

ライザー深海掘削による地下独立栄養微小生物生態系 SLiMes (Subsurface Lithoautotrophic Microbial Ecosystems) の研究 —環境の創成と微生物進化—[†]

北里 洋^{††}

ここ 10 年来、1000 m を超える地下の岩石や地層の空隙に多くの微生物が生息していることが知られるようになってきた。これらの微小生物は地下独立栄養微小生物生態系 (SLiMes: Subsurface Lithoautotrophic Microbial Ecosystems) と呼ばれている。これらの生物は、高温・高圧・限られた栄養と空間といった極限環境条件下で生息していることが興味深い。もっと重要なことは、これらの生物は岩石や地層が形成されて以来、岩石中の空隙に閉じこめられているらしいということである。

SLiMes は主にバクテリアとウィルスから構成されている。最近、好熱菌、メタン生成菌、発酵菌、嫌気性菌、硫酸還元菌などの細菌類が地殻深部から報告されており、これらのバクテリアは高温あるいは無酸素の極限環境に適応している。バクテリアに伴ってウィルスがいる可能性も高い。また、地下浅部には、原始的な真核単細胞生物がいる可能性がある。実際、ロシアのカラクム砂漠の地下の塩水中には有孔虫が生息していることが知られている。

地下微小生物はどこに生息しているのだろうか？生物は、堆積岩の場合、堆積物粒子の空隙に住んでいると思われる。火成岩では、岩石の割れ目や結晶の液体包有物が微生物の住み場所になっている可能性がある。

地下生物圏の微小生物を研究すると何がおもしろいのだろうか？地下微生物の研究は、タイムマシンに乗り込んで過去の生物を直接研究していることと同じことになる。本論で、私は、地下から過去の微小生物を取り出すことが出来た場合に可能になる 5 つの研究をあげてみた。それは、1) ジュラ紀の海の復元；2) 白亜紀中期の海洋無酸素事件と嫌気性生物；3) バクテリアブルームと過去の海洋環境；4) 極限環境で発生し進化した生物；5) SLiMes から得られたバクテリアの工業的な利用、である。

私は、21 世紀の深海掘削計画における戦略と実行計画を立てる際に、地下微生物研究を対象にするように提案する。ソマリ海盆はジュラ紀や白亜紀の地層が堆積しており、地下微生物研究に適した地域である。

Keywords: SLiMes, バクテリア, ウィルス, 原生生物, 適応, 極限環境, タイムマシン, 生きている化石, 原始進化, 極限環境における生命の起源

In this decade, many reports have been written about the many micro-organisms that live in the interstices of rocks and strata living more than a thousand meter beneath the earth's surface. These micro-organisms in the crust are called SLiMes (=Subsurface Lithoautotrophic Microbial Ecosystems). It is interest that these organisms living deep in the crust survive under extreme environments such as high temperature, high hydraulic pressure, limited nutrients and limited space. Furthermore, it is important to point out that these organisms may have been locked among the interstices in the rocks since the rocks were formed.

SLiMes are mainly composed of bacteria and probably viruses. Recently, thermophilic, methanogenic, fermenting, facultative anaerobic and sulfide reducing bacteria have been reported from deep in the crust. These bacteria are mostly adapted to extreme environments such as high temperature and/or anaerobic environments. It is probable that viruses exist in the crust together with bacteria, even though they have not yet been found. It is also possible that microeukaryotes are distributed in shallower depths of the strata beneath the seafloor. Some foraminifers were reported to live in salty underground waters at Kara-Kum Desert in Russia.

Where do micro-organisms live deep in the crust? Organisms may live in the interstices among sediment grains in sedimentary rocks. In volcanic rocks, both crevices in rocks and fluid inclusions in crystals offer places for microbes.

What is interesting about the study of micro-organisms in the deep biosphere? Such a study may be like studying ancient organisms directly with a time machine. Following are five interesting directions of study if we were successful in obtaining Jurassic micro-organisms from Jurassic rocks beneath the seafloor:

1) reconstruction of the Jurassic ocean; 2) the mid-Cretaceous oceanic anoxic event and anaerobic micro-organisms; 3) Bacterial Blooming and Ancient Ocean Environments; 4) origin and evolution of life in extreme environments; and 5) industrial use of bacteria from SLiMes

I propose that we consider investigation of subfloor SLiMes when discussing the strategy and logistics of the ocean drilling project in the 21st century. The Somali Basin is a strong candidate for this study because of the underlying thick Jurassic and Cretaceous strata.

Keywords: SLiMes, bacteria, viruses, protists, adaptation, extreme environments, time-machine, living fossils, origin of life in extreme environments

1 はじめに

古生物学者は、46 億年間変動してきた地球環境にかかわりあってきた生物の変遷史とその進化について研究している。その時、学者は太古に生きていた生物の姿を思

い浮かべようとすることがある。ちょうど映画のスクリーンの中で、中生代からよみがえった恐竜達が縦横無尽にかけ回っていたように・・・

過去の生物の姿を復元する方法はいくつかある。まず、化石になった生物そのものをよみがえらせようという試みがある。マイクル・クライトンが描く SF「ジュラシック・パーク」がわかりやすい例となる。小説では、琥珀に閉じこめられた恐竜の血液を吸った蚊から恐竜の DNA を抽出し、それを虫類の卵の核に導入して恐竜を発生させようという手順に基づいて、恐竜を現代によみ

[†] Jurassic Park beneath the seafloor using of ocean drilling to study SLiMes (Subsurface Lithoautotrophic Microbial Ecosystems) as living fossils encapsulated in sea floor strata, by Hiroshi Kitazato (sehkita@ipc.shizuoka.ac.jp)

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第 14 回夏期セミナーでの講演内容に加筆したものである。

^{††} 静岡大学理学部生物地球環境科学科 Department of Life and Earth Sciences Shizuoka University, 〒422-8529 静岡市大谷 836

がえらせようとしていた。しかし、実際には、長期間、琥珀に閉じこめられている間に DNA は短い断片になってしまい、SF の筋書き通りにはいかない。数万年前のネアンデルタール人の骨の中の DNA ですら断片になっており、部分的な塩基配列しか読めていないのである。したがって、今の所、約 1 万年前の類人猿（ナメケモノ）の糞に残された DNA の塩基配列を読んだというのが最も古い分析例である。ただし、化石の保存状態が良ければ DNA も残っている可能性がある。現在、シベリアの永久凍土に氷漬けになったマンモスから生きた精子を取り出そうという挑戦が日露共同で進んでいる。一方、化石になった生物と類似の形態と生活場所を持つ生物を、古生物もその生物と類似の生理生態あるいは遺伝的な特徴を持っていると考える復元方法もある。いわゆる「生きている化石」を探すということになるが、シーラカンスやしゃみせん貝がその代表例である。現在の海洋では、極限環境である暗黒の海底洞穴や深海底に古い形態を持った生物が多く生息していることが知られている。

最近、生物が分布しない世界だと思われていた地下の岩石圏に多種多様な生物が生息していることがわかってきた。地下に生息する生物のバイオマスは地表に生息する生物の量に匹敵するとまで試算されており、地下は一大生物圏である。地下空間は、暗黒・高圧・高温・低栄養・無酸素という極限的な環境条件であり、そこに分布する生物は特殊な生理・生態をもっている種類が多い。また多くの「生きている化石」が発見される可能性がある。このことから、私は、「深海の海底下の地層中には太古の微生物が閉じこめられているだろうから、それを取り出して過去の微小生物をよみがえらせよう」という "Jurassic Park beneath Sea floor" というプロポーザルを、九州大学の徐 垣氏と共同で国際深海掘削プロジェクト (IODP) の将来の研究計画として提案した。この計画は、題名こそ "Jurassic Park" という題は SF 映画に描かれた mad scientists による研究のイメージが強いという批判があったものの、幸いにして国内委員会に取りあげられ、研究の実現に向かって準備が進んでいる [1]。

本稿では、地下岩石圏にはどのような生物がいて、それらはどのような特徴があるのかといった地下生物圏の実態について研究の現状を紹介し、また地下生物圏の研究をすることによって生命史のどのような側面にアプローチできるのかということについての夢と可能性を述べる。

2 地下独立栄養微生物生態系 (SLiMes) とは何か？

1km を越える地殻深部でも、岩石や地層の間隙にはさまざまな微生物が限られた栄養源に依存して生きている [2-4] (Fig.1)。これを地下独立栄養微生物生態系 (SLiMes:

Subsurface Lithoautotrophic Microbial Ecosystems) という。この地殻深部の生態系を構成する微生物は、地殻中の限られた空隙の、高温・高圧・無酸素・限られた栄養源という極限環境の下で生息している点が興味深い。更に重要なことは、この地殻深部に生息する微生物は、現在、地表付近に生息する微生物が地殻深部まで分布しているのではなく、地層・岩体が形成された当時の種類が地下に封じ込められたまま、生き残っているらしいという点である。

真核生物にも Kara-Kum 砂漠の地下に住む原生生物の有孔虫類の存在が知られている [5]。小さい薄い殻を持った、*Miliammina oblonga arenacea*, *Spiroloculina turcomanica*, *Fischerina* sp. が、塩分 30% 以下、温度 17-20 度の間隙水中に生きている (Fig.2)。砂漠の有孔虫類は、鮮新世にテチス海が閉じたときに地層の間隙に封じ込められたまま生息し、同じように間隙に住むバクテリア群集およびその生産物を栄養源として世代を重ねて生き延びたと考えられている。このように、地殻の中は微生物や微小な真核生物のタイムカプセルとなっている。

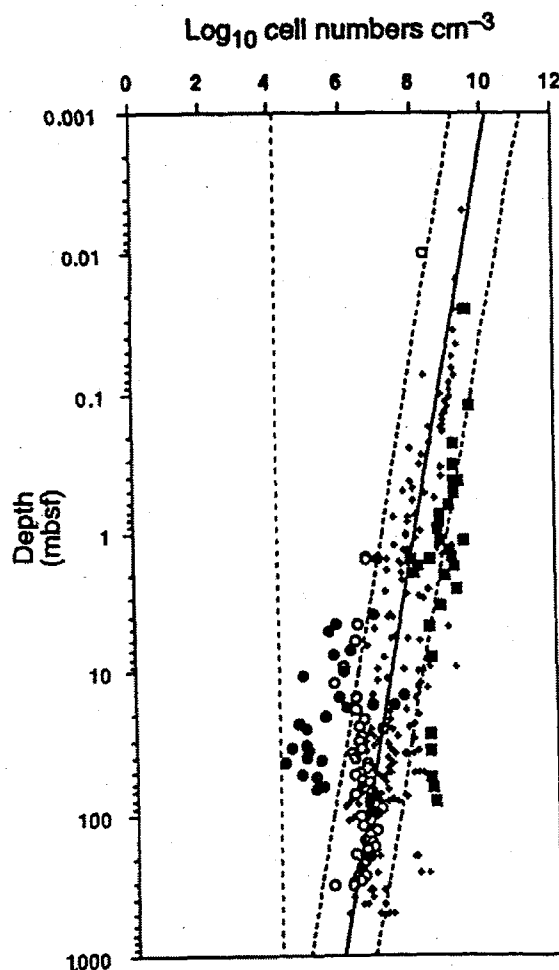


Fig.1 Depth distribution of total bacterial numbers from ODP sites in the Pacific Ocean [2].



Fig.2 Living foraminifera which are distributed in salty underground waters beneath Kara-Kum Desert [5].

3 どんな生物がいるのか？

地下深部の岩石・地層の空隙に生息している可能性がある生物は、バクテリア、ウイルスがほとんどであろう。現段階で発見されている生物は、アセトン・ブタノール菌、メタン細菌、硫酸還元バクテリアなどの古細菌である。ウイルスが発見されたとの報告はないが、細菌類と共存している可能性が高い。また、地温勾配の小さい海底下の地層中には微小な真核生物である原生生物がいるかもしれない。微小な真核生物はバクテリアよりも大きいために現生種が海底から混入する可能性はほとんどないと言え、まさに生きている化石である。

地下は、高温、暗黒、そして無酸素の世界である。したがって、そこには好熱性、非光合成性、嫌気性生物がいることになる。この好熱性、非光合成性、嫌気性という性質は、現存生物の究極の共通祖先として考えられている生物として想定されているものであり、地下微生物は地球型生物の祖先型に近い生活様式を持っている可能性がある (Fig. 3)。

これらの間隙生微小生物は、独立栄養細菌とその代謝産物を利用して生きる従属栄養微生物によって構成される原始共生系といわれる微生物生態系を形成している可能性が高い。原始共生系とは、原始的な地球環境に類似した高温で低酸素濃度という条件下で、複数種のバクテリアとウイルスが相互に作用し合って作り出す原初的な生態系であると定義されており [6]、陸上の温泉湧き出し口や深海の熱水噴出孔周辺からその存在が報告されている。

4 どこにいるのか？

地殻深部のどこに微小な生物は生存しているのだろうか。堆積岩であれば、堆積物粒子の間隙にある間隙水中に分布している。Kurmholz ら [7] は、バクテリアが頁岩ではなく砂岩に分布していることを示し、間隙の大きさが微生物の生存を規制していることを紹介している。

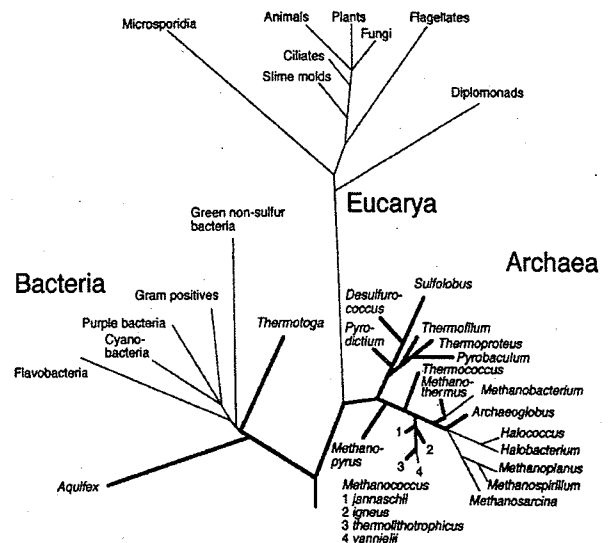


Fig.3 Universal phylogenetic tree [22]. Bold lines show hyperthermophiles. Archaeobacteria are mostly distributed in extreme environments such as hot springs or anoxia. These archaeobacteria locate root part of the tree. This means archaeobacteria is similar to early life on Earth.



Fig.4 Vacant cavity at chamber spaces of a foraminiferal test in shale [23]. Bacteria may house such cavities.

ただし、栄養分は頁岩のほうが多いことからいくらかの割合でシルト分が混ざっていることが望ましいとも述べている。また、火成岩であれば、岩石の割れ目や気泡中に生存していることが予想されている [4]。深海堆積物の場合、放散虫や有孔虫類の化石殻の房室に存在する空隙 (Fig. 4) に微生物が住み着いている可能性を考えたい。まわりには、たっぷりの炭素質の栄養があり、生存空間も確保できる微化石の殻はかっこの生命維持装置である。

5 どこまでいるのか？(分布の限界)

地下微小生物が地殻のどの深さまで分布するのかは、生物の温度・圧力に対する耐性が分布を支配する環境要因となる。バクテリアの場合、113℃の高温環境に生存する超好熱細菌の存在が知られている。超好熱細菌の膜蛋白質は140℃を越える温度でも失活しないことを考慮すると、もっと高温でも生存する微生物がいるかもしれない。真核生物の場合、紅藻のイデユコゴメが60℃まで生存することが出来ると言われている [8]。温度勾配が小さい深海底において約15℃/kmで温度が上昇するとすると、バクテリアで地下4km、真核の原生生物で地下2kmぐらいまで生存が可能であるという計算になる。

一方、圧力に関しては、加圧実験の結果、微小生物が2000気圧ぐらいまでは生存できそうだと考えられている。地下の圧力増加が400 atm/kmだとすると、水深4000mの深海底に堆積した堆積物の場合およそ4kmまでは十分に生存圏だと言えそうである。

6 どうしているのか？(存在形態とエネルギー源)

地下の微生物は何を栄養にして生存しているのだろうか？メタン、硫化水素、水素などが存在していることから、これらの物質の酸素を用いない酸化反応が地下微生物のエネルギー代謝の特徴である。たとえばpyrite生成時に発生する水素が地下生物圏のエネルギー源の一部になっている可能性がある。また、加熱によって有機物が分解してできる酢酸も地下生物の栄養源になっている可能性がある。最近では、3価の鉄を2価に還元することによってエネルギーを得ている原始細菌および古細菌の存在が報告されている [9]。いずれにしても、さまざまなエネルギー源を利用していることが考えられる。しかし、いずれも量的には期待することは出来ず、「地下の微小生物が活発に活動しているのだろうか？」という問いに対する答えは、「No！」である。おそらく限られた栄養分を細々と使っているのだろう。

いくつかの研究では、地下微生物が活発でないことを示唆している [10]。不活発な状態については2つの解釈がある。OnstottはTaylorsville Basinのmicrobial activity

は土壌中の10-15倍遅いと計算している。これは、微生物の増殖が極めて遅いことを意味しており、1年に1回あるいは100年に1回の割合で細胞分裂すると推測している。なお、伝染性細菌は数分に1回、土壌細菌は数時間に1回ぐらいの割合で分裂する。倍加時間が150万年で、細胞分裂の始まりから終了までに12万年かかるという極端な試算もある [11]。一方、Jannaschらは、deep biosphereのmicrobeは、成長できる条件になるまでinactive sporesを作ってじっとしているのだと予想している。しかし、どれくらい長期に亘ってsporeで居続けられるかはわかっていない。

7 この研究の何が面白いのか？

地殻深部の微小生物を取り出して研究することは、タイムマシンに乗って過去の生物を直接研究することと同じことになる。たとえば、ジュラ紀の地層に封じ込められた微小生物を取り出すことによって、ジュラ紀の海に生きていた生物を研究できる。このことは、化石からは理解できない過去の生物の遺伝・生理・生態などを検討することが出来ることを意味している。本項では微小生物を地下から生きたまま取り出した場合に可能になる研究を列挙する。

7.1 白亜紀の海洋無酸素事件と嫌気性微生物群集

地球史における特異な海洋環境としては、二畳紀末の超海洋無酸素事件や白亜紀中期の海洋無酸素事件がある。たとえば白亜紀中期には、スーパープリュームによって熱い海洋底が広がったために全世界的に海進が起こり、浅海域が広がった。そこでは、生物生産性が増加して多量の有機物を生産した。有機物が海中を沈降する際に酸素を消費してしまうために、深海が無酸素状態になり、ほとんどの有機物は分解されずに深海に到達して有機物に富んだ黒色頁岩を形成したと言われている [12]。この時期には、無酸素環境で生息できる硫酸還元菌やメタン細菌および腐敗に強い微小真核生物が海中に満ちているはずである。黒色頁岩からは、この無酸素海洋環境の主役である嫌気性バクテリアを取り出すことが出来るだろう。

一方、バクテリアが異常繁殖した環境の下で、真核生物のアメーバにバクテリアが共生することが観察されている [13]。このことは、比較的下等な真核生物が、環境が悪化したときにバクテリアを細胞内に共生させるという生き残り戦略を持っていることを示唆している [14]。単細胞真核生物である有孔虫の歴史を繙くと、白亜紀中期のOceanic Anoxic Eventを境にして、有機物の多い、嫌気的な環境に適応した*Chilostomella*, *Nonionella* や*Caucassina*/*Globobulimina*などの有孔虫類が出現してい

る。最近の研究では、嫌気的な環境に適応した有孔虫種の細胞にはバクテリアが共生していると考えられており [15, 16], バクテリアの細胞内共生が白亜紀の海洋無酸素事件の時に一斉に起こった可能性がある。この仮説の真偽は、現生有孔虫細胞内に共生するバクテリアと白亜紀中期の堆積物から分離したバクテリア類との系統関係や生理的な特性を比較することによって検討することが可能になる。

7.2 バクテリアブルーミング

過去の海洋は、バクテリアの天国であった可能性がある。たとえば、川上・大野 [17]は、先カンブリア紀末からカンブリア紀に世界の海洋にリン灰土が多量に堆積したことはバクテリアのブルーミングと関連した現象であると指摘している。この微生物のブルーミングは海水準の上昇した温暖期に栄養塩類に富んだ浅海域が広がったことと相関して発生したと言われており、古生代や中生代にも地球の気候変動と関連してこのような微生物の大量発生が起こった可能性がある。また、リン酸を沈積させる微生物の大量発生は海洋の化学組成を変化させる原因となり、それによって環境が変わった可能性も十分に考えられる。こういう視点から検討してみるとジュラ紀以降の海底堆積層中にも微生物のブルーミング層があり、そこにはブルーミングを起こした微生物が多量に閉じこめられているかもしれない。その微生物を研究することにより、微生物ブルーミングの性質とメカニズム、そしてブルーミングによって変えることのできる海洋環境について具体的に検討できる。

7.3 初期の生物進化の研究

地下微小生物を研究することによってさまざまなレベルの生物進化を議論できる。今まで述べてきたように地下深部には、現在、まだ知られていない古いタイプの微生物が生き残っている可能性がある。古いタイプの微生物を研究すると、たとえば 生命はどこで、どのようにして生まれ、それはどのような特徴を持っていたのだろうか？ 原核生物はどのように成立し進化したのだろうか？ 初期の真核生物はどのようにして誕生し、また進化してきたのだろうか？ というような初期の生物進化にかかわる問いに答えることができるようになるかもしれない。たとえば、地下深部の微生物群集は原始共生系を構成している可能性が大きい。真核生物の誕生は、Lynn Margulis が提唱した原核生物がほかの原核生物に共生するという内部共生説が有力である。原始共生系は原核生物から真核生物への進化への一里塚であるというアイデア [6]に基づく、この内部共生に先行して、原始共生という栄養をめぐる外部共生があったということになる。このシナリオが正しいとすると、地下深部の間隙生微生

物群集を研究することは、真核生物誕生前夜の状態を見ていることになる。とくに、原始細胞は超好熱古細菌が共通の祖先であると考えられており、超好熱細菌を主体にした嫌気的な地下生物群はまさに原生代の世界を見ていることになる。

さらに地下深部の単純な生物生態系を見ることを通じて、原核生物の初期進化を理解できるかもしれない。原核生物の初期進化の時期には環境に浮遊する裸の DNA を取り込む形質転換 (transformation) が遺伝子拡散の主な経路であったと考えられている [18]。実際、現在の海洋で、ある種の海洋細菌が非誘導的にウイルス様粒子を放出し、系統的にかけ離れた大腸菌に対して形質導入 (transduction) による遺伝子伝達を示すことが発見されている [19]。そうだとすると、地下の原始共生系を研究することによってファージなどの感染性ウイルスを媒介して原核生物の進化が起こるメカニズムをじかに解くことができるかもしれないのである。

7.4 バクテリアの分子進化の研究

バクテリアは単純な形態を持っているために、形態進化を議論することが難しい。もしも、ジュラ紀以降のさまざまな地質時代の地層中に閉じこめられたバクテリアを生きたまま回収し、それぞれの DNA の塩基配列を読むことができた場合、それを現在の種類と比較することによって、バクテリアの進化を遺伝子レベルで議論することが可能になる。もちろん、地下の極限環境であっても、バクテリアは世代交代を行っているので、地層から取り出したバクテリアが過去の遺伝情報をそのまま持っていることはないだろう。しかし、地球表層のバクテリアから隔離されて別の進化を辿ったバクテリアと現在の地表バクテリアとを比較することによって進化の理解に新しい切り口が与えられることは確かである。

7.5 ジュラ紀の海を復元する

ジュラ紀の海を考えてみよう。ジュラ紀を含む中生代の地球環境は温暖で [20], 温暖なテチス海の周囲には珊瑚礁が発達し、蒸発岩も分布していた [21]。極地域にも氷床が発達した証拠はないことから、この当時の深層水はテチス海起源の塩分が高く、あたたかい海水が占めていたものと考えられる。こういったジュラ紀の海が白亜紀以降の海と異なる点は、石灰質ナノプランクトンや浮遊性有孔虫という炭酸カルシウムの殻を持ったプランクトンが少なかったことである。三畳紀末に出現した石灰質ナノプランクトンはまだ多様性に乏しく数も少なかったし、浮遊性有孔虫が本格的に出現するのは白亜紀中期以降のことである。そのために、ジュラ紀の海では有機物分解による二酸化炭素の増加を補う形で起こる炭酸カルシウムの溶解が起こらず、pH の小さい深海環境にな

っていたと考えられる。また、海洋表層では渦鞭毛藻、緑藻、褐藻などの比較的 turn over rate の遅い藻類が一次生産を担っており、その生物生産性は低かったことが予想される。なお、現在、海洋表層の一次生産を支えている珪藻類は白亜紀後期になって出現する。このように現在とは違った環境の海であってもマリンスノーは降り続けており、微小生物は微生物生態系を作り、マリンスノーを分解していたに違いない。このように、海水の温度、塩分、溶存酸素量や pH 条件が違っていたと思われるジュラ紀の海に暮らす昔の微小生物達は現在とは異なった代謝活性や栄養塩摂取能力を持っていた可能性があるが、現在では知ることができない。海底下の地層深部に封じ込められた“生きている微小生物化石”を研究することによって、ジュラ紀のバクテリアの系統やその生理・代謝活性を知ることが出来れば、ジュラ紀の海洋の物質循環系の一部を再現できるかもしれない。

8 OD21 による海洋掘削研究計画 (まとめにかえて)

2003 年から、日本が主体となって新しいライザー掘削船を使った深海掘削研究計画(OD21)が始まる。地下微小生物生態系の研究は、OD21 の主要な研究テーマの一つになる可能性がある。1997 年の夏、東京で開かれた新しいライザー掘削船を用いた研究に関する研究集会(CONCORD)では、さまざまな挑戦的な研究テーマが話し合われ、私達も地下微小生物生態系にかかわる掘削計画を提案した (Fig.5)。以下に、その概要を示す。

8.1 掘削海域

ソマリ海盆・太平洋西部・大西洋縁辺部・北極海などのようにジュラ紀以降の地層が連続して堆積している海域を掘削候補地点とする。掘削地点は、ジュラ紀以降に火山活動による熱的な履歴を受けていない地域が望ましい。

8.2 研究計画

現在の堆積物からジュラ紀の基盤までオールコアで掘り抜く。コアリングは、現生の微生物による汚染を避けるためにライザー掘削で行う。試料は、地下の温度・間隙水圧を保ったまま船上に持ち上げる。船上では、保温・保圧タンクを備えた無菌室を用意し、無酸素環境中でコアを分割し、現在の生物の汚染がないように古い海洋地殻および古い海洋堆積物を切り出し、それらの岩石の間隙に封じ込められた生物 (原生生物・バクテリア・ファージウィルス) を分離・培養する。分離・培養した生物は、船上や陸上の実験室で、SrDNA による遺伝子解析、キノンや同位体による代謝系列の解析、および脂肪酸・磷脂質を用いた細胞成分の解析などの方法によって、どのよう

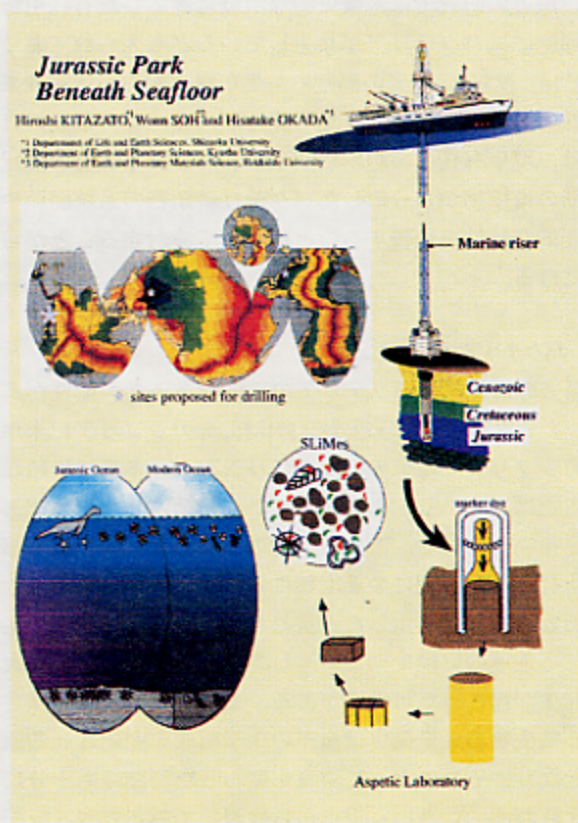


Fig.5 A color poster showing "Jurassic Park beneath Seafloor" research project for proposing to OD21

な培養環境で増殖しうるのかという生理活性や生態を調査し、過去からよみがえった生物が持つ環境適応機構の特徴と機能を把握し、また遺伝子配列を解読する。なお、極限環境の微生物を分離培養するのは極めて難しいので、コアの一部は凍結処理を行い、バルクで高精度の遺伝子解析やリン脂質に注目したバイオマーカー分析を行う。この解析を通じて、分離できない微生物の種類とその性質を理解できる。

8.3 研究の発展

海洋堆積物および海洋地殻中に封じ込められた生物を分離して研究することによって、私たちは過去の生物の進化や生物と地球との相関を、生物の痕跡や生産物から推定するのではなく、よみがえった過去の生物そのものから理解することが出来るようになる。また、数多くの分離された微小生物の中には現代の人間生活にとって有用な種類が含まれている可能性もあり、工業的な発展も期待できる。とくに、医薬品・汚染除去剤などに利用されることが期待されている。また、超好熱性細菌の細胞壁を作る高分子有機物は数 100 度の温度条件でも変質しないことから、新素材として開発される可能性がある。すでに、私たちはこのように極限環境から得られた微生物

物生産物を用いている。たとえば、DNAを増幅するPCRの際に用いるTAQ polymeraseはYellowstone国立公園の泡だった温泉の微生物から分離されているのである。

このように、地下生物圏の研究は、基礎科学から応用科学にかけて発展が期待されるいくつかの研究の萌芽を持っており、そういう意味で、21世紀に向けての研究の重要な流れになる可能性があると考えられる。

謝辞

九州大学の徐垣氏はこの研究計画の共同提案者の一人である。彼にはもっとも基本的な研究の動機付けをしていただいた。本研究計画案をまとめるに当たり、岡田尚武委員長を初めとするCONCORD WG1の委員、大野照文、加藤憲二、長沼毅、山本哲之の諸氏にはさまざまな段階で議論をしていただき、また有益な助言を賜った。日本原子力学会バックエンド部会大江俊昭部会長および広島大学長沼毅氏には、日本原子力学会バックエンド部会第14回夏期セミナーにおいて講演を行う機会を与えていただいた。記して感謝する。

参考文献

- [1] 岡田尚武, 北里 洋・OD21 WG1 メンバー: WG1 (気候変動と海面変動) からの掘削提案. 月刊地球, 号外, No.19, 183-189 (1997).
- [2] Parkes, R.J., Cragg, B.A., Bale, S.J., Getliff, J.M., Goodman, K., P.A. Rochelle, P.A., Fry, J.C., Weightman, A.J., Harvey, S.M.: Deep bacterial biosphere in Pacific Ocean sediments. *Nature*, **371**, 410-413 (1994).
- [3] Chapelle, F.H., Bradley, P.M.: Microbial aceto-genesis as a source of organic acids in ancient Atlantic Coastal Plain sediments. *Geology*, **24**, 925-928 (1996).
- [4] フレドリクソン, J.K., T.C. オンストット: 過酷な環境に生きる地底微生物. 日経サイエンス 1997 年 1 月号, 44-51 (1997).
- [5] Nikoljuk, V.F.: Was bergen die Erdschichten der Wueste Kara-Kum? *Pedobiologia*, **7**, 335-352 (1968).
- [6] 加藤憲二, 清水晃: 原始共生系—微生物生態学の展開. 月刊地球, **18**, 31-35 (1996).
- [7] Kurmholz, L.R., McKinley, J.P., Ulrich, G.A., Suflita, J.M.: Confined subsurface microbial communities in Cretaceous rock. *Nature*, **386**, 64-66 (1997).
- [8] 山岸明彦, 大島泰郎: 細菌:4000 遺伝子の細胞戦略. 吉川寛 編, ネオ生物学シリーズ, 共立出版, 東京 (1995).
- [9] Vargas, M., Kashefi, K., Blunt-Harris, E.L., Lovley, D.R.: Microbiological evidence for Fe(III) reduction on early Earth. *Nature*, **395**, 65-67 (1998).
- [10] Pennisi, E.: Microbiology's scarred revolutionary. *Science*, **276**, 699-706 (1997).
- [11] 長沼 毅: 地下生物圏研究の展望. 月刊地球, 号外 No. 19, 199-203 (1997).
- [12] Larson, R.L.: Geological consequences of superplumes. *Geology*, **19**, 963-966 (1991).
- [13] Jeon, K.W., Lorch, I.J.: Unusual intra-cellular bacterial infection in large, free living amoeba. *Exp. Cell. Res.*, **46**, 615-619 (1967).
- [14] 北里 洋: 冷湧水に伴う底生有孔虫—特徴と適応機構についての考察—. 化石, No. 60, 48-52 (1996).
- [15] Bernhard, J.M.: Microaerophilic and facultative anaerobic benthic foraminifera: A review of experimental and ultrastructural evidence. *Revue de Paleobiologie*, **15**, 261-275 (1996).
- [16] Bernhard, J.M., Bowser, S.: Meiofauna of the severely dysoxic Santa Barbara Basin: A symbiosis dominated community. *Abstract from the 10th International Meiofauna Conference*, University of Plymouth, 27-31, July 1998, pp.16 (1998).
- [17] 川上紳一, 大野照文: 原生代—古生代境界の地球システム変動と多細胞動物の出現. 地震, **48**, 487-508 (1996).
- [18] 山本啓之, 千浦 博: 原核生物の進化とウイルスの役割. 月刊地球, **18**, 36-40, (1996).
- [19] Chiura, H. X., Takagi, J.: Phage-like particles production and gene transfer by marine bacteria. *Bull. Jap. Soc. Microbial Ecol.*, **9**, 74-90 (1994).
- [20] Seibold, E., Berger, W.H.: The Seafloor. In: *An Introduction to Marine Geology*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, pp.356 (1996).
- [21] 増田富士雄: 地質時代の気候変動. 岩波講座「地球惑星科学」, No. 14, 岩波書店, 東京, 157-219 (1996).
- [22] Stetter, K.O.: The lesson of Archaeobacteria. In: Bengtson, S., (ed.), *Early life on Earth. Nobel Symposium No. 84*, Columbia Univ. Press, New York, 143-151 (1994).
- [23] Potter, P.E., Maynard, J.B., Pryor, W.A.: Sedimentology of Shale. In: *Study Guide and Reference Source*. Springer-Verlag, Heidelberg, pp.303 (1980).