



統合国際深海掘削計画 (IODP)  
— 2003 年から 10 年の成果 —

## IODP 第 337 次研究航海 : 下北八戸沖石炭層生命圏 調査

稲垣 史生  
村山 雅史  
久保 雄介

IODP 第 337 次研究航海研究者一同

IODP Expedition 337 : Deep coalbed-  
biosphere off Shimokita

Fumio Inagaki • Masafumi Murayama •  
Yusuke Kubo • IODP Expedition 337 Scientists

いながき ふみお : 海洋研究開発機構高知コア研究所  
むらやま まさふみ : 高知大学海洋コア総合研究センター  
くぼ ゆうすけ : 海洋研究開発機構  
地球深部探査センター

地球深部探査船「ちきゅう」の特徴の一つであるライザー掘削システムは、海底下 2,000 m を超える人類未到の大深度科学掘削を実現する唯一の手段である。IODP 第 337 次研究航海「下北八戸沖石炭層生命圏掘削調査」では、科学海洋掘削史における世界最高到達深度 2,111 m を約 10 年ぶりに更新し、海底下 2,466 m までのライザー掘削および詳細な孔内検層データの取得に成功した。本掘削調査によって、海底下の生命活動・遺伝子機能の実態や、生命圏の拡がりやを規定する物理化学的・地球化学的要因が解き明かされるばかりでなく、日本近海の海底炭化水素資源の実態や形成過程、海底下炭素循環に関する理解が大きく進むことが期待される。

### 1. はじめに : 海底下生命圏と炭素循環

約半世紀の歴史を持つ海洋掘削科学において、プレートテクトニクスや大規模な地球環境変動の実証などに匹敵する学術的成果の一つとして、海底下の堆積物中に生息する膨大な微生物細胞からなる「海底下生命圏」の発見がある (Parkes *et al.*, 1994, 2000 ; Whitman *et al.*, 1989). 2002 年にペルー沖および東太平洋赤道域にて行われた史上初めての海底下生命圏の解明を目的とした科学掘削航海 ODP Leg 201 を皮切りに (D'Hondt *et al.*, 2004), 我々は大陸沿岸や海嶺系, 外洋還流域を含む, 様々な海洋学的・地質学的条件における海底下生命圏の実態解明に挑んできた。現在, 海底下生命圏には約  $3 \times 10^{29}$  細胞に相当する微生物が存在し, そのバイオマスは炭素量に換算すると 4.1 ペタグラム (地球の全生命体炭素の約 0.6%) に相当すると試算されている (Kallmeyer *et al.*, 2012 ; Hinrichs & Inagaki, 2012). また, 主に大陸沿岸の海底堆積物から抽出された DNA の分子生物学的研究により, 海底下生命圏に生息する微生物の多くは, 陸域土壌や森林・生活圏, 河川や海水等の「地球表層生命圏」に生息している微生物とは系統的に大きく異なり, その多くが未だ生理・生化学的性状が不明の未培養微生物であることが明らかになっている (e.g., Inagaki *et al.*, 2006). さらに, ペルー沖の

海底堆積物から抽出された環境ゲノムの網羅的解読（メタゲノミクス）によって、海底堆積物に含まれる遺伝子プールの約8割が、地球表層生命から構築された遺伝子データベースと相同性を示さない、機能未知の遺伝子群であることが明らかとなっている（Biddle *et al.*, 2008）。これらの微生物学的・分子生物学的知見は、海底下生命圏が「未知微生物・遺伝子資源の宝庫」であり、地球最大の生命圏フロンティアであることを示唆している。

一方、海底下生命圏のバイオマス・多様性・代謝機能等に関する地球規模での地理的空間分布は未解明の部分が多く、その研究は依然として端緒についたばかりである（D'Hondt *et al.*, 2002, 2007）。地球表層生命圏を支える主要なエネルギー供給源は太陽光であり、光合成による一次生産に基づく食物連鎖の上に生態系が成り立っている。一方、深海底のさらにその下に広がる海底下生命圏は、太陽光の届かない暗黒の世界であり、太陽光からの持続的なエネルギー供給を直接的に享受できない。従って、40億年以上におよぶ地球生命史において、海底下に生命が持続的かつ能動的に生存するためには、地球表層（陸・海水）もしくは地球深部（マグマや断層活動等）から供給される栄養・エネルギー基質や、海底下深部の生命活動を規定する物理的制約条件に適応した生存戦略を獲得し、進化したものと考えられる。実際に、海水中の光合成基礎生産量を示すクロロフィル濃度と海底下のバイオマスの分布は高い相関を示しており（Lipp *et al.*, 2008; D'Hondt *et al.*, 2009）、地球表層の生命圏と海底下生命圏は、海底をインターフェースとした別次元の生命圏空間である一方で、流体移動に伴う物質・エネルギーの移流およびプレートテクトニクス等による地球内部-表層間の物質循環を媒介し、地質学的スケールで機能的にリンクしている。

過去数十年にわたり、メタンハイドレートや海底油ガス環境の産業開発が進む一方で、ノンライザー掘削による掘削科学調査では、分析試料の採取に限界があった（Ravelo *et al.*, 2010）。実際に、地球史における海底炭化水素資源の形成・消費プ

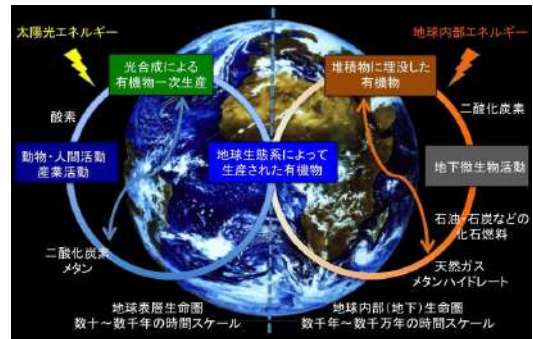


図1 地球表層および地球内部の生命圏と炭素循環。

ロセスは、地球規模の炭素循環や気候変動に重要な役割を果たしていることが示唆されている。しかし、その詳細なメカニズム（とりわけ、生命活動が関与した深部炭素循環系について）は不明な部分が多い。既に、陸域の炭鉱や油ガス環境の微生物学的調査によって、多様な微生物から構成される従属栄養微生物生態系が、難分解性有機物の分解・濃縮やメタン生成など、炭化水素資源の形成プロセスに重要な役割を果たしていることが示唆されている（e.g., Whiticar, 1999）。しかし、海底堆積物環境における微生物学的・地球化学知見は極めて乏しいのが現状である。他方、産業革命以降から現在にかけて、世界の炭素・エネルギー循環は大きく変化している。人為的な環境変動と地球本来の環境変動のバランスを理解し、将来の持続的な社会構築や環境保全に科学的な示唆や指針を示すことは、科学海洋掘削が大きく貢献しうる全人的な課題である（図1）。即ち、二酸化炭素などの温室効果ガスの排出を抑制しつつ、経済的なエネルギー需要を支えるためには、地球生態系と調和し、環境に負荷を与えない持続的な炭素・エネルギー循環システムの創出が不可欠である（Schrag, 2009; Ohtomo *et al.*, 2013）。生命・経済活動の最終産物である単一炭素化合物（二酸化炭素・メタンなど）の大気排出をどのように抑え、いかに地球の炭素循環の移流の中で環境やエネルギーを利活用できるかを考える上で、これまでに科学のメスが入っていない海底下深部炭化水素資源環境のシステムティックな掘削調査は、開発目的の

探査にとどまらず、今後の科学海洋掘削にとって極めて重要なミッションとなるだろう (Ravelo *et al.*, 2010)。地球深部探査船「ちきゅう」は、それを実践できる世界で唯一のライザー掘削科学プラットフォームであり、従来の商業開発に用いられてきた掘削プラットフォームにはない地球科学・生命科学研究所としての卓越した機能とその拡充の可能性を備えている。

## 2. 下北八戸沖石炭層生命圏掘削の背景と科学目標

2012年7月から9月にかけて、我々は青森県八戸市の沖合約80 kmの地点（掘削地点 C0020、水深1,180 m）において、「ちきゅう」のライザー掘削システムを用いた統合国際深海掘削計画（IODP）第337次研究航海「下北八戸沖石炭層生命圏調査」（共同主席研究者：稲垣史生・Kai-Uwe Hinrichs）を実施した（図2）。これまでに、「ちきゅう」の慣熟訓練航海中にノンライザー掘削によって採取された海底約365 mまでの堆積物コア試料の分析により、当該海域の浅部堆積物が極めて高い堆積速度で形成された珪藻質粘土からなる地層であり、微生物起源とされる軽い炭素同位体比のメタンに富み、砂層や火山灰層などに間隙充填型のメタンハイドレートが形成されていることが明らかとなっている (Tomaru *et al.*, 2009)。本海域の浅部堆積物には、1立方センチメートル当り  $10^7 \sim 10^8$  の微生物細胞が含まれ、極めて肥沃な海底下生命圏の存在が確認されている (Lipp *et al.*, 2008 ; Kobayashi *et al.*, 2008 ; Morono *et al.*, 2009)。また、深度219 m（堆積年代約46万年）の堆積物試料に  $^{13}\text{C}$  や  $^{15}\text{N}$  の安定同位体基質で標識された様々な栄養基質を添加し、超高空間分解能二次イオン質量分析器 (NanoSIMS) を用いて微生物細胞の基質同化活性を測定したところ、堆積物に含まれる7割以上の微生物が基質同化活性を示す“生細胞”であり、1細胞1日あたりの平均基質同化活性は、約1京分の一グラム炭素以下（少なくとも大腸菌などの1万分の一以下）と極めて低いことが示唆されている (Morono *et al.*, 2011)。さら

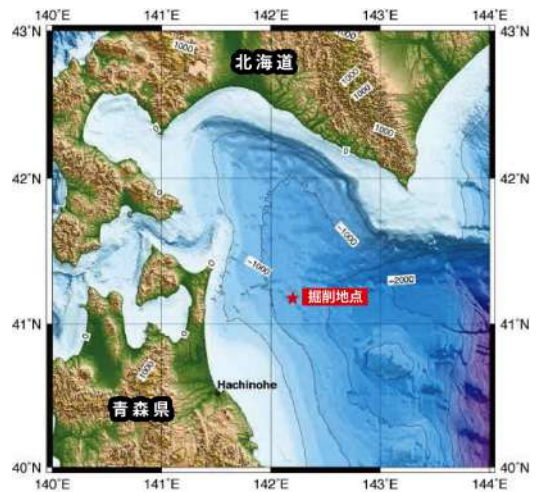


図2 IODP第337次研究航海の掘削地点C0020（青森県八戸市の沖合約80 km、水深1,180 m）。

に、嫌気条件下におけるバッチ式培養法や水質処理工学に用いられているリアクター培養技術を用いて、メタン菌をはじめとする複数の嫌気性微生物が分離・培養されている (Imachi *et al.*, 2011 ; Miyazaki *et al.*, 2012 ; Takai *et al.*, 2013)。

下北八戸沖の肥沃な海底下生命圏を支える環境条件とは何か？まず、第四紀から現世にかけての、表層海水中の基礎生産量および堆積速度が極めて高く (Aoike *et al.*, 2010 ; Domitsu *et al.*, 2010)、海水から堆積物への栄養基質の供給フラックスが高いことが要因の一つとして考えられる。本環境条件は、堆積物に含まれる有機物量と細胞数が正の相関を示す (Lipp *et al.*, 2008) ことや、海水中のクロロフィル濃度および堆積速度と細胞数の地理的分布が正の相関を示す (Kallmeyer *et al.*, 2012) ことと整合的である。また、本海域の地震波探査 (Taira & Curewitz, 2005) や石油公団による三陸沖基礎試錐の結果などから、北海道南部から下北半島沖の海底下に古第三紀始新世から上部白亜系にかけて形成された複数の石炭層の広域分布が示唆されている (大澤ら, 2000)。海底下深部に埋没した有機物が石炭層へと熟成する過程で、様々な二次的な分解産物が発生し、海底下浅部～深部にかけての微生物バイオマスおよび活性を支えている可能性が考えられる。実際に、浅部堆積物の間隙



水中のヨウ素同位体の研究から、深部石炭層を根拠とする流体・ガスの移動が示唆されている (Tomaru *et al.*, 2009). 即ち、下北八戸沖一帯の海底下には、表層海水と深部石炭の双方向に栄養供給源がある肥沃な生命圏が広がっている可能性がある。

これまでに、陸域の石炭層における数多くの有機地球化学・微生物学的研究から、たとえ熟成度の高い石炭であっても、炭質有機物の分解プロセスに、メタン菌を最終分解者とする従属栄養型微生物生態系が重要な役割を果たしていることが明らかとなっている (e.g., Brown *et al.*, 1999; Shimizu *et al.*, 2007; Strapoc *et al.*, 2008; Krüger *et al.*, 2008). しかし、海底に埋没した石炭層における微生物活動や生物地球化学的な炭素循環に関する研究は前例がなく、とりわけ下北八戸沖のように埋没後に陸に隆起していない (二次的な変成作用の影響が小さい) 石炭環境は、浅部海底堆積物に蓄積するメタンハイドレート・天然ガスの形成プロセスや、現在進行形の生物地球化学のプロセスを理解する上で重要である。また、極めて還元的な炭化水素胚胎環境において、難分解性有機物の分解プロセスに寄与する微生物およびその機能遺伝子や代謝系などを含む物質変換作用が理解されれば、将来的に有用微生物機能を利用した炭素変換システムなどの、新規微生物・遺伝子資源としての利活用・産業利用も期待できるだろう (e.g., Kobayashi *et al.*, 2008; Futagami *et al.*, 2009, 2012).

上記の下北八戸沖の地質学的セッティングや炭化水素資源環境と海底下生命圏に関する知見を踏まえ、本 IODP 第 337 次掘削調査では、2006 年の「ちきゅう」の慣熟訓練航海 CK06-06 期間中に海底下約 650 m まで掘削されたライザー孔 C9001 Hole C を 2,200 m 以上掘進し、(1) 深部石炭層を根拠とする炭化水素システムの解明、(2) 海底下深部生命圏の実態と炭素循環システムにおける役割の解明、(3) 持続的な炭素・エネルギー循環システムを創出するための基盤的・応用工学的研究、の三つの主要科学目標を掲げた (Inagaki *et al.*, 2010) (図 3).

過去半世紀の科学海洋掘削において、コア試料

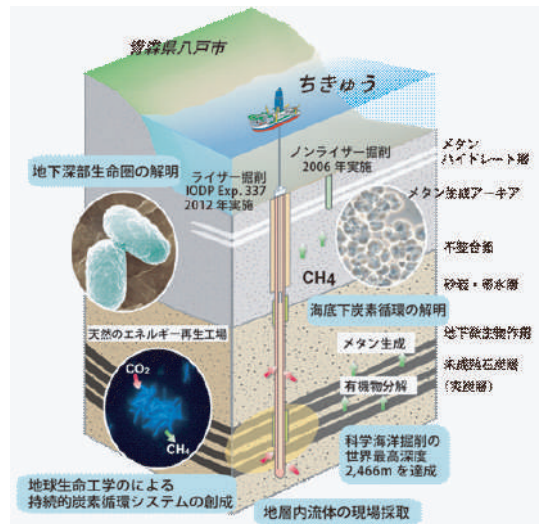


図 3 下北八戸沖石炭層生命圏掘削調査の科学目標と概要図。

の生命科学研究によって確認された最深部の海底下生命は、ODP Leg 201 によってニューファンドランド沖で掘削された深度 1,626 m (Roussel *et al.*, 2008) であり、未だ海底下生命圏の深度限界については未解明である。本航海の「ちきゅう」のライザー掘削を用いたオペレーションが達成されれば、大陸沿岸の海底下生命圏の空間規模を把握する上で、科学的に重要な分析試料が採取されることになる。即ち、地球内部における「生命活動および生命圏の限界」を規定する環境要因等について、新たな発見と考察が期待できる。

### 3. 「ちきゅう」のライザー掘削による地球科学・生命科学を实践するための新しい試み

本航海は、海底下 1,000 m を超える大深度地下圏における炭素循環と生命活動の解明を主要科学目標に定めた、世界で初めてのライザー掘削による海底下生命圏調査である。本航海では、(掘削時において) 科学海洋掘削における世界最高到達深度となる 2,466 m までのコア・カッティングス試料の採取に成功した (Inagaki *et al.*, 2012)。さらに、天然ガス成分の連続的なりアルタイム同位体組成分析、詳細な孔内検層や地下水・ガス試料の現場採取など、「ちきゅう」船上の研究区画におい

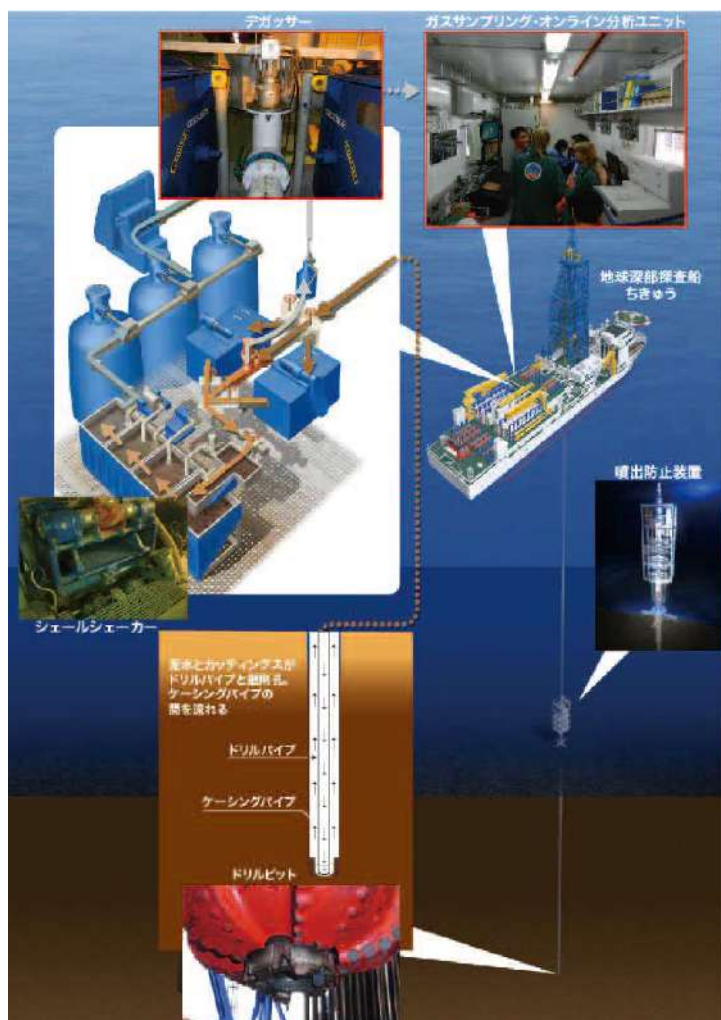


図4 IODP第337次研究航海から「ちきゅう」に新たに整備されたマッドガスモニタリングラボ(写真左).ライザー掘削に用いる泥水ラインに脱ガス装置(デガッサー:写真右)から泥水に含まれるガス成分をラボ内に引き入れ,その地球化学的特徴をリアルタイムで測定し,真空ラインを用いてサンプリングすることが可能.ラボ内には,四重極型質量分析計,GC-FID・TCD,メタン炭素同位体分析装置が常設されており,他にも分岐ラインを通じて持ち込み機器を追加設置できる.

て,多くの新しい試みが行われた.

・マッドガスモニタリング(リアルタイム地球化学分析)

ライザー掘削では孔井から戻って来た掘削泥水に含まれるガス成分(マッドガス)を,船上で脱ガスし,リアルタイムで化学分析することが可能である。「ちきゅう」のライザー掘削に伴うマッドガスの化学分析は,南海トラフで行われたIODP第319次航海で初めて試みられたが(Expedition 319 Scientists, 2010),泥水流路に設置したデガッサーの位置や分析機器の設置条件など,様々な改善点が指摘されていた.下北八戸沖で行われた

IODP第337次掘削調査は,炭化水素胚胎環境が掘削調査対象であり,マッドガスの連続的かつ詳細な地球化学分析は,船上における極めて重要な一次データとなることが予想された.そのため,「ちきゅう」専用のシステムを新たに開発・整備してライザー掘削を実施した(図4).まず,掘削泥水が孔井から戻って来た直後に,泥水が地上の空気に触れるのを最小限に抑える場所にデガッサー(脱ガス装置)を設置した.また,船上にマッドガスの化学分析専用のコンテナラボを設置し,デガッサーにより取り出されたガスを直接コンテナラボに引き入れ,フローラインから測定装置や

サンプリングラインに分岐できる機能を整備した。マッドガスのリアルタイムの化学分析機器として、質量数 200 まで測定可能な四重極型質量分析計、水素炎イオン化型検出器と熱伝導度型検出器を装備したガスクロマトグラフ、メタン炭素同位体分析装置を常設分析機器として整備した。さらに、IODP 第 337 次掘削調査では、ラドン濃度測定装置をガスラインに連結し、連続自動測定を試みた。とりわけ、本航海で実施したメタン炭素同位体のリアルタイム測定は、海底下におけるメタンの生成過程（微生物起源や熱分解起源など）を示す指標として、極めて重要なデータとなった。測定されたメタンの炭素同位体組成は、 $-60\text{‰}$  ~  $-80\text{‰}$  と比較的軽い値を示し、海底下 2,400 m を超える深度においても、天然ガス（メタン）の生成プロセスに微生物活動が関与していることが示唆された (Inagaki *et al.*, 2012)。この結果は、同様の指標となるマッドガスの C1/C2 比や、メタンの水素同位体組成、コア試料中の微生物学的研究成果と併せて、海底下深部における微生物の活動と炭素循環の解明につながることを期待される。また、「ちきゅう」船上で取得されたリアルタイム地球化学分析は、科学的に重要な深度における陸上分析用ガス試料の正確なサンプリングに対して有効であるばかりでなく、スポットコアによるコアリングギャップ（コア採取が行われていない深度区間）を補填するデータソースとして、今後の科学海洋掘削の展開に重要な役割を果たすことが期待される。

#### ・アイソバン実験室（非密封放射性基質実験室）

通常の化学成分分析や安定同位体を用いたトレーサー分析では検出が不可能な、海底下深部に生息する微生物の微弱な代謝活動や生物地球化学的な元素循環を理解するには、非密封放射性基質をトレーサーとして用いた活性測定分析が有効（もしくは定量評価が可能な唯一の手法）である。実際に、表層堆積物の放射性トレーサーを基質として用いた活性測定等の結果から、海底下微生物の数十年～数千年をかけた驚くべき世代交代時間

や、地質学的時間スケールの生物学的炭素・硫黄循環の存在が明らかとなっている (D'Hondt *et al.*, 2002, 2004 ; Hoehler & Jørgensen, 2013)。本実験系は、掘削されたコア試料の劣化やコンタミネーションなどの二次的要因を最小限にするために、船上にて直ちに新鮮な試料を処理する必要がある。IODP 第 337 次研究航海では、従来「ちきゅう」船上では行うことができなかった非密封放射線源を用いたトレーサー実験を行うために、専用のコンテナラボ（アイソバン実験室）を整備・搭載した。本アイソバン実験室は、 $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{32}\text{P}$ 、 $^{33}\text{P}$ 、 $^{35}\text{S}$  を用いた実験を行うのに必要な遮蔽能力を持ち、ドラフトチャンパー内での放射性同位体基質の添加からインキュベーション、液体シンチレーションカウンターを用いた測定までの一連の作業を行うことが可能である。IODP 第 337 次掘削調査では、 $^{14}\text{C}$  と  $^{35}\text{S}$  で標識された複数の基質をトレーサーとして用い、海底下深部堆積物環境に生息する微生物の炭素・硫黄代謝活性測定を実施した。

#### ・バイオマーカー分析

海底下深部に埋没した石炭層を根拠とする炭化水素システムを理解する上で、堆積物に含まれる有機物の起源と熟成度（石炭を含む）の指標となる脂質バイオマーカーや炭化水素化合物の成分分析は、極めて重要な環境記載情報である。IODP 第 337 次掘削調査では、主に植物を含む真核生物由来と考えられるリン脂質脂肪酸 (PLFAs) やアーキアおよびバクテリアの指標となる極性脂質 (IPLs) およびその派生物等を船上ラボで直接コア・カッティング試料から抽出し、質量分析器を用いた定性分析を実施した。また、ロックイーバルを用いた有機物試料の熟成度分析は、石炭の形成過程を示す指標を与えた。本分析は、ライザー掘削に用いられる泥水アスファルト成分のコンタミネーションを評価する上でも重要であった。

#### ・地層流体試料採取

海底下 1,000 m を超える大深度の堆積岩は固結が進んでおり、孔隙率も小さいため、従来のマン

コア採取深度区間	海底下 1,276.5–2,466.0 m
スポットコアの回数	32
フルリカバリー（回収率>90%）の回数	12
平均コア回収率	76.5%
全コア長	200.1 m

表1 IODP第337次研究航海における「ちきゅう」のライザー掘削によるコアリングの成果。

ハイム式油圧シリンダーを用いて間隙水を直接採取することは極めて困難である。IODP 第 337 次掘削調査では、従来法によるコア試料からの間隙水抽出に加え、Schlumberger 社の Quicksilver プローブを用いた地層流体の直接採取を試みた。本航海で行われたワイヤライン検層および地層流体採取の試みについての詳細は、本特集号中の別報（山田ほか）を参照されたい。

#### ・外部汚染（コンタミネーション）の評価

「ちきゅう」のライザー掘削は、ノンライザー掘削ではアクセス不可能な大深度環境や炭化水素濃縮域からの試料採取が可能である。即ち、ライザー掘削を用いた科学海洋掘削調査は、これまでに科学のメスが入っていない未到のフロンティア空間であり、それによって採取されたコア試料は、人類にとっての貴重な科学資産であると言える。特に、ライザー掘削を用いた初めての海底深部生命圏調査である本航海では、コア試料に含まれる微生物の数や活性が極度に小さい（もしくは皆無である）ことが予想されるため、掘削コア試料の外部汚染（コンタミネーション）の評価および船上における無菌的な一次処理が極めて重要である。IODP 第 337 次掘削調査では、ライザー掘削に用いる泥水タンクに化学トレーサー（Per-Fluorocarbon Tracer : PFT）を定常的に添加し、コア試料が回収された後、直ちにライナーに含まれる泥水およびコア試料内部の複数箇所のサブサンプリングを行い、ガスクロマトグラフによる PFT 濃度を測定することで、掘削泥水からのコンタミネーションを評価した。PFT を使ったコンタミネーション評価は、従来ノンライザーのコアリングで用いられてきた手法であるが（Smith *et al.*, 2000 ; Lever *et al.*, 2006）、循環泥水中の PFT 濃度のコントロールや、ベントナイト等からなる人工

泥水構成物に対する PFT の吸着・溶出効率に基づく分析プロトコルの最適化など、ライザー掘削特有の改良・改善を試みた。さらに本航海では、PFT によるコンタミネーション評価に加えて、コア試料の分子生物学的分析を行う際に汚染源となる複数のネガティブコントロール（例えば、泥水やラボ環境のブランクサンプルなど）を網羅的に採取することで、現場に固有の生物・化学シグナルを選定・推定する分析アプローチを試みた。また、微生物学や有機地球化学などの分析に用いる試料は、船上の X 線 CT スキャンによってクラックや泥水の混入状態を評価し、可能な限り掘削による攪乱や泥水のコンタミネーションが少ない箇所を選定して試料採取を行った。ライザー掘削によるコア試料の構造攪乱や泥水の浸透については、本特集号の別報（村山ほか）を参照されたい。

#### 4. ライザー掘削のコアリング実績と堆積学的特徴

本 IODP 第 337 次掘削調査では、ライザー掘削によって泥水と共に船上に運ばれてくるカッティングスを、深度 600～2,466 m の区間において、約 180 試料採取した（洗浄したものと、そうでないものを含め、10 m 深度ごとに、約 360 試料が採取され、高知コアセンターにて保管・管理されている）。さらに、深度 1,276.5～2,466 m の区間において、32 回のスポットコアリングを行い、12 回が 90% 以上の高い回収率であった。平均コア回収率は 76.5%、全コア長は 200.1 m であった（表 1）。

特筆すべきは、比重および粘性の高いライザー泥水によってコアが包まれて回収されるため、通常の海水ベースのノンライザー掘削では回収がほぼ不可能である未固結の砂層（例えば、ビーチサンドのような砂層に、極めて有機物含有量が高いラミナが発達した地層など）が回収されたことで



			
特徴	深海で形成された地層 (二枚貝や巻き貝の化石 が含まれる堆積物)	石炭層 (厚さ7mの褐炭層の一部)	浅海～陸で形成された地層 (砂岩に石炭や石灰質粒子の 薄い地層が含まれる堆積物)
採取区間 海底下 (m)	1,747-1,756.5	1,919-1,928.5	1,973-1,981.5

図5 IODP第337次研究航海で採取された代表的な堆積物コア試料の例。

ある(図5)。本結果は、将来的に大陸沿岸の堆積速度が高い地層における古環境変動や生命科学研究にとって重要なライザー掘削のパフォーマンスである。

本ライザー掘削によって採取されたカッティングスやコア試料について、船上における肉眼観察やスミアスライド観察による堆積学的特徴の記載を行った。その結果、岩層から4つに区分される堆積環境(Unit I-IV)が確認された(Inagaki *et al.*, 2012)(図6)。

Unit I: [遠洋(または深海底)] 岩相は珪質シルト岩を主とし、珪藻や海綿骨針を多産する。有孔虫やナノプランクトンなどの微化石も確認された。

Unit II: [浅海] 岩相はシルト質頁岩を主とし、砂岩、シルト岩層を含む。深度とともに珪藻や海綿骨針の産出が減り、鉄の酸化物を含む陸源性のマイカ鉱物である海緑石や鉄の炭酸塩(シデライト)を含むようになる。含有量10%程度の木片を含む層も観察された。

Unit III: [潮間帯および低湿地帯域] 岩相は石炭層を含む有機質頁岩、砂岩、泥岩を主とする。亜炭や褐炭を多く産出し、黄鉄鉱が点にあるいは脈状に介在していた。各石炭層の上位に炭酸塩のセメントやノジュール(一部はシデライトと同定された)が良く観察された。砂層やシルト層では、ラミナの発達した堆積構造も確認された。

Unit IV: [湿地帯] 岩相は、砂岩、泥岩や薄い石炭層を介在するシルト質頁岩、木片がよく観察された。珪藻や海綿骨針等の珪質微化石はほとん

ど産出しなかった。深度2,100～2,300 mでは、海緑石がよく観察された。Unit III同様、石炭層と炭酸塩のセメントやノジュールが観察された。

なお、本航海で得られた試料の堆積年代は、船上の珪藻や渦鞭毛藻類の珪質微化石群集の観察結果から、新生代の鮮新世～中新世と推定され、古第三紀漸新世や始新世を示す指標化石は観察されなかった。本結果は、中新世(約500～2300万年前)の日本列島形成時において、河川の影響を受ける湿原・湿地帯もしくは遠浅の干潟や塩沼のような堆積環境が縁辺域に広く存在し、地層の沈降と堆積速度が均衡した状態が長く続いた可能性を示唆している。一方、1999年にサイトC0020の約50 km南方にて行われた三陸沖基礎試錐では、C0020における深度約2,000 mに該当する深度に、幌内層・石狩層群に相当する始新世の石炭層が産出しており、本船上分析の結果と矛盾する結果となっており(大澤ら, 2000)。広域・局所域における地質形成史の解釈や堆積物年代について、さらなる精査が必要である。本掘削航海では、全体的にコア試料に含まれる珪質微化石群集の数が少ないため、現在、堆積物に含まれる貝化石のストロンチウム同位体等を用いて、複数の年代指標の分析による精度の高い年代測定を試みている。

## 5. 「ちきゅう」による地球深部生命の解明にむけて：宇宙生物学の視点から

地球内部における生命圏の拡がりや生命生息条



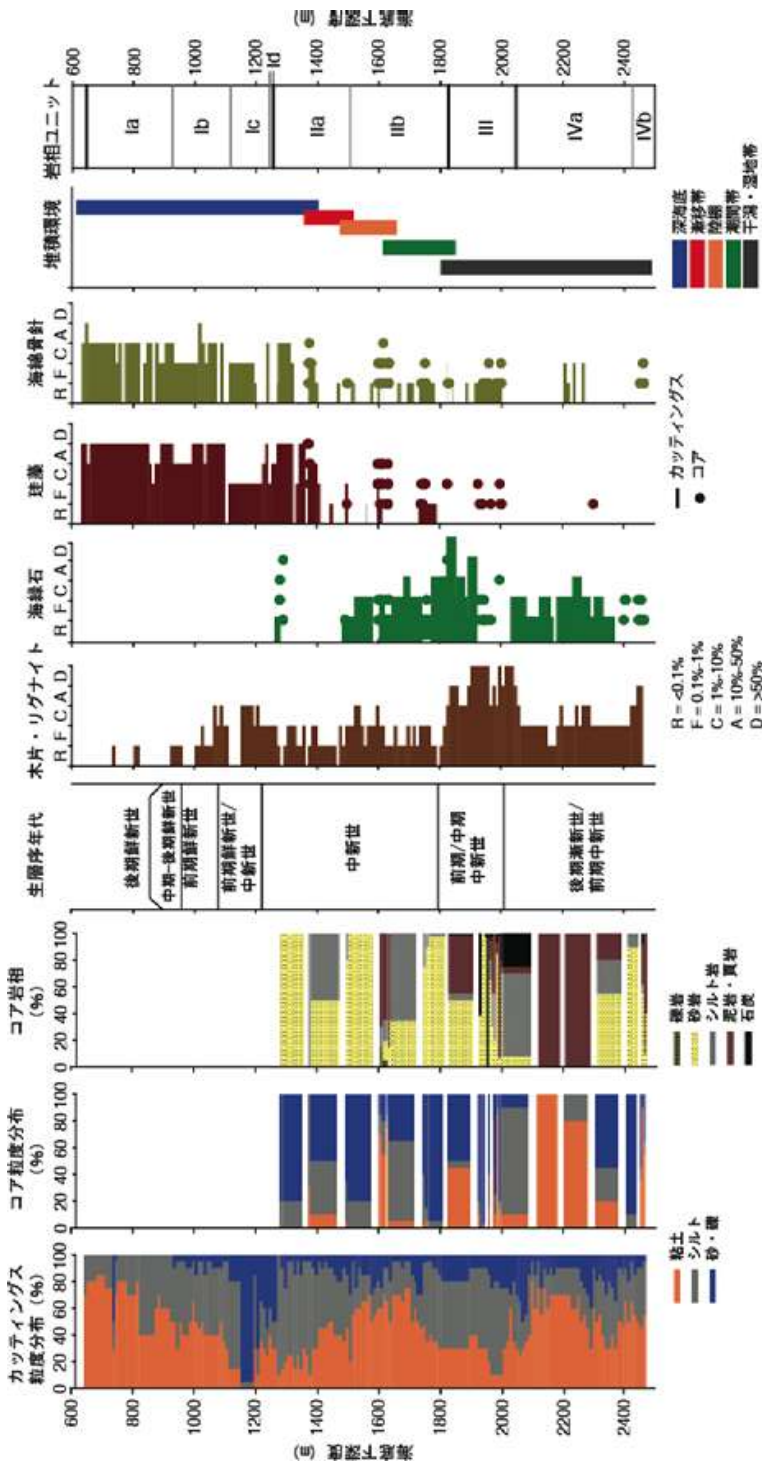


図6 IODP 第337次研究航海によって採取されたカッティンガスおよびコア試料から推定される堆積年代と堆積環境の特徴。陸源環境の特徴、陸源環境の影響を強く受ける低湿地帯で形成された泥岩・石炭(褐炭)やピーチサンドを含む堆積層やシルト質頁岩や砂岩からなる浅海性の堆積層が沈降し、珪質シルト岩を主体とする深海性の堆積層が形成されていることが示唆された。

件は何か？

この問いは、海底下深部や陸域の地下生命圏を対象とした地球科学・生命科学分野のみならず、90年代から米国を中心に発展してきた宇宙生物学（アストロバイオロジー）の分野にも共通する科学的な大命題の一つであろう。地球外惑星（または惑星ではない天体物）における生命存在の可能性や生命生息条件（ハビタビリティ）の追究は、宇宙における地球型生命の構成元素（例えば水素・炭素・窒素・酸素など）や水・有機物の存在に関する研究とならび、宇宙生物学における主要な科学テーマとなっている。一方、地球以外の生命に遭遇した経験がない人類にとって、それらの議論の多くは、人類が体系化してきた地球（型）生命の生理・生態学に基づく主観的なものである。即ち、地球惑星環境と地球生命の双方に関する知の集積とシステム化こそが、その命題に対する答えを導き出す最も具体的で、現実的なアプローチと考えることができる。

ある地球外惑星における生命の可能性を議論する際、「(地球型) 生命の生息可能条件」と「そこに生命が存在すること」は、しばしば混同されるが、必ずしも同一の議論ではない (Hochler, *et al.*, 2007)。即ち、その惑星環境に地球型の生命が生息できる環境条件がそろっていても、そこに生命が存在する保証や可能性について、万人が納得する学術的な根拠や統計学的に有意な数値を導き出すことは困難である。その理由は、初期地球環境に自己複製可能な生命物質が構成され、その機能を変化させつつ存続する初生メカニズムに関する知見や証拠が極めて限られているからである。これは、地球上に初期生態系ができる以前の、「生命の起源と存続」に関する根幹的な問題であり、この命題が解決しない限りは、宇宙における地球外生命の存在に関する議論は机上の空論の域を出ない。即ち、まず、海洋および地球の成り立ちや生命の起源・進化、そして地球惑星環境における生命生息可能条件をより詳細に理解し、そのためのサンプル採取・分析手法を確立することが実質的なアプローチと考えられる。そして、その追究の

先には、地球惑星にとらわれない万物に共通するパラダイム（概念）や科学的法則にたどり着く可能性があり、宇宙生命探査を具現化させる科学的な根拠や学術理論を提供することができるだろう。他方、地球外環境における生命の生息可能条件の議論は、将来その環境を地球生命の生息環境として利用する宇宙生命工学的な見地において、利己的でありながらも論理が通った構想や議論がある。

上記の観点からも、地球深部探査船「ちきゅう」のライザー掘削を活用した科学海洋掘削が、今後の生命科学の進展にとって果たすべき役割や可能性は計り知れない。約半世紀におよぶ掘削地球科学が蓄積してきた地球科学的データは、地球内部環境における生命の生息可能条件をシステムティックに理解する上で極めて有用な情報源かつ最強のビッグデータストレージである。「ちきゅう」のライザー掘削の科学適用は、掘削孔や海底ケーブル網を活用した長期観測によって得られるデータと合わせ、その調査空間やデータ量を大幅に拡大する能力がある。特に、採取された試料に対して、その地層が形成された年代や地質学的・地球化学的背景に関する四次元的（生息空間と時間軸）な情報が集積されることは、その環境に生息する微生物群集のバイオマス・多様性・代謝活性とその進化プロセスを規定する環境要因を明らかにする上で不可欠な要素である (Banfield & Marshall, 2000)。将来的に、掘削地球科学におけるデータベース分析（ジオインフォーマティクス）と、生命科学におけるデータベース分析（環境ゲノムを含むバイオインフォーマティクス）を融合し、惑星規模の新しい地球生命情報解析（ジオバイオインフォーマティクス）の展開が期待される。人類がアクセス可能なあらゆる宇宙・地球環境において、科学海洋掘削を通じた国際プロジェクトは、最先端の地球科学・生命科学の融合により、人類にとって重要な科学的な大命題の解決へと導く挑戦的かつ実践的なアプローチなのである。

一方、「ちきゅう」のライザー掘削により採取される貴重かつ希少なコア試料は、表層海水や掘削



図7 独立行政法人海洋研究開発機構高知コア研究所のクリーンルーム内に整備された超高空間分解能二次イオン質量分析器NanoSIMS 50L (右)とシングルセル分析ラボ(左)。人類の科学資産とも言える希少かつ貴重な試料の微小領域の元素・同位体組成や単一細胞レベルの生命シグナルについて、地球惑星科学と生命科学を融合した最先端分析研究の進展が期待される。

泥水などの外部汚染（コンタミネーション）を限りなく排除した、科学分析のための高い品質を保持したものでなければならない。さらに、地球表面とは全く異なる海底下深部の特性を正確に分析するには、船上におけるコンタミネーションの評価や除去と同時に、現場の状態を維持しつつ、高度な分析を可能にするためのサブサンプリングや一次処理に関する基礎技術を確認し、その環境が船上のラボに整備されなければならない（Masui *et al.*, 2008, 2009）。実際に、海底下深部の堆積物や岩石内の微小空間に生息する微生物細胞を正確に検出し、そのバイオマスを正確に測定し、代謝活性や分子生物学の特徴を分析することは容易なことではなく、基礎的な手法論の開発が不可欠であった（Morono *et al.*, 2009, 2013）。即ち、今後の「ちきゅう」を用いた地球科学・生命科学の進展には、地球外生命探査に通ずるインタクトな現場試料の採取・分析技術の開発・適用が鍵を握っている。

本稿で概説したIODP第337次研究航海「下北八戸沖石炭層生命圏調査」では、上述のように、「ちきゅう」のライザー掘削の特徴を最大限に活用すべく、「マッドガス地球化学ラボ」や「アイソパン実験室」、有機地球化学や微生物学に用いられる様々な試料処理・実験機器を整備し、過去に例のないコアフローを実践した。さらに、ライザー

孔を通じた詳細な検層と地層流体の現場採取を行った。今後、本航海の様々な新しい試みをはじめとして、「ちきゅう」の科学掘削パフォーマンス・船上分析・検層・現場観測能力が絶え間なく改善・強化される必要がある（Ravelo *et al.*, 2010）。さらに、コア試料の分析を担う陸上研究施設においては、科学的に希少かつ重要な微小領域（例えば、ナノレベル・単一細胞レベルなど）の地球科学・生命科学融合分析手法の確立や、現場環境を再現・利活用するための地球生命工学的な実験・分析系が必要となるだろう（図7）。現在、下北八戸沖の海底下深部掘削試料は、海洋研究開発機構高知コア研究所をはじめとする世界各地の研究機関で、微生物学・有機地球化学・分子生物学・物理特性・古環境学・堆積学・地球工学など、さまざまな分野における最先端の実験・分析が進められており、将来の掘削地球科学・生命科学や宇宙生物学に新境地を切り開くことが期待される。

本稿を執筆するにあたり、IODP第337次研究航海乗船者一同に深く敬意を表します。IODP第337次研究航海および同航海で得られた試料の分析研究の一部は、文部科学省・日本学術振興会による最先端研究基盤事業「海底下実環境ラボの整備による地球科学—生命科学融合拠点の強化（「ちきゅう」を活用）」（平成22～24年度、海洋研究開

発機構, 研究代表: 稲垣史生) および最先端次世代・研究支援プログラム「エネルギー再生型海底下 CO<sub>2</sub> 地中隔離 (バイオ CCS) に関する地球生命工学的研究」(平成 22~25 年度, 海洋研究開発機構, 研究代表: 稲垣史生) により実施されています。

## 参考文献

- [ 1 ] Aoiike, K., Nishi, H., Sakamoto, T., Iijima, K., Tsuchiya, M., Taira, A., Kuramoto, S., Masago, H. & the Shimokita Core Research Group. (2010) : Paleogeographic history of offshore Shimokita Peninsula for the past 800,000 years based on primary analyses on cores recovered by D/V Chikyu during the shakedown cruises. *Fossils*, 87, 65-81.
- [ 2 ] Bach, W., Ravelo, C., Behrmann, J., Camoin, G., Duncan, R., Edwards, K., Gulick, S., Inagaki, F., Palike, H. & Tada, R. (2010) : IODP New Ventures in Exploring Scientific Targets (INVEST) : Defining the new goals of an international drilling program. *Scientific Drilling*, 9, 54-64.
- [ 3 ] Banfield, J. F. & Marchall, C. R. (2000) : Genomics and the Geosciences. *Science*, 287, 605-606.
- [ 4 ] Biddle, J. F., Fitz-Gibbon, S., Schuster, S. C., Brenchley, J. E. & House, C. H. (2008) : Metagenomic signatures of the Peru Margin seafloor biosphere show a genetically distinct environment. *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.*, 105, 10583-10588.
- [ 5 ] Brown, C. J., Coates, J. D. & Schoonen, M. A. A. (1999) : Localized sulfate-reducing zones in a coastal plain aquifer. *Ground Water*, 37, 505-516.
- [ 6 ] D'Hondt, S., Rutherford, S. D. & Spivack, A. J. (2002) : Metabolic activity of subsurface life in deep-sea sediments. *Science*, 295, 2067-2070.
- [ 7 ] D'Hondt, S., Jørgensen, B. B., Miller, D. J., Batzke, A., Blake, R., Cragg, B. A., Cypionka, H., Dickens, G. R., Ferdelman, T., Hinrichs, K.-U., Holm, N. G., Mitterer, R., Spivack, A., Wang, G., Bekins, B., Engelen, B., Ford, K., Gettemy, G., Rutherford, S. D., Sass, H., Skilbeck, C. G., Aiello, I. W., Guerin, G., House, C., Inagaki, F., Meister, P., Naehr, T., Niitsuma, S., Parkes, R. J., Schippers, A., Smith, D. C., Teske, A., Wiegand, J., Padilla, C. N. & Acosta, J. L. S. (2004) : Distributions of metabolic activities in deep seafloor sediments. *Science*, 306, 2216-2200.
- [ 8 ] D'Hondt, S., Inagaki, F., Ferdelman, T. G., Jørgensen, B. B., Kato, K., Kemp, P., Sobczyk, P., Sogin, M. & Takai, K. (2007) : Exploring seafloor life with the Integrated Ocean Drilling Program. *Scientific Drilling*, 5, 26-37.
- [ 9 ] D'Hondt, S., Spivack, A. J., Pockalny, R., Ferdelman, T. G., Fisher, J. P., Kallmeyer, J., Abrams, L. J., Smith, D. C., Graham, D., Hasiuk, F., Schrum, H. & Stancin, A. M. (2009) : Subseafloor sedimentary life in the South Pacific Gyre. *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.*, 106, 11651-11656.
- [10] Domitsu, H., Nishi, H., Uchida, J., Oda, M., Ogane, K., Taira, A., Aoiike, K. & the Shimokita Microfossil Research Group. (2010) : Age model of core sediments taken by D/V Chikyu during the shakedown cruises off Shimokita Peninsula. *Fossils*, 87, 47-64.
- [11] Expedition 319 Scientists. (2010) : Site C0009. In Saffer, D., McNeill, L., Byrne, T., Araki, E., Toczko, S., Eguchi, N., Takahashi, K. & the Expedition 319 Scientists. *Proceedings of IODP*, 319. doi:10.2204/iodp.proc.319.103.2010.
- [12] Futagami, T., Morono, Y., Terada, T., Kaksonen, A. H. & Inagaki, F. (2009) : Dehalogenation activities and distribution of reductive dehalogenase homologous genes in marine subsurface sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 75, 6905-6909.
- [13] Futagami, T., Morono, Y., Terada, T., Kaksonen, A. H. & Inagaki, F. (2012) : Distribution of dehalogenation activity in seafloor sediments of the Nankai Trough subduction zone. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 368, 20120249.
- [14] Hinrichs, K.-U. & Inagaki, F. (2012) : Downsizing the deep biosphere. *Science*, 338, 204-205.
- [15] Hoehler, T. M., Amend, J. P. & Shock, E. L. (2007) : A "Follow the Energy" approach for Astrobiology. *Astrobiology*, 7, 819-823.
- [16] Hoehler, T. M. & Jørgensen, B. B. (2013) : Microbial life under extreme energy limitation. *Nature Reviews Microbiology*, 11, 83-94.
- [17] Imachi, H., Aoi, K., Tasumi, E., Saito, Y., Yamanaka, Y., Saito, Y., Yamaguchi, T., Tomaru, H., Takeuchi, R., Morono, Y., Inagaki, F. & Takai, K. (2011) : Cultivation of methanogenic community from seafloor sediments using a continuous-flow bioreactor. *The ISME Journal*, 5, 1913-1925.
- [18] Inagaki, F., Nunoura, T., Nakagawa, S., Teske, A., Lever, M., Lauer, A., Suzuki, M., Takai, K., Delwiche, M., Colwell, F. S., Nealson, K. H., Horikoshi, K., D'Hondt, S. & Jørgensen, B. B. (2006) Biogeographical distribution and diversity of microbes in methane hydrate-bearing deep marine sediments on the Pacific Ocean Margin. *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.*, 103, 2815-2820.
- [19] Inagaki, F., Hinrichs, K.-U., Kubo, Y. & the Expedition 337 Project Team. (2010) : Deep coalbed biosphere off Shimokita: microbial processes and hydrocarbon system associated with deeply buried coalbed in the ocean. *IODP Scientific Prospectus*, 337. doi:10.2204/iodp.sp.337.2010.
- [20] Inagaki, F., Hinrichs, K.-U., Kubo, Y. & the Expedition 337 Scientists. (2012) : Deep coalbed biosphere off Shimokita : microbial processes and hydrocarbon system associated with deeply buried coalbed in the ocean. *IODP Preliminary Report*, 337. doi:10.2204/iodp.pr.337.2012.
- [21] Kallmeyer, J., Pockalny, R., Adhikari, R. R., Smith, D. C. & D'Hondt, S. (2012) : Global distribution of microbial abundance and biomass in seafloor sediment. *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.*, 109, 16213-16216.



- [22] Kobayashi, T., Koide, O., Mori, K., Shimamura, S., Matsuura, T., Miura, T., Takaki, Y., Morono, Y., Nunoura, T., Imachi, H., Inagaki, F., Takai, K. & Horikoshi, K. (2008) : Phylogenetic and enzymatic diversity of deep seafloor aerobic microorganisms in organics- and methane-rich sediments off Shimokita Peninsula. *Extremophiles*, 12, 519-527.
- [23] Krüger, M., Beckmann, S., Engelen, B., Thielemann, T., Cramer, B., Schippers, A. & Cypionka, H. (2008) : Microbial methane formation from hard coal and timber in an abandoned coal mine. *Geomicrobiology Journal*, 25, 315-321.
- [24] Lipp, J. S., Morono, Y., Inagaki, F. & Hinrichs, K.-U. (2008) : Significant contribution of Archaea to extant biomass in marine subsurface sediments. *Nature*, 454, 991-994.
- [25] Masui, N., Morono, Y. & Inagaki, F. (2008) : Microbiological assessment of circulation mud fluids during the first operation of riser drilling by the deep-earth research vessel Chikyu. *Geomicrobiol. Journal*, 25, 274-282.
- [26] Masui, N., Morono, Y. & Inagaki, F. (2009) : Bioarchive core storage and subsampling procedure for seafloor molecular biological research. *Scientific Drilling*, 8, 35-37.
- [27] Miyazaki, M., Koide, O., Kobayashi, T., Mori, K., Shimamura, S., Nunoura, T., Imachi, H., Inagaki, F., Nagahama, T., Nogi, Y., Deguchi, S. & Takai, K. (2012) : *Geofilum rubicundum* gen. nov., sp. nov., isolated from deep seafloor sediment. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 62, 1075-1080.
- [28] Morono, Y., Terada, T., Masui, N. & Inagaki, F. (2009) Discriminative detection and enumeration of microbial life in marine subsurface sediments. *The ISME Journal*, 3, 503-511.
- [29] Morono, Y., Terada, T., Nishizawa, M., Hillion, F., Ito, M., Takahata, N., Sano, Y. & Inagaki, F. (2011) Carbon and nitrogen assimilation of deep seafloor microbial cells. *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.*, 108, 18295-18300.
- [30] Morono, Y., Terada, T., Kallmeyer, J. & Inagaki, F. (2013) : An improved cell separation technique for marine subsurface sediments : applications for high-throughput analysis using flow cytometry and cell sorting. *Environmental Microbiology*, 15, 2841-2849.
- [31] 大澤正博, 中西敏, 棚橋学, 小田浩 (2000) 三陸~日高沖前弧堆積盆の地質構造・構造発達史とガス鉱床ポテンシャル, 石油技術協会誌, 67, 38-51.
- [32] Ohtomo, Y., Ijiri, A., Ikegawa, Y., Tsutsumi, M., Imachi, H., Uramoto, G., Hoshino, T., Morono, Y., Sakai, S., Saito, Y., Tanikawa, W., Hirose, T. & Inagaki, F. (2013) : Biological CO<sub>2</sub> conversion to acetate in subsurface coal-sand formation using a high-pressure reactor system. *Frontiers in Microbiology*, 4, 361.
- [33] Parkes, R. J., Cragg, B. A., Bale, S. J., Getliff, J. M., Goodmaan, K., Rochelle, P. A., Fry, J. C., Weightman, A. J. & Harvey, S. M. (1994) : Deep bacterial biosphere in Pacific Ocean sediments. *Nature*, 371, 410-413.
- [34] Parkes, R. J., Cragg, B. A. & Wellsbury, P. (2000) : Recent studies on bacterial populations and processes in seafloor sediments: A review. *Hydrogeology Journal*, 8, 11-28.
- [35] Ravelo, C., Bach, W., Behrmann, J., Camoin, G., Duncan, R., Edwards, K., Gulick, S., Inagaki, F., Palike, H. & Tada, R. (2010) : INVEST Report: IODP New Ventures in Exploring Scientific Targets (INVEST) - Defining The New Goals of an International Drilling Program. Scientific Planning Conference at Bremen, 2009, 22-25 September, 160 pp.
- [36] Roussel, E. G., Cambon Bonavita, M. -A., Querellou, J., Cragg, B. A., Webster, G., Prieur, D. & Parkes, J. R. (2008) : Extending the sub-sea-floor biosphere. *Science*, 320, 1046.
- [37] Schrag, D. P. (2009) : Storage of carbon dioxide in offshore sediments. *Science*, 325, 1658-1659.
- [38] Shimizu, S., Akiyama, M., Naganuma, T., Fujioka, M., Nako, M. & Ishijima, Y. (2007) : Molecular characterization of microbial communities in deep coal seam groundwater of northern Japan. *Geobiology*, 5, 423-433.
- [39] Smith, D. C., Spivack, A. J., Fisk, M. R., Haveman, S. A. & Staudigel, H. (2000) : Tracer-based estimates of drilling-induced microbial contamination of deep sea crust. *Geomicrobiology Journal*, 17, 207-219.
- [40] Strapoc, D., Picardal, F. W., Turich, C., Schaperdoth, I., Macalady, J. L., Lipp, J. S., Lin, Y. -S., Ertefai, T. F., Schubotz, F., Hinrichs, K.-U., Mastalerz, M. & Schimmelmann, A. (2008) : Methane-producing microbial community in a coal bed of the Illinois basin. *Applied and Environmental Microbiology*, 74, 2424-2432.
- [41] Taira, A., and Curewitz, D. (Eds.) (2005) : Shimokita area site survey: Northern Japan Trench seismic survey, Northern Honshu, Japan. CDEX Technical Report, 2. Yokohama (CDEX-JAMSTEC).
- [42] Takai, K., Abe, M., Miyazaki, M., Koide, O., Nunoura, T., Imachi, H., Inagaki, F. & Kobayashi, T. (2013) *Sunxiuqinia faeciviva* sp. nov., a facultatively anaerobic organoheterotroph of the Bacteroidetes isolated from deep seafloor sediment. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 63, 1602-1609.
- [43] Tomaru, H., Fehn, U., Lu, Z., Takeuchi, R., Inagaki, F., Imachi, H., Kotani, R., Matsumoto, R. & Aoike, K. (2009) : Dating of dissolved iodine in pore waters from the gas hydrate occurrence offshore Shimokita Peninsula, Japan : 129I results from the D/V Chikyu Shakedown Cruise. *Resource Geology*, 59, 359-373.
- [44] Whiticar, M. J. (1999) : Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chemical Geology*, 161, 291-314.
- [45] Whitman, W. B., Coleman, D. C. & Wiebe, W. J., 1998. Prokaryotes : the unseen majority. *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.*, 95, 6578-6583.

