

2. 地下圏生物学：

海底下の「海」における生命活動の解明

1. はじめに

ODP の成果などによって、生物活動がない世界だと思われていた地下の岩石圏に、実に多種多様な生物が生息していることが明らかになってきた。ある試算によれば、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総量に匹敵するとまで言われている。つまり地球は、地上のみならず地下にも一大生物圏を有しているのである。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下であり、従って、そのような極限環境下に生息する生物は、地表生物と異なった、特殊な生理・生態を持つものが多いことが予想される。また、地表との間に限られた相互作用しか存在しないために、隔離された空間である地下生物圏では、「生きている化石」が発見される可能性も高い。まさに地下空間は、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かもしれないのである。しかし、地殻内に生息する莫大な量の生物についての研究は、まだ、ほとんど行われてはいない。地殻内生物圏は、正真正銘のフロンティアと言えよう。

では、日本の科学者達はどのように未知の世界が広がる地殻内生物圏について、どのような視点で研究を行おうとしているのだろうか？ 特に、IODP 研究においては、以下の3つの視点が重要であると考えられる。

- (1) 地球表層環境の形成と改変に関連した地球表層部の物質循環に関わる地下圏の微生物活動を群集構造の解析をふまえて定量的に解析し、またモニターすることを目指すこと。
- (2) 地上生物の活動に基づいて構築された現代生物学では想定できない新しい代謝回路の発見や、地球表層の生物進化との関連の解明を目的として、「もう一つの生物進化」の場である多様な地下環境を研究対象とすること。
- (3) 現在も進行する地殻内における岩石・地層の続成過程に貢献する微生物活動を解明すること。

これらの研究は、地下に広がる「熱い海」と「冷たい海」への掘削を通じて行われることが適切であろう。すなわち、「生物の生存の限界に近い温度の熱水」に生息する生物群と「比較的低温の堆積物間隙水」に生息する生物群について、それらの群集構成、代謝、遺伝を比較検討することによって、より鮮明に地下生物圏の実体を把握できるはずである。

一方、掘削を用いた地下生物圏の研究では、地表生物からのコンタミネーションとの戦いに勝つことが、それを成功に導くか否かの技術的な壁である。これまで行われてきたノンライザー掘削では、海水を潤滑剤に用いて掘り進めるために、岩芯まで海水が染みこむ可能性があり、その結果として、地下の岩石への現生微生物の恒常的な汚染が常に危惧されてきた。これに対して、我が国が進めるライザー掘削では、掘削母船からベントナイトを混ぜた水を循環させながら掘削を進めるために、海水との接触を避けることができ、ノンライザー掘削に比べ、遙かにコンタミネーションの少ないサンプルが取得できる特徴がある。従って、IODP 研究では、これまでの ODP に比べて、極めて信頼度の高い科学成果をもたらすことが期待される。

2. 海底下に広がる「冷たい海」

「冷たい海」、つまり最大 2 億年に亘って沈積した深海底下の堆積層には、海底下 1000m 以深であってもその間隙水中に微生物が存在し、生命活動を展開している可能性がある。その代表が、メタン生成古細菌によるメタン生成であり、その結果として資源価値の高いメタンハイドレート層の形成がある。これに関与する細菌群に未知のものが含まれるのか、そしてどのような種類の群集構成（コンソーシアム）なのであるか？ また、それらはどのような代謝系を用いて物質変換を行っているのだろうか？ そしてその速度は？ 限りなく、疑問は湧いてくる。

暗く、酸素がない地殻内で進行している「もう一つの生物進化」の理解は、現在、科学者が理解する生物進化の姿を書き換えるだけにとどまらず、大気・海洋・地殻表層部で循環しているものとして構築されていた地球システムにおける炭素循環の図式と規模を大きく変更するだろう。地球の固体部分と表層の大気・海洋との間の炭素循環は、太陽エネルギーに支えられた地表の生物圏とともに、地球内部エネルギーをも利用した地下圏の生命活動を媒介して行われているのである。生命圏は、地球進化に伴って複雑に進化してきており、まさに、地球と生物、そしてそれが生み出す地球環境が一体となった地球—生命システムの姿が浮かび上がってくるのである。（図 2.1）

以上述べたような多くの研究課題の中で、これまでの関連研究の成果、地理的要因などを考

慮すると、「冷たい海」における地下生物圏に関する掘削研究として、以下の2点を挙げることができよう。

- ◆ ライザー掘削を用いたコンタミレス（汚染軽減）サンプリングが明らかにする「もう一つの生物進化」と地下物質循環および地下環境における新奇微生物の探索。この研究課題に関しては、例えば、南海トラフ域のBSR（Bottom Seismic Reflector）が発達する付加体を循環する地下水、および岩石間隙水に成立する微生物群集を把握し、微生物マット形成が岩石・地層の物性を変化させる事によるテクトニクスへの寄与を評価し、ひいては地震発生への地下生物の関わりを明らかにすることを旨とする、ことが考えられる。
- ◆ 地下圏微生物はメタンハイドレートを始めとする巨大な炭化水素リザーバーの生成と消滅にどのように寄与しているか。本課題については、遠州灘のように、付加体に前弧海盆が発達する地域において、堆積した地層中の有機物が地下微生物によってどのように分解・合成されて炭化水素資源の素になり、それが地下の水循環に伴って移動し、集積する過程を解明することが必要であろう。（図2.2）

3. 海底下に広がる「熱い海」

深海底に7500 kmにわたって広がるプレート境界には、地球内部からの熱の放出に伴って、熱水噴出孔が点在する。これらはまさに、地表に開いた地下圏の窓と言えよう。熱水噴出孔付近は、未知の極限微生物の宝庫であるとともに、太陽エネルギーによらない「もう一つの生態系」が成立し活発な物質循環系が形成されている（図2.3）。原始地球環境に似た高温の熱水が充満する地下では、酸素に加えて光も遮断された環境でどのような生物進化が進行してきたのであろうか？ まさに生命進化の初期過程を探る上で必要不可欠な情報を得ることができる実験室が、そこにある。これまでの深海底熱水噴出孔での研究によって、海底下の熱水だまりには120℃を遙かに超える高温環境下で生育可能なバクテリアが存在する可能性がある。従って、深海底熱水噴出孔における生物探査は、「生命の限界」を探ると言うことができよう。また、現在世界中で用いられている遺伝子技術において必須である酵素が、高温下で生息する好熱菌から見つけ出されたものであるという事実からも、深海底熱水噴出孔などの高熱環境下で働く酵素系から、新しいバイオテクノロジーが拓かれる可能性が高いと考えてよいだろう。さらに、長期的な全海洋物質循環像をより確かなものにするためにも、活発に活動する熱水環境下の微

生物活動が海洋環境へ及ぼすインパクトを正確に評価することが肝要である。これにより、地球システム変動の実体解明に近づけるであろう。以上の背景を考慮して、「熱い海」に関する掘削研究として、次の項目を提案する。

- ◆高温高圧環境下で生命の限界を探る。地下の岩石圏や堆積物の割れ目や間隙に存在する高温高圧の熱水中に拡がる微生物群の環境適応に、生命の起源を探る。本研究項目に関しては、沖縄トラフ、インド洋中央海嶺など、地下に高温の熱水だまりが存在し、盛んに海水循環が起こっている地域で掘削を行うことが必要であると考える。

4. 海底下に広がる無酸素環境における生命活動

酸素に富んだ海洋では、海中を沈降するマリンスノーあるいは糞粒という粒子状の有機物が生物地球化学的な物質循環を担っている。一方、酸素に乏しい嫌気的な海洋では微生物が有機物生産を担っており、海底には微生物起源の有機物に富んだ地層が形成する。恐竜が繁栄していた中生代の地球環境は温暖で、頻繁に嫌気的な海洋環境が創出され、有機物に富んだ黒色泥岩が堆積した。この時に広範囲に堆積した黒色泥岩が世界の石油や天然ガスの根源岩になっていることから、嫌気環境における地層の堆積過程と生物地球化学的な物質循環の理解が急がれる。嫌気環境では真核生物と原核生物の共生が頻繁に生じている。細胞内共生は新しい細胞代謝を生み出すきっかけを作るとともに、また機能領域を含む遺伝子断片が挿入される事によって情報の水平伝達が起こり、突然、新しい形質の発現が起こることがある。生命史における飛躍的な進化は、地球史に見られる代表的な海洋無酸素事件と相前後して起こっていることがあり、“細胞内共生が生物の飛躍進化を生む原因である”という仮説が提示されている。このようなことから、嫌気海洋環境の掘削は生物進化の歴史とそのメカニズムを繙くことにもつながるであろう。掘削研究項目としては、以下のものが考えられる。

- ◆嫌気海洋環境における微生物が関与した堆積過程の解明と現在進行形の地下圏微生物作用の理解。本研究項目に関する掘削候補地点として、日本海、アラビア海、黒海、東地中海など、現在と過去の嫌気環境堆積物が代表的に分布する海域を挙げるができる。

5. ライザー掘削孔を用いたバイオインキュベーション

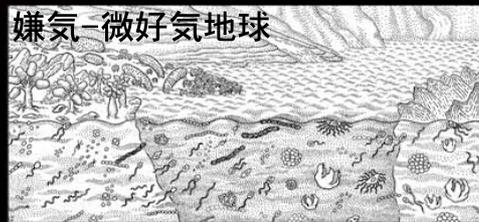
深海掘削終了後海底下の地層や岩石中に残された掘削孔は、従来は地震計の設置などの現場観測実験にもちいられてきたが、地下圏微生物と深海生物の研究を行う際の現場実験室としても用いる事が出来る。たとえば、流体圧や温度等の計測情報が得られた掘削孔内で、さまざまな培地に植えた微生物を培養し、現場環境における微生物種ごとの活性測定を試みることは、興味深い実験である。掘削孔を用いた地下圏微生物の現場培養は、現在陸上の実験室で主に行っている短期の高温高圧実験と比べて、数ヶ月から数年に及ぶ長期間にわたって実験を行うことが可能になり、たとえば現場環境におけるメタンハイドレートの生成に関する速度論的な研究も可能となる。

また、海底に新たに開けた掘削孔は海底から海底面上に湧水や熱水を供給し、新たな生物環境を生み出す。そこでは、新しく化学合成生物群集が住み着く過程を見ることが出来るはずである。すなわち掘削孔は、従来の方法論では解明できない深海生物群集の長期変遷と深海生態系の変動を観測できる希有な実験場となる。さらに、掘削孔における地下流体の長期計測は、地下生物圏ならびに深海生物圏での物質循環を直接実測できるというアドバンテージがある。

地球-生命システムの進化

生物の進化

地球の進化



H₂O
CO₂

O₂

P, N,
SiO₂, CaCO₃

CO₂
SO₂

地球

内部

要因

優勢

地球

外部

因子

優勢

現在

マグマオーシャン

大陸の形成

プレート活動に伴う
揮発性ガスの噴出

内核

図2.1 地球 - 生命システムの進化（北里洋、豊福高志原図）。

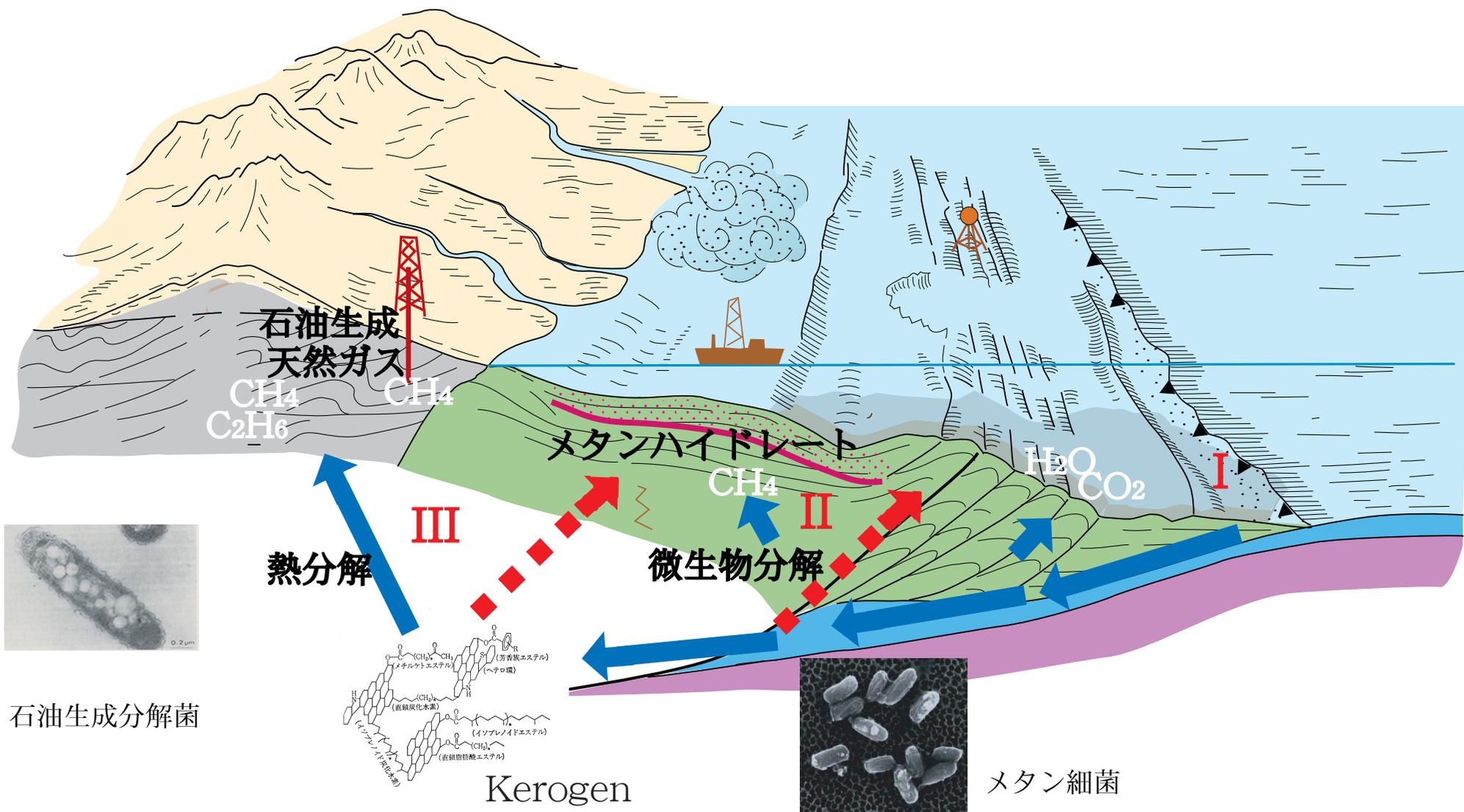
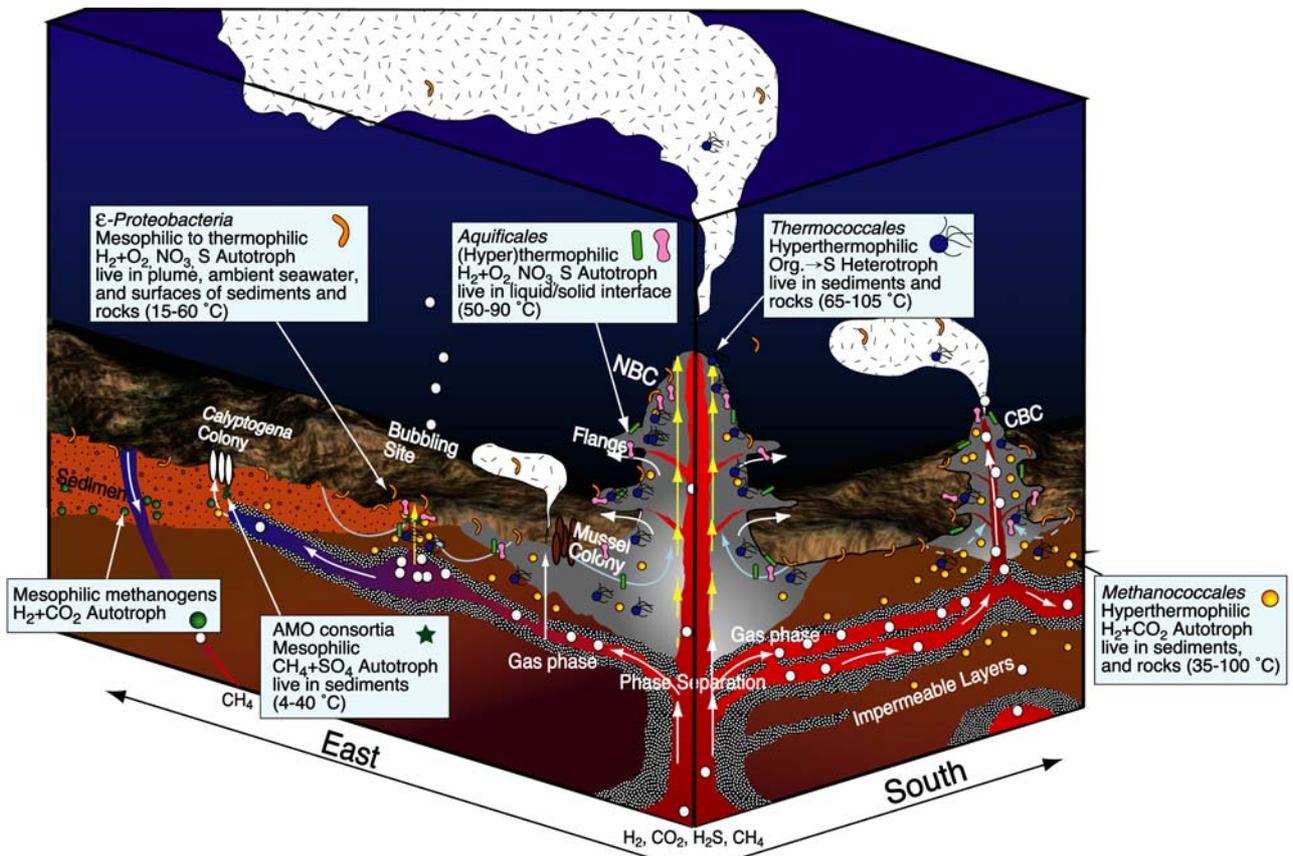


図2.2 沈み込み帯における有機物循環（平朝彦、北里洋原図）。



3Dイメージ — 伊平屋北部熱水孔活動域海底下構造

図 2.3 伊平屋北部熱水孔における微生物活動の3Dイメージ (高井研原図)。