



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

新生代東南極氷床発達史： Exp. 318 ウィルクスランド航海

岩井 雅夫 香月 興太
杉崎 彩子 山根 雅子
酒井 豊三郎

Francisco J. Jimenez-Espejo
Exp.318 Scientist

**Cenozoic Glacial History of the Eastern
Antarctic Ice Sheet : IODP Expedition 318
Wilkes Land**
**Masao Iwai • Kota Katsuki • Saiko Sugisaki •
Masako Yamane • Toyosaburo Sakai •
Francisco J. Jimenez-Espejo • Exp.318
Scientist**

いわい まさお : 高知大学理学部門
かつき こうた : 韓国地質調査所
すぎさき さいこ : 東京大学
やまね まさこ : 東京大学大気海洋研究所
さかい とよさぶろう : 元宇都宮大学
エスペヨ・フランシスコ : 名古屋大学

国際統合深海掘削計画第 318 節航海では、新生代の南極氷床発達史を探ることを目的とし、ウィルクスランド沖の南極大陸縁辺海域において、陸棚横断掘削がなされた。新生代の温暖期は、今世紀末の温暖化地球のアナログとして注目されている。特にウィルクスランドは比較的安定とされてきた東南極氷床の挙動に最も敏感な地として、温暖化に対する応答性と、大気海洋循環に与える影響を占う上で重要視されてきた。

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change : IPCC) の報告書 (WGI Forth Assessment Report : AR4) では、温室効果ガスの放出をそのまま放置すれば、大気中の二酸化炭素濃度は 21 世紀末までに 400 ppm を越え、地球全体の平均気温は 2–4°C 上昇すると予測されている。南極氷床の消長は、海水準変動やアルベド、海洋循環や生物の進化に深くかかわっている。新生代の地球は、始新世はじめの最温暖期を頂点に段階的に寒冷化が進み (Zachos, *et al.*, 2001, 2008)、緯度や水深方向の温度格差が形成されるにつれ、海洋の成層化や気候区 / 水塊の細分化がおき、生物の絶滅やニッチを埋める進化が繰り返えされてきた (e.g. Marx and Uhen, 2010)。

これまで南極周辺では、氷床の拡大・縮小を裏付ける直接的証拠を求め度々掘削がなされてきた (Legs 28, 119, 178, 188, ANDRILL, Shallow Drill など)。しかし回収された地質断面は多くの場合 hiatus に阻まれ断片的であり、新生代における東西南極氷床の実態解明には未解決な問題が数多く残されていた。ウィルクスランドは、東南極氷床形成時期や、その後の安定性・性状変化を評価する上で最も適した場所と目されている。国際統合深海掘削計画 (IODP) 第 318 節航海 (Exp. 318) の目的は、様々な時間スケールで氷床拡大・縮小の直接的な証拠を得ることであった (Escutia *et al.*, 2011a, b)。航海の概要とこれまでに得られた成果の一端を紹介する。

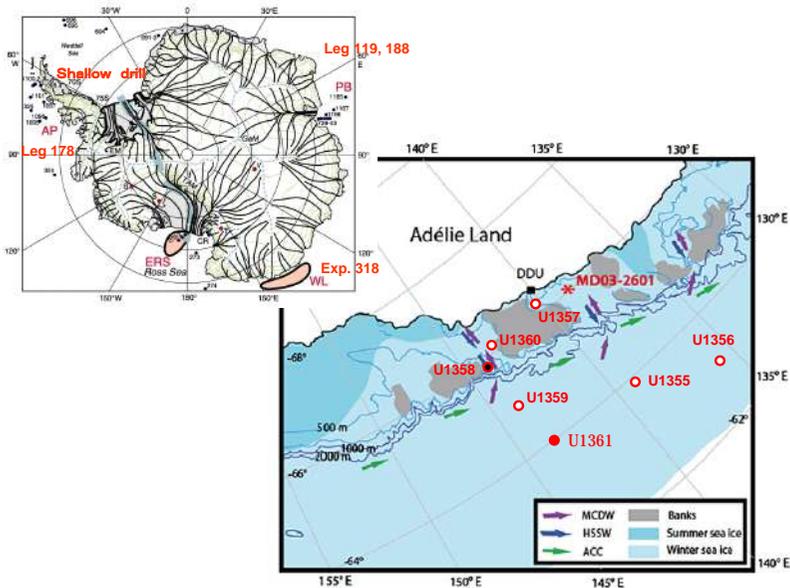


図1 調査地域ならびに掘削地点位置図。

2. 航海の概要

IODP Exp. 318 は、ニュージーランドのウェリントンから2010年1月4日に出港して始まり、オーストラリアのフォートに3月8日に入港して終えたジョイデスレゾリューション (JOIDES Resolution) 号の航海である。主席研究員は Carlota Escutia (グラナダ大学, スペイン) と Henk Brinkhuis (ユトレヒト大学, オランダ) のヨーロッパ勢2名で、加えて Robert B. Dunbar (スタンフォード大学) が完新統掘削の責任者として航海をリードした。日本からは7名の研究者が乗船した；岩井雅夫 (珪藻古生物学), 香月興太 (堆積学), 酒井豊三郎 (放散虫古生物学), 杉崎彩子 (古地磁気学), 中井睦美 (物性), 山根雅子 (堆積学), Francisco J. Jimenez-Espejo (無機化学)。

約2カ月間の本航海では、4地点のライズ堆積物掘削、2地点の陸棚掘削、1地点の内部陸棚海盆掘削が実施された (図1, 図2)。

本航海の主な目的は、1) 東南極氷床がウィルクスランドまで到達した時期とその時の様相を、音響不整合 WL2 を掘り抜くことで明らかにすること、2) 新第三紀-第四紀における氷期/間氷期サ

イクルの高解像度記録を得ること、3) 陸棚のプログラデーションウェッジの形態が大きく変化した時期を決定し氷床の性状 (Wet Ice/Dry Ice など) の変化を明らかにすること、4) 内部陸棚のアデリー海盆で葉理状堆積物を掘削し、完新世の超高精度古海洋記録を得ること、であった。

3. 成果概要

(1) いつ東南極氷床はウィルクスランドの大陸縁辺まで到達したのか? 等の問いに答えるべく、コンチネタルライズ上の Site U1355 と Site U1356 で掘削が行われた。Site U1355 は主に粗粒のチャンネル充填碎屑物であり、堆積物の年代を稼ぐことも期待できなかったことから早々に掘削が打ち切られた。一方、急遽船上で掘削地点が決められた Site U1356 では半遠洋性の珪藻質堆積物をとらえることができ、1 km 超の掘削と複数の不整合面を介して、約 55 Ma の堆積物まで達した。注目されていた暁新世-始新世境界の掘削は hiatus に阻まれたが、始新世温暖化極大期 (Eocene Thermal Maximum : ETM) の地質断面取得に成功した。

(2) 高緯度域における新生代後期の高解像度氷期/間氷期サイクル記録を得るべく、Site U1359

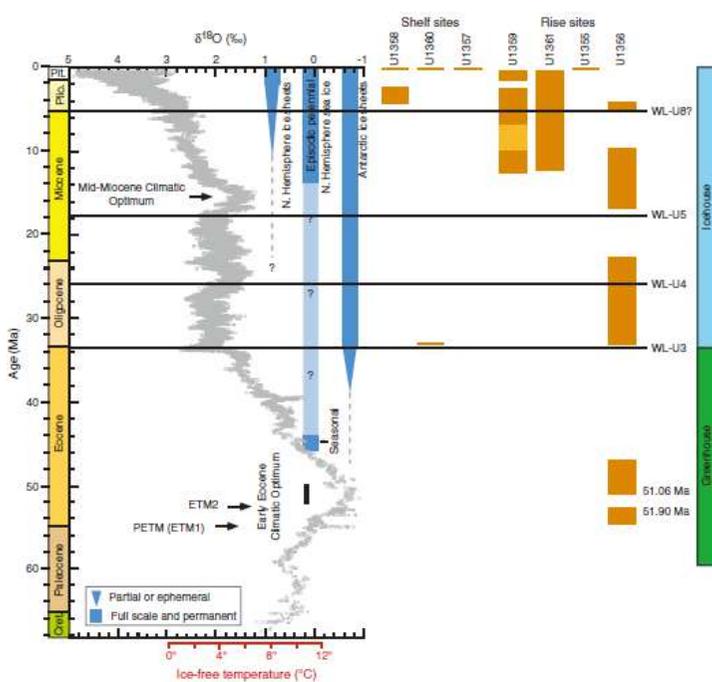


図2 酸素同位体標準曲線と Exp. 318 航海で掘削された時間断面 (Escutia *et al.*, 2012).

と Site U1361 の 2 地点でライブ堆積物が掘削された。良質の古地磁気記録と豊富な珪質微化石を伴い、中中新世（～ 12 Ma）以降の連続した堆積物が得られた。石灰質微化石に富む中部中新統と中部更新統、珪質微化石に富む下部鮮新統は、いずれも温暖化事変堆積物として注目され解析が進められている。

(3) 陸棚掘削は海氷に阻まれ、Site U1358 と Site U1360 の 2 地点でわずかな掘削に留まった。乏しい回収率のなか hiatus を珪藻化石で検出することに成功し、東南極氷床 (EAIS) が拡大した時期に制約条件を与えた。

(4) 超高解像度（季節スケール～数十年スケール）の気候変動解析を目指し、水深 1000 m を超える内部陸棚アデリー海盆で 1 地点 3 孔の掘削がなされた (Site U1357)。サンタバーバラ海盆 (中米) やパルマー海盆 (南極半島) をしのぐ、200 m 超の完新統掘削に成功した。

4. 始新世の温暖期地球

始新世温暖化極大期は過去 6500 万年間の新生

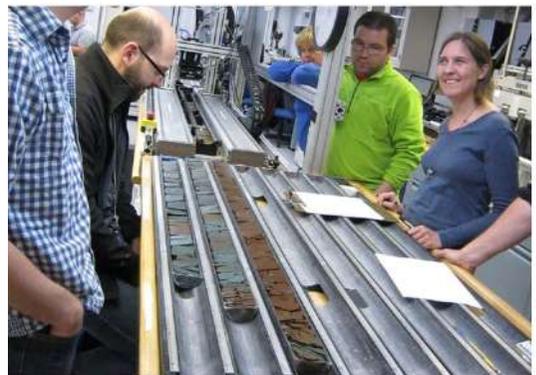


図3 Site U1356 で採取された始新世温暖化極大期 (ETM) の堆積物。

代で最も温暖であったことが知られている (e.g., Zachos *et al.*, 2001, 2008)。この時代は、緯度方向の温度格差は今より小さく、大気中の二酸化炭素濃度は 1000 ppm に達していたと考えられており、現代社会が今後 100 年間に経験しうると予想されている状況に近い。

Exp. 318 ではウィルクスランド沖の Site U1356 で、1.5 m の厚さを有する酸化堆積物が採取され (図3)、渦鞭毛藻化石層序ならびに古地磁気層序

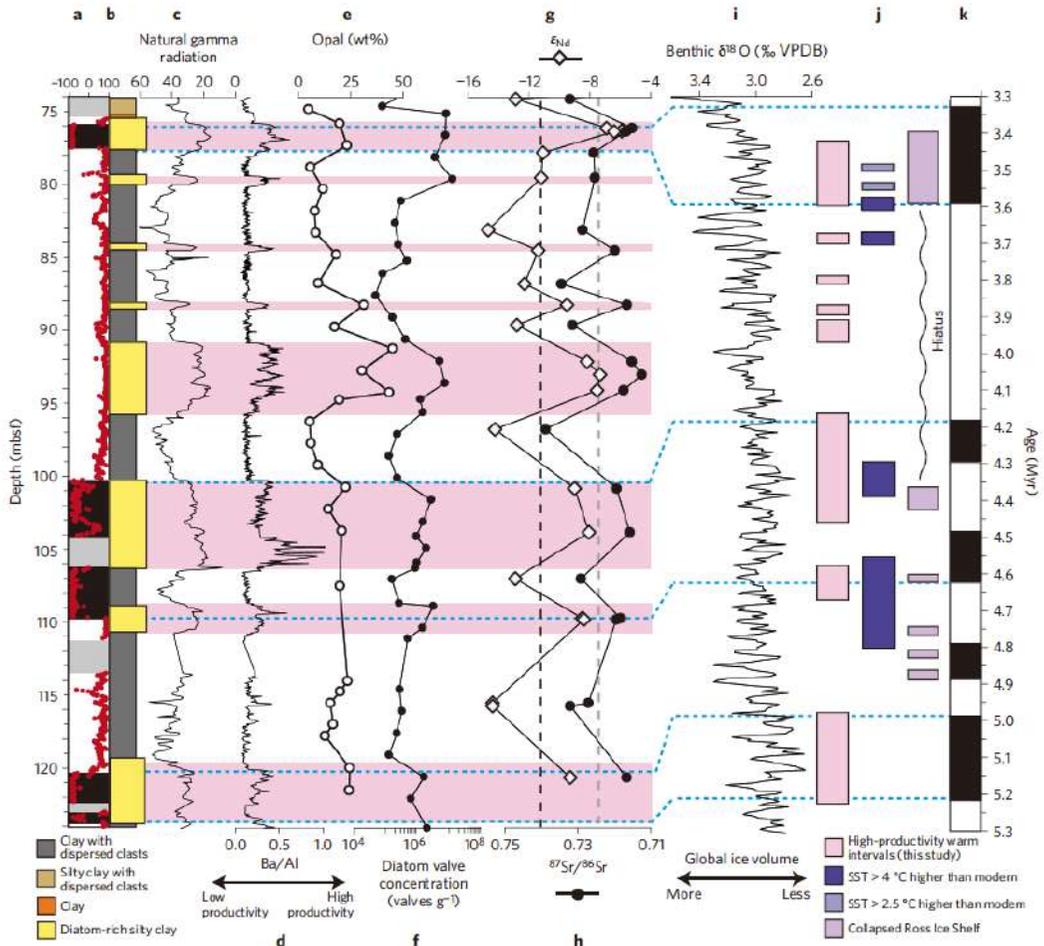


図4 Site U1361の鮮新統と対比(Cook *et al.*, 2013). a. 古地磁気層序, b. 岩相(黄:珪藻質, 灰:粘土質), c. 自然ガンマ線(NGR), d. Ba/Al比, e. Opal (wt%), f. 珪藻殻密度, g. Nd同位体, h. Sr同位体, i. 酸素同位体(LR04), j. 左: 高生物生産期, 中央: インド洋(ケルゲレンやブリッ湾)におけるSST昇温期, 右: ロス棚氷の崩壊期.

(Tauxe *et al.*, 2012) により, ETM2に相当すると認定された. Site U1356の花粉・孢子ならびに地球化学分析の結果, 古緯度が南緯70°にもなる高緯度域にもかかわらず, 熱帯域と似たような多様性の高い植生が広がり, 特に冬期の気温は10°C以上と温暖であったことが明らかにされた(Pross, *et al.*, 2012). すなわち, 高緯度で日照時間が短い, あるいは暗い極夜であるにも関わらず, 霜も降りない環境であったことを示唆する直接的な証拠を初めて手にしたといえる.

5. 鮮新世の温暖期地球

鮮新世(5.33 – 2.58 Ma)の温暖期は, 全球平均温度は今世紀末の予想温度と同等で, 二酸化炭素濃度も今日と同等程度(~400 ppm)であったと考えられている. この時代の海水準上昇量からは東南極氷床の縮小後退が示唆されているが, 南極縁辺から得られる氷床変動の証拠は乏しい状況にある. Cook *et al.* (2013)は, 東南極アデリーランド沖のSite U1361で採取された鮮新統海底堆積物の分析から, 鮮新世の温暖期には東南極氷床が

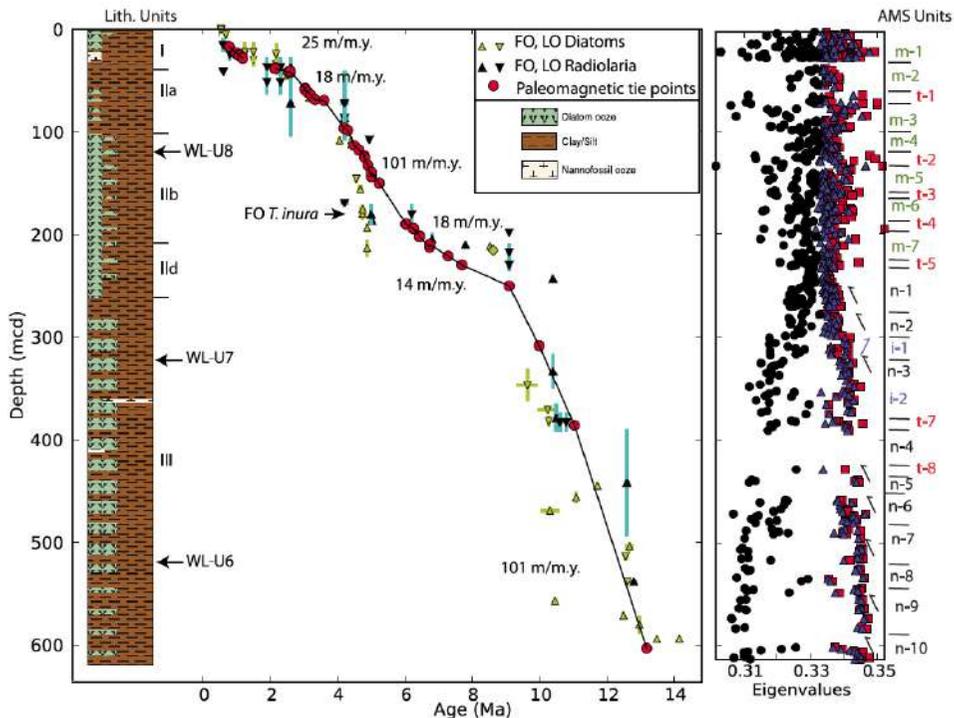


図5 Site U1359における堆積速度曲線 (Tauxe *et al.*, 2012).

劇的に後退し、氷床下のウィルクス氷底湾が露出した証拠を初めて示した。すなわち、5.3–3.3 Maの堆積物は、南極周辺海域の温度上昇をうけて生物生産性が増加したことを示唆する珪藻質堆積物が認められるが、ネオジウム同位体やストロンチウム同位体等の分析結果 (図4) によれば、温暖期に形成された碎屑物の起源は、今日東南極氷床に覆われているウィルクス氷底湾の大陸基盤岩由来であることが示唆される。つまり、数百 km におよび氷床縁が後退したと解釈され、東南極氷床は鮮新世の温暖化気候に敏感であったことが示唆された。

珪藻分析結果 (小林, 2012MS ; Cook *et al.*, 2013) は、鮮新世温暖期における本海域の水温上昇や海水の未発達を示す証拠とされた。また、再堆積化石 (中新世に多産する *Denticulopsis* 属) が寒冷期の粘土質堆積物で相対頻度・絶対頻度ともに増加している。主体をなす *D. simonsenii* はロス海にお

いては現在もリサイクルされているにも関わらず、アデリー海盆の完新統には見つからないことから、再堆積化石はロス海またはウィルクス氷底湾起源と推察される。Cook *et al.* (2013) の結果は、このこととも調和的である。

Pollard and DeConto (2009) は、温室効果ガスに加え、海氷や棚氷、海水準変動 (座礁線) 等を考慮した高精細氷床モデルシミュレーションを500万年前までさかのぼって行い、鮮新世以降においても東南極氷床が複数回衰退し得ることを示していた。Naish, *et al.* (2009) はロス海において氷上掘削を行い、ロス棚氷が崩壊したことを示したが、東南極氷床後退の物証を示したのは Cook *et al.* (2013) が初めてとなる。図4では、東南極氷床後退の証拠とインド洋やロス海の温暖化イベントとの対比案が示されている。

しかし、「3.5 Ma以前の対比については見直す必要がある」という点には注意が必要である。Iwai

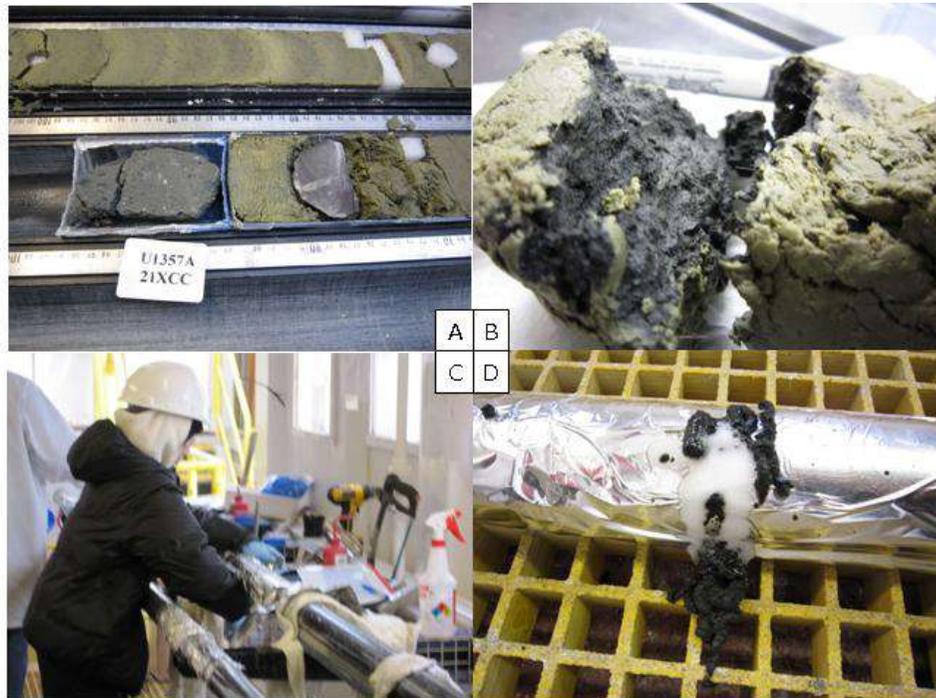


図6 A. アデリー海盆で得られた葉理状珪藻軟泥とダイアミクタイト. B. 試料表面は酸化されオリーブ色に変色. C. 光ルミネッセンス (OSL) 法による年代測定のために, Hole Cでは全てのコアをアルミホイルで遮光. D. ガスを逃がすためのドリル孔から吹き出した発砲ガスと堆積物試料.

et al. (2001) は南極半島で複合層序を構築した際、微化石層序と古地磁気層序に系統的なずれが生じることを見だし、既存の微化石年代値には“ボタンの掛け違い”に起因する系統誤差が存在すること指摘した。既存データの再評価をおこない条件付き最適化法 (Constrained Optimization: CONOP) により数値年代を刷新した *Cody et al.* (2008) においても改善されることはなく、全く同じ関係が Exp. 318 においても再現された (図5; *Tauxe et al.*, 2012)。最大 50 万年以上のずれが 3.5 – 6 Ma の間で起こりえる状況にある。イベントの相対的關係は前後せず常に対比可能であるため、元データに立ち返り慎重に対比すれば、南大洋における読み替えは十分に可能である。しかし、数値を鵜呑みにして利用すると混乱のもととなり、この状況を解決せずに低緯度や北半球の現象と対比することは大変に危険である。

6. 完新世の温暖期地球

アデリー海盆の Site U1357 では 200 m を超える完新世の珪藻質軟泥からなる地質断面が連続して掘削された (図6)。サンタバーバラ海盆 (ODP Leg 146, Site 893) やパルマー海盆 (ODP Leg 178, Sites 1098, 1099) をしのぐ堆積速度である。したがって、本堆積物試料の分析によって超高解像度の古海洋記録の復元が期待され、現在様々な地球化学および微化石分析が行われている。

超高解像度の古海洋研究を行うためには、信頼性の高い堆積物コアの年代モデル構築が必要不可欠である。珪藻質軟泥は有機物に富み石灰質の有孔虫殻を溶かしてとがしてしまうことが知られているため (*Osterman et al.*, 2001)、Site U1357 で得られた全ての試料は半割後、船上で酸素吸収剤をそえた上でラップ巻きし脱気密封された。また、

Hole U1357C では、光ルミネッセンス法による年代測定を実施すべく、掘削後直ちにアルミホイルで遮光する作業が行われた(図 6C, D)。いずれも高精度年代モデルを構築するための努力である。本堆積物コアでは、全有機炭素や浮遊性有孔虫の放射性炭素 (^{14}C) 年代測定をはじめ、ケイ素-32 年代測定や磁化強度特性の対比など、複数の手法を併用した年代モデル構築が進行中である。

Yamane *et al.* (2012) では、化合物レベルの ^{14}C 年代測定を行い、高精度年代モデル構築に貢献している。Hole 間の岩相対比に関しては、最下部をのぞき葉理に特徴がない珪藻軟泥であり、色や帯磁率・含水率等物性値にも変化が乏しいので、ことから、Hole 間の岩相対比は極めて困難であると予想される。

7. アウトリーチ活動

本航海ではアウトリーチ活動が活発で、小学生から大人までを対象にした「ネット会議」は、2ヶ月の航海で100回を超えた。また、Ocean Leadership 等の依頼を受け、主席研究員の一人 Henk Brinkhuis の弟、Dan がカメラマンとして乗船し、動画撮影にあたった(図 7)。動画作品は以下 YouTube サイト等で公開中されているので参照されたい；

・ To Antarctic Waters-the Wilkes Land Expedition (英語版動画本編 7 編他)

<http://www.youtube.com/playlist?list=PL8AC7E48053CB639C&feature=plcp>

「希望があれば、時間の許す限り、動画撮影を引き受ける」との申し出を受け、急遽日本語版を作成することになった。こちらは facebook で公開している；

・ IODP Expedition 318 Special Report Japan Clip (日本語版動画)

<https://www.facebook.com/video/video.php?v=111564068935498>

自然界で生じる多種多様な変化を巧妙にあやつり、絶妙なバランスをもって成り立ってきた現在の生態系から、我々現代人は多大な生態系サービ



図 7 古地磁気ラボにおけるビデオ撮影の様子。第三話で主役を務めた杉崎(左)とカメラマンのDan Brinkhuis(右)。

スを享受している。しかし人間の営みによって大気中に放出された二酸化炭素は、そのバランスを崩すリスクを有している。温暖化に対し、ただ待っているでは取り返しがきかなくなる危険性をはらむ一方、手を施し修正するに十分な知識も技術も人類は持ち得ていない。想定(シミュレーション)が現実のものとしてどうなるか、実験を行うことはできず、時がたってみないとわからない。しかし、過去の地球上で繰り返された壮大な実験結果は地層に記録されている。地質記録をアナログ実験の事例集としてとらえることで、地球表層システムの反応性やリスクについて学ぶべきことは少なくなかろう。そんな思い(筆頭著者)で日本語版動画のシナリオやナレーションを作成した。

8. まとめにかえて

南大洋の陸棚掘削では、ライザーを持たないジョイデスレゾリューション号には限界があり、「ちきゅう」の投入に期待がかかる。「Chikyu+10」では池原実(高知大学)ほかによりコンラッド海台の掘削プロポーザルが提案された。海水や流氷の課題がありライザー掘削の実現が厳しいとしても、荒れた海では巨大な船体を有する「ちきゅう」の安定性が効果を発揮すると期待される。

謝辞：本研究の実施に際しては、JSPS 科研費 23244102 (代表：池原 実)、25550015 (代表：岩井雅夫)、高知大学拠点プロジェクト経費(代表：池原 実)を使用した。

参考文献

- [1] Cody, R., *et al.*, 2008. Thinking outside the zone: High-resolution quantitative diatom biochronology for the Antarctic Neogene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 260, 92-121.
- [2] Cook, C., *et al.*, 2013. Dynamic Behaviour of the East Antarctic Ice Sheet during Pliocene Warmth. *Nature Geoscience*, 6, 765-769, doi: 10.1038/ngeo1889.
- [3] Escutia, C., Brinkhuis, H., Klaus, A., and the Expedition 318 Scientists, 2011a. Proc. IODP, 318: Tokyo (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi:10.2204/iodp.proc.318.2011
- [4] Escutia *et al.*, 2011b. IODP Expedition 318: From Greenhouse to Icehouse at the Wilkes Land Antarctic Margin. *Scientific Drilling*, No. 12, p. 15-23. doi: 10.2204/iodp.sd.12.02.2011.
- [5] Iwai, M., *et al.*, 2001. Magnetobiochronologic synthesis of ODP Leg 178 rise sediments from the Pacific sector of the Southern Ocean: Sites 1095, 1096, and 1101. *Proc. ODP, Sci. Results*, 178, 1-40.
- [6] 小林宗誠, 2012MS. 新生代後期の南大洋珪藻化石 : ウィルクスランド沖IODP Site U1361. 高知大学理学部地球科学コース卒業論文.
- [7] Marx, F., and Uhen, M. D., 2010. Climate, Critters, and Cetaceans: Cenozoic divers of the evolution of modern whales. *Science*, 327 (5968), 993-336. DOI:10.1126/science.1185581.
- [8] Naish, T., *et al.*, 2009. Obliquity-paced Pliocene West Antarctic ice sheet oscillations. *Nature*, 458, 322-328.
- [9] Osterman, L., E., Poore, R.Z., and Barron, J., 2001. Climate variability of the Holocene, Site 1098, Palmer Deep, Antarctica. *Proc. ODP, Sci. Results*, 178.
- [10] Pollard, D., and DeConto, R.M., 2009. Modelling West Antarctic ice sheet growth and collapse through the past five million years. *Nature* 458, 329-332.
- [11] Pross, J., *et al.*, 2012. Persistent near-tropical warmth on the Antarctic continent during the early Eocene epoch. *Nature Geoscience*, 488, 73-77. doi:10.1038/ngeo1783
- [12] Tauxe, L., *et al.*, 2012. Chronostratigraphic framework for the IODP Expedition 318 cores from the Wilkes Land Margin: constraints for paleoceanographic reconstruction. *Paleoceanography*, 27(2):PA2214. doi:10.1029/2012PA002308
- [13] Yamane, M., *et al.*, 2012. Application of compound-specific ¹⁴C dating to IODP Exp.318 U1357A core. The Third Symposium on Polar Science.
- [14] Zachos, J., *et al.*, 2001. Trends, Rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292, 686, DOI:10.1126/science.1059412.
- [15] Zachos, J., C., *et al.*, 2008. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *Nature*, 451, 279-283.

