



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

Exp. 307 : 解き明かされた深海 サンゴマウンドの謎

狩野 彰 宏

Exp. 307 : Unveiled mysteries of deep-sea coral mounds

Akihiro Kano

かの あきひろ : 九州大学比較社会文化研究院

水深約 1000 m の海底に「もう 1 つのサンゴ礁」がある。Expedition 307 はアイルランド沖の深海サンゴマウンドの掘削により、その成立の謎に挑んだ。マウンドの基底部に注目が集まる中で、解決の鍵は別なところにあった。マウンド全体の Sr 同位体比年代モデルは、第四紀初めに成立した大西洋の海洋構造がサンゴ群集を育んだことを示した。

1. はじめに

生物によって作られる地球最大の構造物はサンゴ礁である。延長 3000 km にもおよぶグレートバリアリーフは宇宙空間からも認識できるほど広大だ。サンゴは 2 番目に大きい構造物も作り上げる。それは、水深 1000 m の海底に発達する「深海サンゴマウンド」である。最大級のは幅数 km、高さ 350 m にも達する (Freiwald *et al.*, 2004)。驚くべきことに、この東京ドームよりもはるかに大きい深海構造物の存在については、1990 年代まで良く知られていなかった。なぜだろうか？ Exp. 307 の計画立案者であるゲント大学の Henriët 教授は、無人潜水艇によるサンゴマウンドの探査を「ペンライト片手に暗闇のフットボールグラウンドで落としたコインを見つけるようなものだった」と当時を述懐する。枝状の冷水サンゴにより作られる深海のマウンド構造はノルウェーからモロッコ沖の北東大西洋に多数存在していた。

2000 年代に入ると、欧米の海洋科学者たちはこの深海生態系のフロンティアに一齐に挑む。深海サンゴマウンドの研究は一気に盛んになり、分布・生物群集・海底堆積物の情報が収集される。そのような状況下で計画されたのが、アイルランド沖のポーキュパイン海盆に発達するチャレンジャーマウンド (図 1) を掘削する「Expedition 307 Porcupine Basin Carbonate Mounds」である。これは深海サンゴマウンドを基盤まで貫くという初めての試みだった。

2. 乗船前の経緯

2005 年 2 月、IODP のスタッフィングを担当する

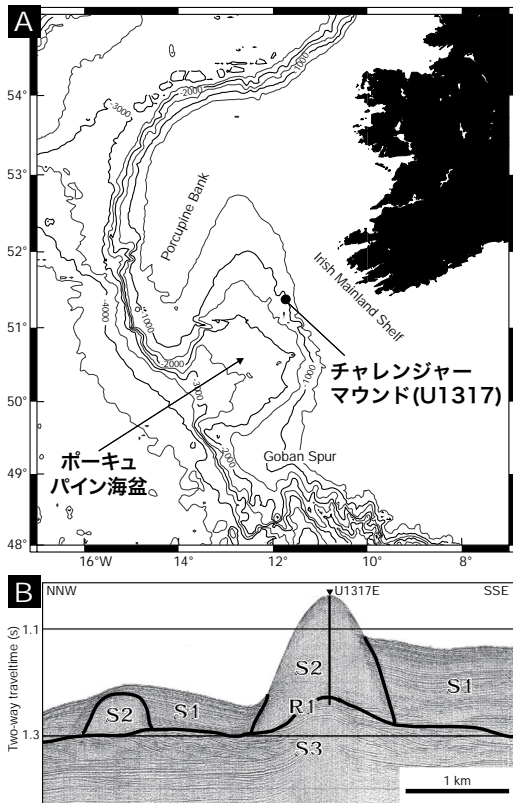


図1 アイルランド沖のポーキュパイン海盆におけるチャレンジャーマウンドの位置(A)とマウンドの地震波プロファイル(B).

知り合いのA氏から一本の電話がかかってきた。「今度、アイルランドでサンゴマウンドを掘削してみませんか。」

乗船の誘いであった。私は興味がある旨を伝えたとこ、

「そうですね助かります。狩野さんには、コーチフで乗って頂きます。少し偉い立場です。4月下旬の乗船まで時間が少ないので、色々を準備が大変ですが、よろしくお願いします。」

電話口からはA氏の安堵した表情が伺えたが、私はこれが少し無謀な快諾だった事を気付かされることになる。恥ずかしながら、この時点での私は深海掘削の経験は皆無、深海サンゴマウンドについてはわずかな知識しか持っていなかったの

ある。

翌日、出勤してみると、欧米から大量のメールが届いていた。しかも、その全てに煩雑なPDFが添付されていた。私は出来る限り冷静に、与えられた膨大な情報を整理し、対応に務めた。喫緊の作業は日本人乗船員のスタッフィング。約1週間でA氏と2人で招集されたのが、田中明子氏(産業総合研究所:地球物理担当)、佐々木圭一氏(金沢学院大学:堆積学担当)、坂井三郎氏(JAMSTEC:地球化学担当)、阿部恒平氏(筑波大学:古生物担当)、高島千鶴氏(広島大学,現佐賀大学:堆積学担当)、不破裕司氏(富山大学,現マリンワークジャパン:古地磁気担当)の6名である。彼らのうちODP/IODP経験者は佐々木氏のみ、深海サンゴマウンドに関わっていた人は誰もいない。少なくとも経験的にはヨーロッパ・アメリカの乗船メンバーよりかなり心細い。

乗船の準備とともに重要なのは、研究内容の理解である。2000年以降の短い期間に、深海サンゴマウンドに関する多くの論文がMarine Geology等の国際誌に掲載されていた。知らない間に、マウンド研究はヨーロッパ諸国において熱気を帯びていたのである。私はメールのやり取りのかたわら、多くの論文を読みあさった。おかげで、Exp. 307の研究目的の輪郭が見えてきた。これを他のメンバーと共有すべく、4月9日、JAMSTEC東京事務所において、異例のプレクルーズミーティングを緊急開催したのである。

3. 異例の緊急プレクルーズミーティング

「では、今回の掘削調査の概要と目的について簡単に説明します。」私は短期間の勉強で得た深海サンゴマウンドについての知識を乗船研究員達に解説した。その内容は以下の様なものだったと思う。

北大西洋最大のマウンド地域であるポーキュパイン海盆はアイルランドの西南沖100kmに位置する三角形の海盆であり、その南北方向の長さは150km、東西方向の幅は100kmに達する(図1A)。この海域での深海サンゴマウンドはHovland *et al.*

(1994)により最初に記載され、その後の物理探査により、マウンドが主に海盆北東部の水深 600 ~ 900 m の海域に分布し、その数は氷河期堆積物に埋没したものを含めると約 2000 に及ぶ (de Mol *et al.*, 2002)。掘削対象であるチャレンジャーマウンドはその 1 つであり、水深 800 m にある。予備調査時の地震波プロファイルでは、マウンドはほとんど反射面を持たないユニット S2 として認識される。このユニットは 150 m ほどの厚さであり、広域的に対比できる強い反射面 (R1) を境として、中新~鮮新統の堆積岩 (S3) の上に重なる (図 1B)。

この航海の重要な目的は R1 直上の堆積物情報からマウンド成立に関する 2 つの仮説を検証することにある。

1 つ目の仮説はポーキュパイン海盆の海洋循環に関連する。ここでの重要な海洋学的特徴として、海盆斜面沿いを北上する強い底層水があり、それが濾過栄養であるサンゴに好都合であるとする。底層水は、東方北大西洋水 (NEAW) と地中海アウトフロー (MOF) の間で起る内部潮流によるものであり、これら 2 つの水塊の存在が必要条件となる。NEAW の北上は 4.6 Ma のパナマの閉鎖以降に強まった。その頃の地中海は、Messinian salinity crisis を引き起こしたジブラルタル海峡の閉鎖から開放され、MOF を供給する状態にあった。MOF の強度は、後期鮮新世には地域的な海退により一時的に弱まるが、更新世に入ると回復する (Nelson *et al.*, 1999)。ポーキュパイン海盆での強い底層流が成立したのはこの時期かもしれない。堆積学を専門とする欧米の乗船研究員の多くは、この海洋循環仮説の検証にあたる予定である。

2 番目の説は、海底からの炭化水素 (メタンなど) を含む冷湧水が、深海サンゴマウンドを成立させたとする。Hovland *et al.* (1994) は、いくつかの地域で見られる深海サンゴ礁の直線的配列が、断層構造に沿ったものだと考えた。その後、サンゴマウンド地域の海水中から高いメタン濃度が検出され (Hovland *et al.*, 1998) この説は補強された。海水中のメタン濃度が高いと、その分解により、海水中のアルカリ度が増加し、深海サンゴの骨格

形成に有利に働くと考えられる。また、現在の黒島海台などでも見られる様に、メタン湧水が誘発する海底での炭酸塩鉱物の沈澱は、サンゴの定着にとって良好な固い底質を提供する効果もある。このメタン仮説では、サンゴマウンド生態系の一次生産者は化学合成細菌である。これが確かめられれば、海底熱水群集に次ぐ 2 番目の化学栄養生態系としてマウンド群集は位置付けられ、その科学的意義は極めて大きい。Exp. 307 では、微生物学者と地球化学者がこの魅力的な仮説の検証を担当する予定である。

「さて、以上が本航海の背景と目的ですが、我々はどうしましょう。」

ブレクルーズミーティングで一通りの説明を終えると、議論は取り組むべき具体的研究テーマへと移った。しかし、美味しそうな研究テーマには、欧米研究者によって既に多くのサンプルリクエストが提案されていたのである。特に、マウンド基底層はヨーロッパの研究者達に 2 重 3 重のリクエストがあった。新規参入の私たちは苦しい。

「確かにマウンド基底層は仮説検証の鍵になりそうですが、とりあえず、厚さ 150 m のマウンド全体を見る事にしましょう。」

という漠然とした結論でミーティングを締めくくった。

4. Expedition 307

IODP Exp. 307 はジョイデスレゾリューション号で 2005 年 4 月 27 日ダブリン出航、5 月 16 日アゾレス帰港という比較的短い航海である。コチーフは私とドイツの微生物学者 Tim Ferdelman、スタッフサイエンティストはイギリスの古気候学者 Trevor Williams であった。掘削は順調。実際の作業期間はわずか 12 日間だったが、私たちは 3 つのサイト (U1316, 1317, 1318) で総延長 1400 m のコアを掘削した。特に、サイト U1317 では 5 回もマウンドの中心部を貫いたのである。

U1317 からは次々とマウンド堆積物が上がってきた。堆積物は顕著な層理面を伴わず、大半は未固結であった。岩相はサンゴ骨格を散点的に含む

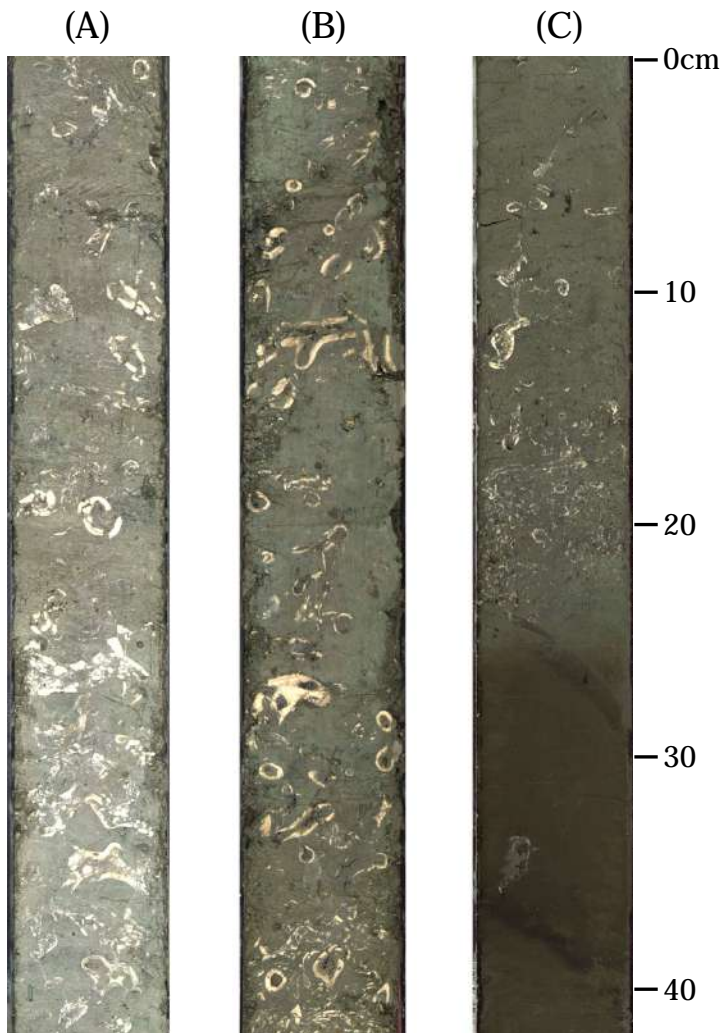


図2 サイトU1317から得られたコア試料の写真. 冷水サンゴの白い骨格が散在する. A) 明色のマウンド堆積物(コアU1317E-09). B) 暗色のマウンド堆積物(コアU1317E-08). C) コアU1317C-17に現れたマウンド基底部.

フロートストーン (floatstone) もしくはラドストーン (rudstone) が主体であり (図 2A, B), それ が厚さ 150 m のマウンド全体を占め, 鮮新世の堆積物に載る (図 2C). 基質は石灰質な粘土~シルトで構成され, 細粒炭酸塩粒子は生砕物 (bioclasts) もしくは石灰質ナノ化石である. 岩相変化は軽微であるが, 堆積物の色や炭酸塩含有量は 10~数 m 間隔で周期的に変化しており (図 3), それが氷河期/間氷期のサイクルに対応すると想像できる. 多くの層準で白亜紀チョーク層を由来としたリワークしたナノ化石が検出された. 氷山

によりもたらされたドロップストーンはマウンド上部に多い.

この掘削作業に固唾を飲んでいたのはメタン仮説の検証にあっていた欧米の微生物学者と地球化学者である. 彼らが待望していたのはコア堆積物が発する独特の有機臭. これがあるとコア堆積物は高濃度のメタンを含んでいる可能性が高い. しかし, 5 本のコアの全てが「臭いが薄い」という印象を与える. コアリングの進行とともに, 彼らの期待は失望へと変わっていく. メタンが誘発する自生の炭酸塩沈殿物も見当たらない. さらに,

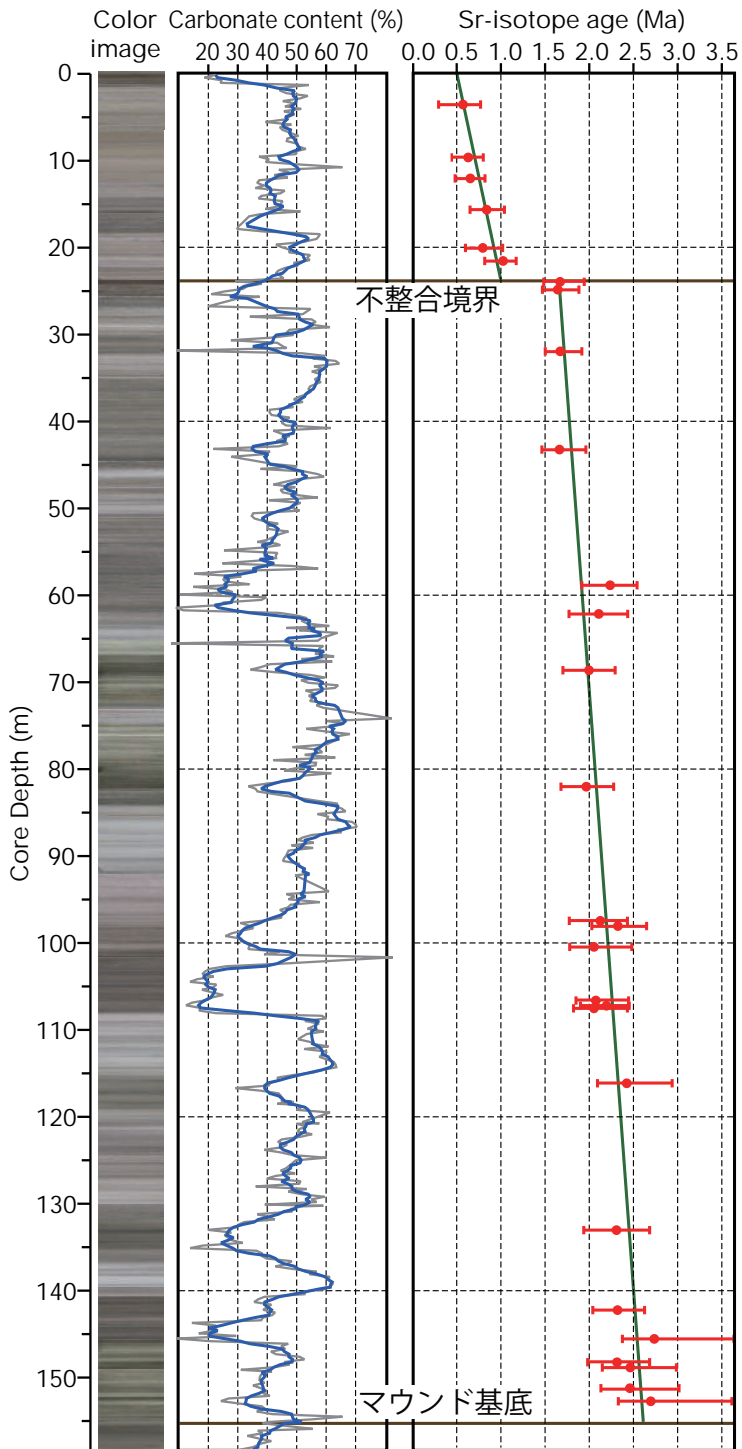


図3 コアU1317Eの研究結果の一部. 左からコアイメージ, 炭酸塩含有量, サンゴ骨格のSr同位体比から見積もられる年代.

堆積物中の菌体カウントの結果も、大きな微生物バイオマスを示すものではなかった。つまり、ごく普通の海底堆積物と同じ。結局、「メタン仮説」を裏付ける証拠は1つも得られなかったのである (Ferdelman *et al.*, 2006)。

コチーフ Tim をはじめとする微生物-地球化学者のモチベーションが低下し、航海の後半は私が仕切る場面が多くなった。それでも、コア記載・微化石同定・古地磁気などのルーチン作業は淡々と進行し、個々の科学テーマとサンプル分配を決める最後の船上会議をむかえる。メタン仮説の旗色が悪くなった分、ヨーロッパの堆積学者はマウンド基底部のコア試料 (図 2C) を入念にチェックし、海洋循環仮説の検証のために最良と思われる試料を選別した。日本人グループは、予定通り、マウンド堆積物を網羅するリクエストを行い、それに加えて、サンゴ骨格の Sr 同位体比と U-Th 年代を測定することになった。しかし、ここでの選択は私たちのグループに幸運をもたらすことになる。

船は予定通り5月16日にアゾレス諸島のポンタデルガダに帰港し、私たちは航海の無事と成功を祝って乾杯する。比較的短期間の航海だったことが幸いしてか、人間関係が壊れることはなかった。おそらく、小さな不満を抱いていた乗船研究員もいただろう。しかし、Tim、私、Trevor による「ゆるやかなリーダーシップ」がそれを自制させた。研究員達は互いをリスペクトしながら、良い友人となりえたのである。

5. 期待以上の成果

Exp. 307 では、その初期の段階で、「サンゴ群集が化学合成細菌を糧としていた」という仮説はほぼ否定された。やはり、深海サンゴの糧は海中に懸濁する有機物なのだろう。ポーキュパイン海盆の海域はアイルランド側の河川の影響で、比較的栄養塩に富み、生物生産性が高い。浅海域で発生したプランクトンは、やがて水柱を降下し、水の比重が増大する塩分躍層で停留する。北東太平洋の場合、それは地中海からもたらされる中層水

MOW の上部に到達する。この深度は内部潮流の効果とも合わせて、サンゴ群集の生息にとって最適である。多くの乗船研究者達は、次に検証されるべきものは「海洋循環仮説」であることを意識した。

下船から1年後の2006年5月、私と高島、それに2名の大学院生は、石川剛志氏の指導の元、高知コアセンターにおいてサンゴの Sr 同位体比を測定していた。冷水サンゴの骨格は造礁サンゴと同様にアラレ石で出来ているので、そこから Sr を分離するのはそれほど難しくない。しかも、ここに配備されている表面電離型質量分析計 Thermo TRITON は $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比を最も精度良く測定できる装置だ。一般に、炭酸塩鉱物中の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は当時の海水の値を保存するとされ、幸いなことに、新第三紀から現在にかけて $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は単調に増加する。すなわち、深海サンゴの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は、年代決定のための良好な資料になる。

わずか5日間の作業により、U1317E の26層準から値が得られた。それらが示す年代 (図 3) は以下の3つの重要な情報を含んでいた。

1) マウンド基底部の年代はほぼ鮮新世 / 更新世境界であり、下位の地層とは約 800 万年間のギャップを含む。

2) 海底の 24 m 下位に顕著な不整合があり、約 60 万年間のギャップを含む。

3) 下部マウンドはほぼ連続的に堆積したのに対し、上部マウンドの堆積はおそらく断続的である。

高知コアセンターでの成果は、チャレンジャーマウンドの年代モデルを提示するものとして、他の研究に先立って公表された (Kano *et al.*, 2007)。さらに、私たちはマウンド成立と北半球での氷河作用の密接な関連を示し、その背景には NEAW と MOF を強化した第四紀型の海洋循環があると主張した (図 4)。上部マウンドが断続的なのは、更新世中期に起こった海水準振幅の増大により、NEAW と MOF の境界に位置する塩分躍層の深度が大きく昇降したためだと解釈される。すなわち、Sr 同位体比の結果は、「海洋循環仮説」を支持する最初かつ最強の証拠となったのである。その

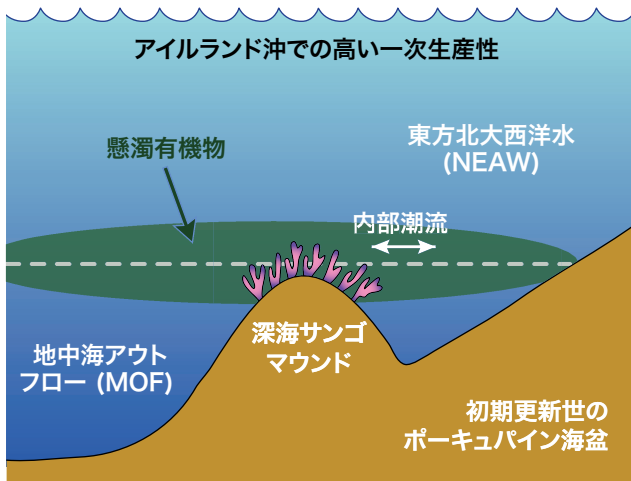


図4 海洋学的に見た北東大西洋での深海サンゴマウンドの発達条件。

後、海洋循環仮説はヨーロッパ研究者によって公表されたマウンド基底部の詳細な研究結果 (Thierens *et al.*, 2010) により、さらなる補強を得た。

結果的に、マウンド全体を通じた Sr 同位体比の測定 (Kano *et al.*, 2007) は、とびきりのテーマであったと言える。その他、日本人グループは下部マウンドに見られる氷期/間氷期サイクル (Sakai *et al.*, 2009) や、CT スキャンを用いた斬新な堆積相解析 (Tanaka *et al.*, 2010) などの成果を提示し、Exp. 307 に対して期待以上に貢献したと言って良い。また、科学面以外でも、横浜での第二回ポストクルーズミーティング、国際堆積学会 (2006 年、福岡) でのシンポジウム開催、総括論文 (Kano *et al.*, 2010) の執筆など、私たちが Exp. 307 でのマウンド研究をリードする場面も多かった。

6. 育成された若手研究者

もちろん、欧米の研究者も個々の研究課題に取り組み、それぞれ成果を挙げた。マウンドコアの総合的な記載 (Titschack *et al.*, 2009)、マウンド成立時の環境変動 (Huvenne *et al.*, 2009)、マウンド堆積物の続成作用 (Frank *et al.*, 2010)、微生物群集 (Webster *et al.*, 2009) とバイオマーカーの解析 (Mangelsdorf *et al.*, 2011) 等である。最も活躍したのはゲント大学の院生 Anneleen Foubert であろう。

彼女は計画立案者である Henriët 教授の秘蔵っ子であり、体調不良の恩師に代わり乗船した。チャレンジャーマウンドを熟知する彼女は、タスクである古地磁気測定の傍ら、マウンド素人のコーチ 2 人を大いにサポートした。また、彼女は日本人とヨーロッパ乗船員とのコミュニケーションの中心にいた。日本アニメのオタクだったのである。彼女は下船後も势力的に研究し、深海サンゴマウンドをテーマとした博士号を取得し、その内容は Springer 社から出版されている (Foubert and Henriët, 2009)。

若手研究者の育成は IODP が掲げる重要な目標の 1 つである。Anneleen の事例に加え、乗船時に大学院生だった高島・不破の両名はそれぞれ研究に携わる職を得た。Expedition 307 は若手研究者の育成の面でも成功したのである。

7. おわりに

この掘削研究によって育成されたのは若手ばかりではない。Henriët 教授の体調不良と Tim のモチベーション低下という想定外の事態はあったが、掘削研究の取りまとめを主導した経験は私にとって得難いものだった。その間、多くの研究者との交流を持てたことも大切な経験である。また、思わぬところから研究も発展した。「海洋の層状構造

が底生動物生態系を育む(図4)」という結論に啓発されて、以前から興味を持っていた新原生代の動物進化について深く考えることができた(Kano *et al.*, 2011).

深海サンゴマウンドの様な巨大な構造物でさえ発見されたのは近年のことである。深海にはまだまだ未知の生態系が眠っているはずだ。今後も「ペンライトで暗闇のグラウンドを探す」という試みは続くだろうし、機会があれば再度挑みたい。

参考文献

- [1] Freiwald, A., Fosså, J. H., Grehan, A., Koslow, T. and Roberts, J. M. (2004) : Cold-water Coral Reefs : Out of Sight - No Longer Out of Mind. UNEP/WCMC Report, Biodiversity Series 22, Cambridge, 84pp.
- [2] Hovland, M., Croker, P. F. and Martin, M. (1994) : Fault-associated seabed mounds (carbonate knolls?) off western Ireland and north-west Australia. *Marine Petrological Geology*, 11, 232-246.
- [3] de Mol, B., van Rensbergen, P., Pillen, S., van Herreweghe, K., van Rooij, D., McDonnell, A., Huvenne, V., Ivanov, M., Swennen, R. and Hernriet, J.-P. (2002) : Large deep-water coral banks in the Porcupine Basin, southwest of Ireland. *Marine Geology*, 188, 193-231.
- [4] Nelson, C. H., Baraza, J., Maldonado, A., Rodero, J., Escutia, C. and Barber Jr., J. H. (1999) : Influence of the Atlantic inflow and Mediterranean outflow currents on Late Quaternary sedimentary facies of the Gulf of Cadiz continental margin. *Marine Geology*, 155, 99-129
- [5] Hovland, M., Mortensen, P. B., Brattegard, T., Strass, P. and Rokengen K. (1998) : Ahermatypic coral banks off mid-Norway; evidence for a link with seepage of light hydrocarbons. *Palaios*, 13, 189-200.
- [6] Ferdelman, T. G., Kano, A., Williams, T. and the IODP Expedition 307 Scientists (2006) IODP Expedition 307 has first drilled through a deep-water coral mound in the Porcupine Seabight, NE Atlantic. *Scientific Drilling*, 2, 11-16.
- [7] Kano, A., Ferdelman, T. G., Williams, T., Henriet, J.-P., Ishikawa, T., Kawagoe, N., Takashima, C., Kakizaki, Y., Abe, K., Sakai, S., Browning, E.L., Li, X. and Integrated Ocean Drilling Program Expedition 307 Scientists (2007) : Age constraints on the origin and growth history of a deep-water coral mound in the northeast Atlantic drilled during Integrated Ocean Drilling Program Expedition 307. *Geology*, 35, 1051-1054.
- [8] Thierens, M., Titschack, J., Dorschel, B., Huvenne, V. A. I., Wheeler, A. J., Stuu, J. -B., and O'Donnell, R. (2010) : The 2.6 Ma depositional sequence from the Challenger cold-water coral carbonate mound (IODP Exp. 307) : sediment contributors and hydrodynamic palaeo-environments. *Marine Geology*, 271, 260-277.
- [9] Sakai S., Kano, A., and Abe K. (2009) : Origin, glacial-interglacial responses, and controlling factors of a cold-water coral mound in NE Atlantic. *Paleoceanography*, doi:10.1029/2008PA001695
- [10] Tanaka, A., Nakano, T., and Ikehara, K. (2011) : X-ray computerized tomography analysis and density estimation using a sediment core from the Challenger Mound area in the Porcupine Seabight, off Western Ireland. *Earth, Planets Space*, 63, 103-110.
- [11] Kano, A., Ferdelman, T.G., Williams, T. (2010) : The Pleistocene cooling built Challenger Mound, a deep-water coral mound in the NE Atlantic: Synthesis from IODP Expedition 307. *Sedimentary Record*, 8, 3-9.
- [12] Titschack, J., Thierens, M., Dorschel, B., Schulbert, C., Freiwald, A., Kano, A., Takashima, C., Kawagoe, N., Li, X. and the IODP Expedition 307 scientific party (2009) : Carbonate budget of a cold-water coral mound (Challenger Mound, IODP Exp. 307). *Marine Geology*, 259, 36-46.
- [13] Huvenne, V. A. I., Van Rooij, D., De Mol, B., Thierens, M., O'Donnell, R., and Foubert, A. (2009) : Sediment dynamics and palaeo-environmental context at key stages in the Challenger cold-water coral mound formation: clues from sediment deposits at the mound base. *Deep-Sea Res.*, Part I, 56, 2263-2280.
- [14] Frank, T. D., Titschack, J., and Thierens, M. (2010) : Aragonite loss in a cold-water coral mound: mechanisms and implications. *Sedimentology*, 58, 670-690.
- [15] Mangelsdorf, K., Zink, K.-G., di Primio, R., and Horsfield, B. (2011) : Microbial lipid markers within and adjacent to Challenger Mound in the Belgica carbonate mound province, Porcupine Basin, offshore Ireland (IODP Expedition 307). *Marine Geology*, 282, 91-101.
- [16] Webster, G., Blazejak, A., Cragg, B. A., Schippers, A., Sass, H., Rinna, J., Tang, X., Mathes, F., Ferdelman, T., Fry, J. C., Weightman, A. J., and Parkes, R. J. (2009) : Subsurface microbiology and biogeochemistry of a deep, cold-water carbonate mound from the Porcupine Seabight (IODP Expedition 307). *Environmental Microbiology*, 11, 239-257.
- [17] Foubert, A., and Henriet, J. -P. (2009) : Nature and Significance of the Recent Carbonate Mound Record: The Mound Challenger Code. *Lecture Notes Earth Science*, vol. 126, Springer-Verlag, Berlin 298 pp.
- [18] Kano, A., Kunimitsu, Y., Takashima, C., Shiraishi, F., Wang, W. (2011) : The evolution of animal multicellularity stimulated by dissolved organic carbon in early Ediacaran ocean: DOXAM hypothesis. *Island Arc*, 20, 280-293.

