

本研究領域の目的

■本研究の動機

1970年代末に海底熱水活動が発見され、熱水噴出口周辺に見られる豊かな生物群集が化学合成による一次生産に依存していることが明らかになった。その発見は、地球の生命活動はすべて太陽の輻射エネルギーによる光合成に支えられているという概念を覆すものであり、熱水域の化学合成生態系の研究が急速に進展した。一方で、原核生物による化学合成は熱水域など限られた環境に局在し、地球全体の有機炭素の生産量から考えた場合、その影響は極めて小さい(～10万分の1)とする考えもあった。しかし近年、地球表面積の70%を占める海洋底下に広大な「地下生物圏」が広がっている可能性が指摘され、地球上の炭素循環のみならず、地球生命のあり方と進化、および地球生命圏の限界について大きなパラダイムシフトが起こりつつある。本研究の目的は、既存の学問分野の枠を遙かに超えたこの新しい研究分野に対し、掘削による直接アプローチというユニークな手法と、地球科学と微生物学のチームによる異分野連携体制を構築して挑むものである。

■境界層としての海洋底

海洋底は流体／固体地球最大の境界層であり、地球内部からの熱や物質の放出にきわめて大きな役割を果たしている。海洋底は、非常に高い透水率($>10^{-12}\text{m}^2$)を持つ空隙に富んだ海洋上部地殻と、それをおおう透水性の低い未固結堆積物からなり(Fisher et al., 2003)、そこでの熱放出のスタイルは、堆積物のない海嶺軸部における高温熱水活動、堆積物に覆われた海嶺翼部における低温熱水活動、および65Ma内外より古い海洋地殻での熱伝導に区分されてきた(Stein and Stein, 1992)。しかし海洋地殻は海嶺において生成された後、幾通りものプレート内火成活動で改変を受け(e.g. Hirano et al., 2006)、複雑な熱史をたどっている地殻が多く発見されている。加えて、低温の活動を含めた海洋地殻中の熱水循環およびそれによる岩石の変質は、地球の冷却様式を規定することを通じて、全マンツルのダイナミクスにも影響を及ぼすことが指摘されており(Ocean Mantle Dynamics workshop Report, 2002)、海洋地殻中の熱水の移流の広がりとその様式もまた、再考を迫られている。このように、全地球的な視野での海洋地殻中の熱水循環の解明は、海洋底地球科学にとどまらない新たな研究領域である。

■海底下の大河

われわれは、この熱水循環を「海底下の大河」と呼ぶことを提案する。というのも、熱水循環は単なる海水の熱的循環ではなく、マグマ由来の揮発性成分を初めとするさまざまなインプットを持ち、“流域”では風化や岩石-水反応を通じて地殻と成分のやりとりを行い、陸上の河川と同様に大洋に“流入”してその組成の一部を制御しているからである。

この「海底下の大河」は陸上河川のインプットと比肩する流量と化学的なフラックスを有している。たとえば、海嶺における海洋地殻の生成量をもとに求められた熱水量は、海嶺翼部を循環する低温熱水($5^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$)を含めると $0.2\sim 2\times 10^{19}\text{g/年}$ と計算される(Mottl, 2003)。この量はほぼ河川水の総流量($3.74\times 10^{19}\text{g/年}$)に匹敵し、全海水が70万年から7百万年ごとに海嶺翼部の熱水循環系に取り込まれている計算になる。さらに、海嶺部における海水塊分析からの推定(deVilliers and Nelson, 1999)では、上記の推定より1桁高い数値が算出されており、大きな誤差を生む原因となる低温熱水の海洋地殻中の循環量を、より正確に知る必要がある。

「海底下の大河」の“河口”に当たる熱水・冷湧水域では、噴出流体が周囲の海水中を上昇しつつ拡散混合する。その部分を熱水・冷湧水プルームと称する。全海水は数千年に一度このプルームの一部となって「大河」の水と接する(German and Von Damm, 2004)。プルーム中では化学的非平衡の度合いが大きいことから活発な生物化学反応が起こっているため、海水や生態系に対するその影響についても正確に知る必要がある。

■新たなエコシステムの発見

陸上の大河は地表の生態系を支えているが、「海底下の大河」は地下生物圏に対し更に大きな役割を果たしている。海域の生物バイオマスの99%以上は、海水中ではなく海底下の地下生物圏に存在する(Whitman et al., 1998)と指摘されているが、それらの生態系を支えているのが「大河」を介したエネルギー供給と物質循環である。つまり、海底下における生態系は、海洋底テクトニクスおよびマグマ活動に制御された「海底下の大河」の流れに、空間的・時間的に深く関わっている。これまで、海底熱水活動が多く見られる中央海嶺からの化学的フラックスは拡大速度に比例する(Urabe et al.,

1995)と一般化されてきた。しかし、そのような単純な視点は、次のような発見によって大きく見直しを迫られている：低速拡大域におけるこれまでのカテゴリに入らない海嶺熱水活動の発見と、水素をベースにしたあらたな生態系の発見(Takai et al., 2004, Kelley et al., 2005)、島弧海山の地下生物圏の実例(Hara et al., 2005)、厚い堆積物に覆われた場におけるメタンに依存した熱水生態系の発見(Inagaki et al., 2006)、および海洋地殻玄武岩中の二価鉄に依存したおよそ 1000 万年に及ぶ玄武岩微生物活動の発見(Bach and Edwards, 2003)などである。これらはいずれも、「海底下の大河」に支えられた「地下生物圏」が、これまでの想像をはるかに超えた多様性と広がりを持っていることを示唆している。

■本研究で明らかにすること

海底地下生物圏の多様性を俯瞰するため、我々は「海底下の大河」を以下の4つに分類する。

	「鉄」の大河	「イオウ」の大河	「メタン」の大河	「水素」の大河
関連する地質現象	海洋地殻の風化	マグマ活動	堆積物の熟成	断層運動
流域の主構成物質	海嶺玄武岩	マグマ	堆積物	超マフィック岩
特徴的な大河	低温熱水	高温+低温熱水	中温+高温熱水	中温熱水
時間スケール	百万年～数億年	数日～数百年	数百年～数千年	数千年～百万年
特徴的な化学反応	岩石中の鉄酸化	還元性ガスの酸化	微生物作用によるメタン生成	水素発生と FTT*
化学エネルギー源	2 価鉄 (Fe(II))	イオウ化合物	メタン	水素
大河が支える一次生産者	鉄酸化菌	イオウ酸化菌 イオウ還元菌	メタン資化菌	水素菌 メタン生成菌

(*FTT:フィッシュヤートロプシュ型反応。熱水中で二酸化炭素と水素から有機化合物が生成する。かんらん岩の蛇紋岩化に伴って起こることが実験的に確かめられた(Seewald et al., 2005)。

大河生態系の一次生産者である化学合成独立栄養微生物がエネルギー獲得に用いる化学反応は、主として酸化還元反応であり、それらの無機化学的反応速度が遅いため生じる非平衡状態を利用して生育している(Edwards et al., 2005)。よって(1)化学エネルギー源たる「鉄」「イオウ」「メタン」「水素」という代表的な還元物質の供給、および(2)酸素、硫酸塩、硝酸塩などの酸化物質を含む海水の循環、をもたらし海底下の大河の存在様式が、その流域や河口域に生息する(微)生物生態系を規定し得るという画期的な作業仮説を提唱したい。その作業仮説の下、上記4種類の大河のそれぞれが最も典型的に観察される南部マリアナトラフ、沖縄トラフ、ロドリゲス海嶺3重点を選定し、分野横断調査航海を実施する。さらにその環境を室内高温高圧熱水実験によって再現することを通じて仮説検証を行う。

この分野において他の追従を許さない我々グループ独自の手法として、地下生物圏の直接掘削がある。これまで我々のグループが中心に行ってきた提案により、2009年～2011年に掘削船「ちきゅう」による掘削が決定した。この深層掘削では、世界で初めて沖縄トラフにおける海底下の大河の上流から河口域までを系統的に明らかにする。また本計画が採択された暁には、海底設置型掘削装置(BMS)を搭載した第2白嶺丸を備船して南部マリアナにおいて掘削を行う。BMSによる掘削は浅層(20m以下)であるものの、無菌掘削により海洋地殻中の生態系を擾乱なしに複数の孔井において観測/試料採取できるので、熱水環境、岩石変質、微生物活動の相互作用を明らかにする。このように、本計画は全く未知の領域である地下生物圏に、他では実現し得ない直接掘削という手法を用いた新しい領域を開く研究である。

地球最古の微生物生態系(35億年前)もまた海底下の熱水脈中に存在したとされる(Ueno et al, 2006)。「海底下の大河」仮説の検証は、地球生態系が持つ機能と物質循環の規模の再検証を進めると共に、世界に先駆けて、生命と地球の関わりを根源的に問い直すきっかけを与えるだろう。

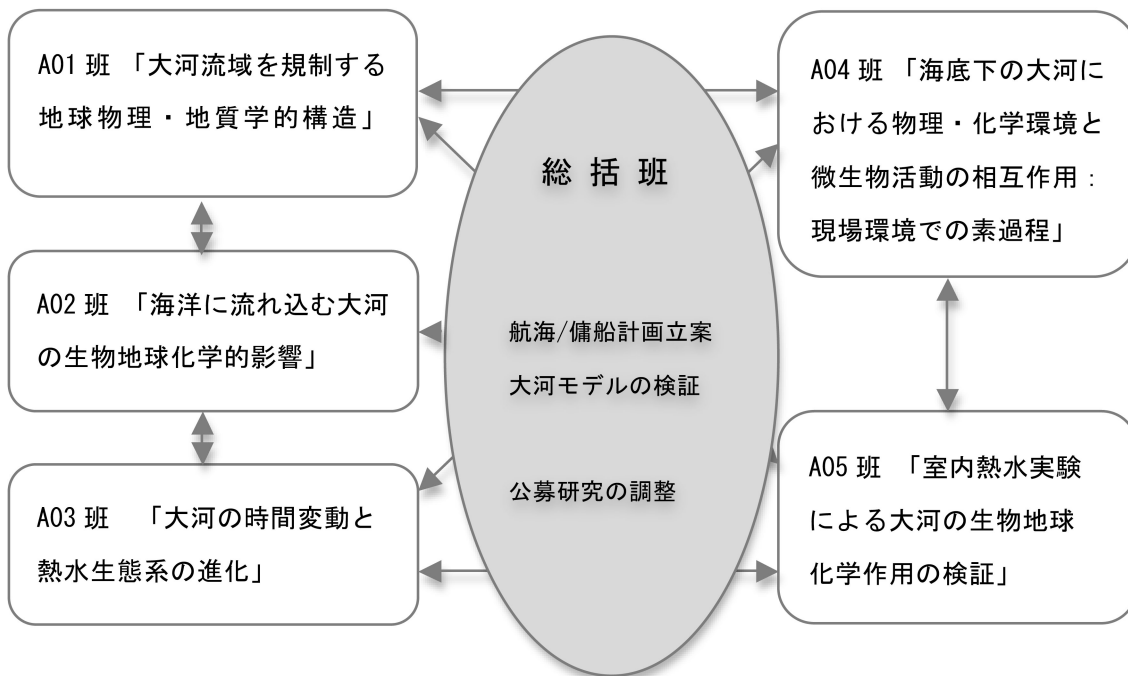
領域推進の計画・方法

■本計画では、以下の仮説を立てその検証を行う：

- (a) 海洋地殻中には高い透水率に支えられた移流 (advection) が存在し、その流量は陸上の河川水の総量に匹敵し、地球の物質循環にも大きな影響を持つ。それを包括的に「海底下の大河」と呼ぶ。
- (b) 「海底下の大河」は4種類に大括りでき、流域のテクトニクス、岩石種、熱源、物質の供給などの存在様式が、その流域に生息する地下微生物生態系を規定している。
- (c) それらの総和が現在の地下生物圏の全貌であり、そこにおける生成物は熱水・冷湧水プルームとして海洋に大きな影響を与えている。
- (d) 現在の地下生物圏は地球最古の生態系のアナロジーであるとともに、地球外生命が存在するならば、その生態系のあり方を示唆するものである。

■研究体制として、総括班および5つの計画研究 (A01-A05 班) を置く：

「海底下の大河」領域を推進するに当たっての研究体制



総括班：

- ・ 総括班は領域代表者および上図の A01-A05 班の班長 (計画研究代表者) を以て構成する。
- ・ その役割については3 (1) 「総括班の役割」に詳しく述べる。

5つの計画研究班：

A01 班は構造イメージングと地殻・マントルの化学組成の解析を通じて、「海底下の大河」を支える地殻形成プロセスを明らかにする。A02 班は熱水・冷湧水プルームの検出や微生物・大型生物の定量分析を通じて海洋に流出した「海底下の大河」の影響を定量的に解析する。A03 班は年代測定等を通じて「海底下の大河」の活動の数年から数万年にわたるタイムスケールでの長期時間変動を評価する。A04 班は物理・化学環境と微生物活動の相互作用を、微視的なスケールの素過程として解き明かす。そして、A05 班は唯一フィールドにでず、室内高温高压実験で「海底下の大河」の環境を再現する。

このように、5つの班はお互いに深く結び合いつつ、過不足なくデータを作り出せるように綿密な計画の下、配置されている。これらの学際的なチームワークにより、さまざまな大河の挙動を、時間的・空間的に解明することを目指す。

■海域別航海計画を中心に研究計画を立案する：

- ・ 大洋底という空間的、時間的に膨大な対象に対し、計画が散漫にならないよう、海域別航海計画 (下図) を中心に据えて研究計画を立案した。
- ・ 調査海域として「メタン」の大河が典型的に発達する沖縄トラフ、3つの熱水域に「イオウ=高温」および「鉄=低温」の大河が見られる南部マリアナトラフ、海嶺軸部に「イオウ」の大河が、そしてその近傍に世界で最も水素に富む「水素」の大河が見られるインド洋ロドリゲス海嶺3重点、お

よび鉄酸化菌、マンガン酸化菌を中心とした「鉄」の大河が見られる2つの地域（平頂海山、大西洋）を選定した。

- ・ **沖縄トラフ**は我々のグループによる調査が最も進んでおり、平成21年から3年間、熱水域の中心から周辺に向けて「ちきゅう」による掘削が決定している。また、掘削による影響を調査するため、それらの掘削の間に有人/無人潜水艇による採水（化学、微生物）・岩石生物採取の公募航海に応募する。
- ・ **南部マリアナトラフ**では3つの熱水域が島弧に直交する方向に配列し、島弧および背弧マグマの起源および岩石-海水反応、およびそれらが化学、微生物活動に及ぼす影響が興味の対象となっている。ここは対象に地域的広がりがあるので、平成22、23年にBMS掘削を実施する。また平成21、23年に採水と岩石採取、平成21、22年に中期地球物理観測航海の応募を行う。
- ・ **ロドリゲス海嶺3重点**は遠隔地であり、3カ所の対象海域の中では研究が未だ初期段階にあることとコストの点からBMS掘削は諦めざるを得なかった。しかし異なった性質の大河が隣接している興味深い地点であり、その原因を探るために平成22、24年に採水（化学、微生物）・岩石採取調査を、平成23年に地球物理調査および長期観測の航海に応募を行う。長期観測機器は平成24年の採水・岩石採取調査の際に回収する。
- ・ これらの内で、目に見える湧水を伴わない「鉄」の大河は最も調査が困難な対象である。そこで、**その他の2海域**は、別の計画の調査航海と共同研究で行うものである。

本領域研究の調査航海計画

	H20	H21	H22	H23	H24
沖縄トラフ		IODP掘削	IODP掘削	IODP掘削	
南マリアナトラフ		採水 岩石生物採取 地球物理調査	BMS掘削 中期観測	BMS掘削 採水 岩石生物採取	IODP掘削提案
インド洋 ロドリゲス 海嶺三重点			採水 岩石生物採取	地球物理調査 長期観測	採水 岩石生物採取
その他	微生物活動調査 (平頂海山 ^{*1})	●	微生物活動調査 (大西洋 ^{*2})	●	

図中白抜きは傭船による航海。枠で囲まれた航海は実施が決定している航海。灰色は応募予定の公募航海を示している。中・長期観測の予定期間を太矢印で示した。

- *1 「鉄の大河」南鳥島沖の拓洋第5海山での鉄・マンガン酸化菌を中心とした微生物活動調査
- *2 「鉄の大河」大西洋中央海嶺翼部North Pondにおける鉄酸化菌を中心とした微生物活動調査

公募航海は採択が保証されているものではないが、本研究グループでは年5航海以上の高い航海採択実績があり、時期を問わなければ上記の航海計画は十分に実現可能であるといえる。