伴って物質循環が盛んにおきている。そして、活動的な地殻内微生物もそこに存在しているとされる。

現在、海洋科学技術センターの極限環境生物フロンティア研究システム・地殻内微生物研究領域が注目しているのは、深海底の熱水噴出孔の下だ。熱水噴出孔は、海底の断層や岩石の割れ目からしみ込んだ海水が、地下で地球内部エネルギーによって熱せられ、それが海底から噴出するもので、湧き出した熱水には硫黄やメタンをはじめ重金属類なども含まれている。熱水孔に関しては、1980年代後半から熱水孔下微生物圏の存在が指摘されていた。そして、「熱水噴出孔環境の下に活動的な微生物生態系が存在する」という概念が提唱されたのは1993年だった。これは、熱水孔環境の有機物の分布から、その多くがすでに噴出する熱水に含まれていたことを示し、熱水孔の下に広がっている微生物群集が生成した有機物が、熱水によって運ばれてきたのではないかと推察している。また、一方では海底火山の噴火に伴って海水中に超好熱菌が大量に放出されることについ

て、その多くが熱水活動の地下に存在する微生物圏に由来する可能性が高いとする報告もある。こうしたことから、熱水域の海底下には大規模な超好熱菌ストックが存在していると考えられている。また、同研究領域では、プレート沈み込み断層



高井研グループリーダー

帯にも注目している。ここも、堆積物の高温高压変性や間隙水の遊離に伴って、水・物質・エネルギーが激しい変動を示す、極めて活動的な場所だからだ。

地殻内微生物研究から地球の歴史を探る

もう一方の地殻内微生物の活性が低い場所は、確かに生きて微生物やその多

様性を発見する上では魅力的とはいえないかもしれない。だが、別の意味で、海底堆積物などの活性の低い海底下は非常に興味深い研究ターゲットになっている。

海底下の地殻内は、46億年の地球の歴史を様々な形で記録している場所だ。だが、ここで微生物が盛んに活動を行ってしまうと、記録は乱されてしまう。逆に、そこが微生物の死の世界であれば、約40億年間の生命の歴史が保存されている可能性がある。たとえば微生物が死んでも、そこには分子、DNAレベルの記録が残る。それらを分析することによって、かつてどんな微生物が、どのような環境に適応しながら生きていたのかが分かる。これまで行われてきた地質学的なアプローチだけでなく、微生物学的に地球の歴史を解明するためのアプローチが可能なのだ。

地球の歴史を解明する上で、もうひとつ注目すべき点は、地殻内微生物圏が地球上に酸素のなかった時代、つまり約27億年以前の環境に非常に近いということだ。地殻内微生物圏は、光合成によって酸素が生まれる前の地球でおきたであろう生命の進化を、そのままの形でアクティブに残している環境ということが

できる。特に、熱水孔の下に存在する地殻内微生物圏は、生命の発生と進化を理解する上で、非常に興味深い領域といわれている。なぜなら、そこには地球内部エネルギーのみに依存した「地球を食べる微生物」の生態系が存在する可能性が高いからだ。

熱水噴出孔周辺の海底では、すでに化学合成細菌や光合成生態系と異なる化学合成生態系が知られており、ここに初期生命の姿が残されているとする説もある。だが、厳密に言えば、これは正しくない。熱水孔周辺には十分な酸素が存在しているからだ。酸化還元が行われる熱水噴出孔周辺は、非常にエネルギーを採りやすい環境であり、非常にダイナミックな生物活動が行われている。だが、それは酸素のない太古の地球の環境とは違う世界だ。では、その熱水孔の下はどうだろう。海底地殻内に地球内部エネルギーが供給され、なおかつ酸素が入り込めない環境があるのではないか。こうしたことから熱水孔下地殻内微生物圏には高い関心が寄せられてきた。

陸域における「地球を食べる微生物」の生態系については、1995年、米国の研究者らによってその存在が報告され

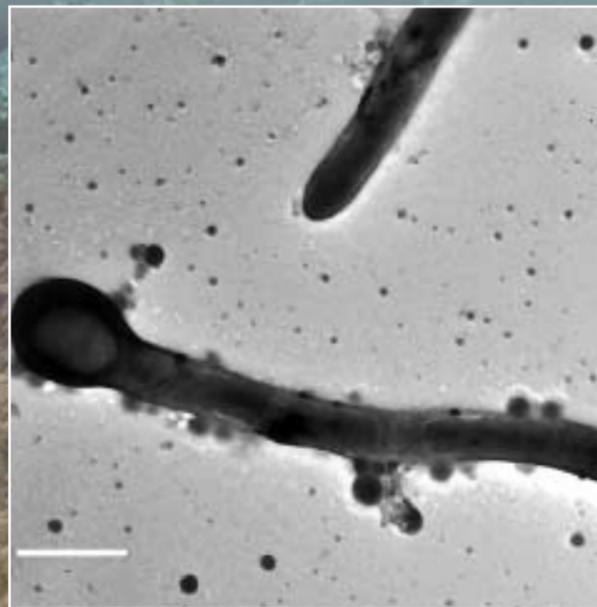
ている。彼らは、コロンビア川玄武岩帯深部地下水に光合成に由来する有機炭素が非常に少ないにもかかわらず、多くの微生物が存在し、その優先種は水素と二酸化炭素のみをエネルギー源および炭素源とするメタン菌と酢酸菌であることを発見した。そして、これらの微生物群集が光合成にまったく依存しないスライム(SLiME:地殻内化学合成独立栄養性微生物生態系)を形成していると提唱したのだ。

そしていま、深海底下にも同じように「地球を食べる微生物」の生態系が存在することが、海洋科学技術センターの極限環境生物フロンティア研究システム・地殻内微生物研究領域の研究者らによって明らかにされようとしている。現在、論文投稿中のため、詳しい内容は紹介できないが、インド洋中央海嶺で発見された熱水活動域の微生物群集構造の解析を行ったところ、海底下環境から熱水によって超好熱メタン菌と超好熱発酵菌が生きた状態で運ばれていたことが明らかになった。さらに、熱水成分の解析から、海底下でメタン菌によるメタン生成が行われていることを示す成果も得られたのだ。これにより、熱水孔下環

境に、地球内部エネルギー(化学物質としては水素・メタン・硫化水素・一酸化炭素・二酸化炭素)のみに依存する「地球を食べる微生物」を一次生産者とする超好熱性地殻内化学合成独立栄養性微生物生態系(Hyper-SLiME)が存在する可能性が高いと考えられている。

このハイパスライム説では、超好熱性のメタン菌が水素と二酸化炭素からメタンをつくり、そのときに生まれるエネルギーで有機物をつくる。一方でその有機物を利用して、超好熱性の発酵菌がそれを再び水素と二酸化炭素に還元する。こうして循環の輪がつけられ、持続性のあるコミュニティが成立すると考える。こうしたエコシステムの存在が証明されれば、原始地球の生命進化の過程を理解する大きな手がかりが得られるはずだ。

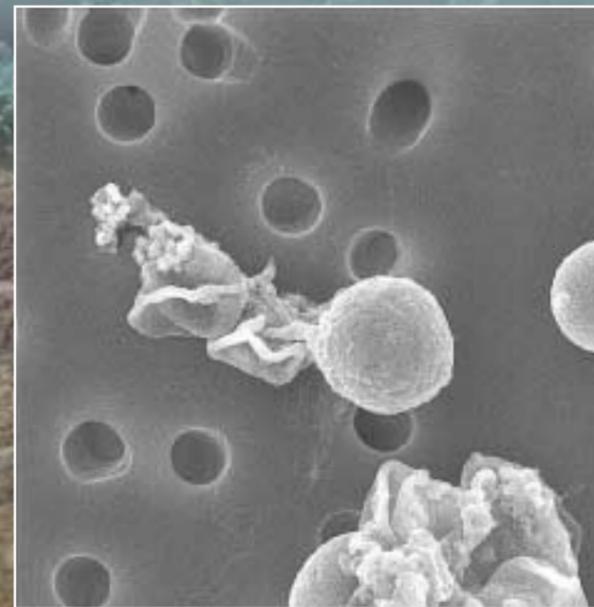
地殻内生物圏は、現在の活動的な微生物群集が存在する場所であるとともに、40億年におよぶ地球と生命の共進化の過程を克明に保存する場所でもある。地殻内微生物圏の研究は、地球とその進化を明らかにするための重要なカギを握っているのだ。



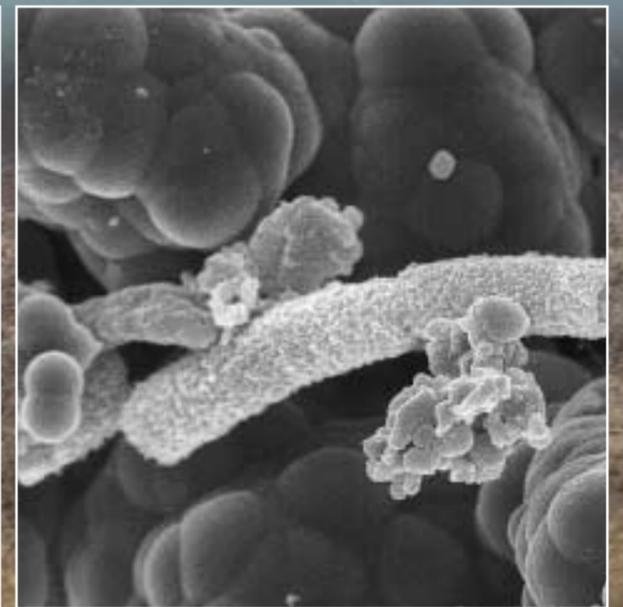
南アフリカ金鉱の地下3,200mの深さから分離されたアルカリフィラストランスパーレンシス。地球で最も強アルカリ性で生きられる。そして、最も深いところから分離された地殻内微生物



ハイパスライムを支える超好熱水素酸化硫黄還元菌バルネアリウムリソトロファム



ハイパスライムを支える超好熱メタン菌メタノカルドクカス。360°C以上の高温でも生存していた



同じくハイパスライムを支える超好熱メタン菌メタノバイラス