



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

Exp. 325 Great Barrier Reef Environmental Changes

横山 祐典

Exp. 325 Great Barrier Reef Environmental Changes

Yusuke Yokoyama

よこやま ゆうすけ：東京大学大気海洋研究所

Expedition 325 では、IODP の枠組みで 2 回目となるサンゴ礁掘削を、世界遺産でもあるオーストラリア北東部、グレートバリアリーフ沖にて行った。気候システムを理解する上で特に重要な過去 10 万年間の海水準や水温変動を復元するために、サンゴ礁堆積物の分析により、その全貌が徐々に明らかになりつつある。

1. はじめに

IODP の枠組みの中での最初のサンゴ礁掘削は、2005 年の Exp 310 によるタヒチ沖掘削であり、最終融氷期（過去 20,000 年間）についてのデータを得ることに成功した。この時期は、グローバルな気候システムの理解を深める上で重要な期間である。最終氷期最盛期 (LGM: 約 2 万年前 Yokoyama and Esat, 2011) は、カナダと北欧におよそ 3,000 m の氷床が存在し、熱帯の水温も現在より 3–6°C 低く、グローバルな熱塩循環 (THC) を駆動する上で重要な北大西洋深層水の形成も弱かった時期である。つまり地球気候の背景場が現在と異なっており、間氷期に入ってから過去の 10,000 年間と比べて、S/N (シグナル-ノイズ比) 比が大きく、気候システム中の各要素の影響度について検討できる貴重な時期である (Liu *et al.*, 2009)。近年、極域氷床で掘削されたアイスコアの分析により、ミランコビッチサイクルで知られる地球公転軌道要素変化に伴う、太陽からの熱の分配の緯度変化のみで説明できない 1,000 年スケールの短期間の気候変動が、過去に繰り返してきたことがわかってきた (Dansgaard *et al.* 1993; EPICA project members 2006)。そのような短期間の気候変化は、地球表層の雪氷圏-大気圏-海洋-陸域生物圏などの相互作用に伴う変化であることが予想されるため、それらに関する高時間分解能な変化についてのデータの採取が急務である。

2. 高性能な環境記録者としての造礁サンゴ

上記のように気候変動の優秀なアーカイブは極域氷床コア試料である。当時の気温の情報のほかに、水蒸気の起源や大気のエアロゾル、温室効果

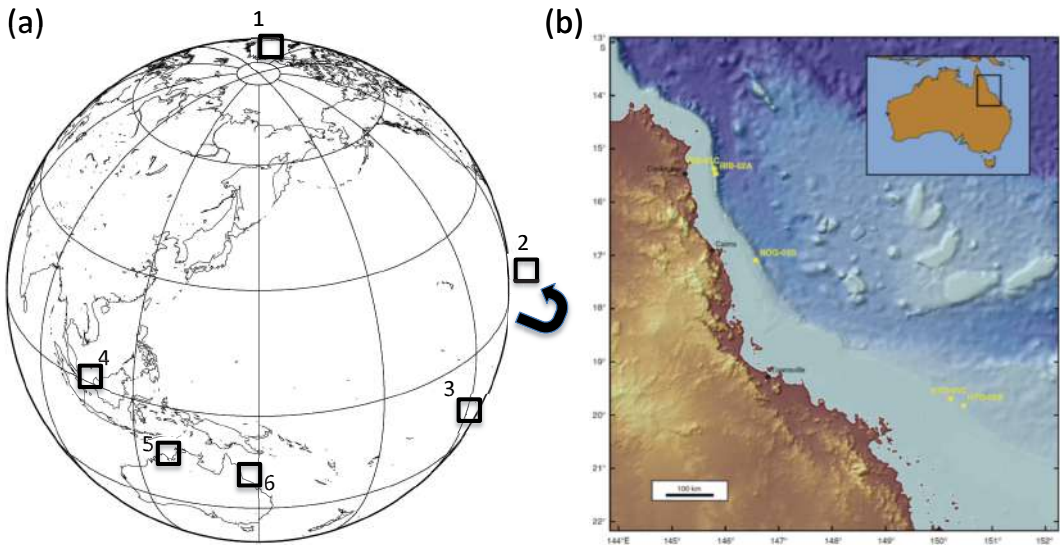


図1 (a)本文中で紹介している最終氷期の海水準の掘削データが得られた地点とグリーンランド氷床コアの位置。(1)グリーンランド、(2)バルパドス沖、(3)タヒチ、(4)南シナ海、(5)北西オーストラリアボナパート湾、(6)グレートバリアリーフ。(b) Expedition 325 GBRECの掘削サイト。

ガスの濃度変化などもとらえているからである。一方、中-低緯度ではアイスコアが得られにくい。過去の環境の時系列変化を復元するためには、堆積物の掘削試料が用いられるが、特に有用なのが造礁サンゴの試料である。それは、1) 生息深度が浅く、海面情報を保持すること、2) U-234の非平衡を用いた高精度年代決定(ウラン系列核種年代測定)が可能であること、3) 放射性炭素を用いた海洋循環の強弱情報を得られること、4) 同位体や微量元素データを使って海水の栄養塩の情報や大気二酸化炭素変動と対応したpHなどの復元を行えること等が挙げられる(Yokoyama and Esat, 2014)。しかし、最終融氷期の情報を得るには、水深が浅い大陸棚での掘削作業が必要なために、これまでは試料採取が難しく、RV Joides Resolutionを用いた掘削が行われてこなかった。IODPではMPSが導入されたことにより、サンゴ礁掘削についての道が開かれた。

3. LGMの氷床量と海洋環境復元

1989年にコロンビア大学のFairbanksが行ったカリブ海バルパドス沖(図1)での沈水サンゴ礁掘削結果に基づく過去17,000年間の海水準変化曲線が発表され(2013年現在、Web of knowledgeにて2600回以上の被引用数)、LGMの境界条件のうち重要な過去の氷床量についての情報は、長らくこの論文によるデータが広く受け入れられてきた(Fairbanks, 1989)。気候システムの理解のために重要な試料を提供したこの論文であったが、多くの未解決な問題も残っていた。例えば20,000年前であるとされるLGMのサンゴサンプルが採取されていないために、LGMの海水準低下量を正確に見積もれないままに、全球的に120 m程度の低下であるとしている点や、メルトウォーターパルス(MWP)とよばれる急激な海水準上昇期(現在の上昇の速度の30-40倍の上昇速度)の存在の有無とタイミング、サンゴから得られる水温記録の信憑性等である(Yokoyama *et al.*, 2011)。バルパド

スのコアのサンプル採取は、回収率や年代決定法の問題、MWPがコアとコアのギャップに位置していたことなどの問題も存在していた。そこでIODPではタヒチとグレートバリアリーフ沖の掘削を計画し(図1)、タヒチについてはExp 310にて2005年に掘削、グレートバリアリーフについてはオーストラリア政府からの掘削許可の遅れなどから、Exp 325にて2010年に掘削を行った。

大きな期待がかかったタヒチの掘削では、高い回収率のコア採取を行うことができ、過去16,000年までの連続的に近いコアがサンプリングできた(Camoin *et al.*, 2012)。最終融氷期で最大の海水準変化期であるMWP1a期のタイミングと規模についても詳細に明らかになり(Deschamps *et al.*, 2012)、一つ前の融氷期のタイミングについても知見を得ている(Thomas *et al.*, 2009)。しかし、タヒチが火山島であることからくる海底地形の急峻さなどから、LGMのサンプルの回収には至らなかった(Camoin *et al.*, 2012)。

サンゴ礁試料でなく堆積物からは、LGMまでのデータ復元が2000年に南シナ海と北西オーストラリアでなされ(Hanebuth *et al.*, 2000; Yokoyama *et al.*, 2000)、当時のグローバルな海水準低下が、バルバドスで得られた結果よりも大きい(深い)とされてきた(Yokoyama and Esat, 2011)。しかし放射性炭素年代は、地球磁場や海洋循環の変化を反映して、高い精度の年代が得られないことから(Yokoyama *et al.*, 2004; 2008)、ウラン系列核種を用いることのできるサンゴ試料の採取への期待が大きかった(Esat and Yokoyama, 2006; 2010)。

4. グレートバリアリーフ環境変動 (Exp 325)

そのような中、IODPのグレートバリアリーフ掘削が2010年2月11日から開始された。Co-ChiefはJ-DESCから横山祐典(東大)、ANZICからJody Webster(シドニー大)が選出された。当初2-3週間のサンプリングの予定でタウンズビルを出港、最初の掘削ポイントであるハイドログラファーズパッセージに向かった。しかし掘削に

使った船はGreat Ship Mayaという新しい船で、慣熟航海もそこそこにIODPに投入されたため、様々なトラブルがおこった。まずは6機あるGPSが1機を残して全て故障し、トランスポンダーを補助で使用するも、結局DPが使えなくなり、急遽新しいものと交換する必要が出てきた。また掘削技術に関しても今回新しく契約されたジオエンジニアリング会社の船員達が、壊れやすくもろい炭酸塩の回収をうまく行えず、毎日Co-Chiefも加わりながら技術的な検討を行いつつ、文字通り手探りの状態で掘削を続けた。Exp 310の掘削を担当した会社を使わないと判断したMSPオペレーション側の問題もあったと思われるが、タヒチの沈水サンゴ礁とは異なり、マイクロブライトとよばれる、微生物が作った炭酸塩での間隙の充填が起きてなかったため、Exp 325に適した方法(コアパレルの検討やトルクのかけ方等)の詳細な検討が必要になってきたことが原因であろうことも、同時に想像に難しくない。また、新造のGreat Ship Mayaを投入することになったため、掘削に適した気候ウインドウの外れにあたり、サイクロンに2回見舞われ、掘削終了間際は、それから半年以上続く貿易風によるうねりによって困難な掘削を行い、最終的にはその影響が大きくなったためOffshore作業を終了せざるを得なくなった(ヒープ補償装置による掘削可能波浪高を越す日々がほとんど続いた)。3つのトランセクトのうち、もっとも現在のサンゴ礁に近づくサイトの掘削の際には、オーストラリア海洋公園保全局(GBRMPA)の担当官が、監視のために乗り込むことになっていたのだが、何度かGreat Ship Mayaへの乗船を試みるも、波が高すぎてそれを断念せざるを得ないほどであった(なので、掘削も行えなかったが...)。チリ沖でおこった地震による津波も到達したかと思えば、2回の小火も起き、結局タウンズビル入港は予定を大幅に遅れる4月6日であった。

Co-chiefとしては、恐らく最初で最後であろう世界遺産のグレートバリアリーフ掘削で、できるだけ良好な状態の試料を多く採取したいというこ

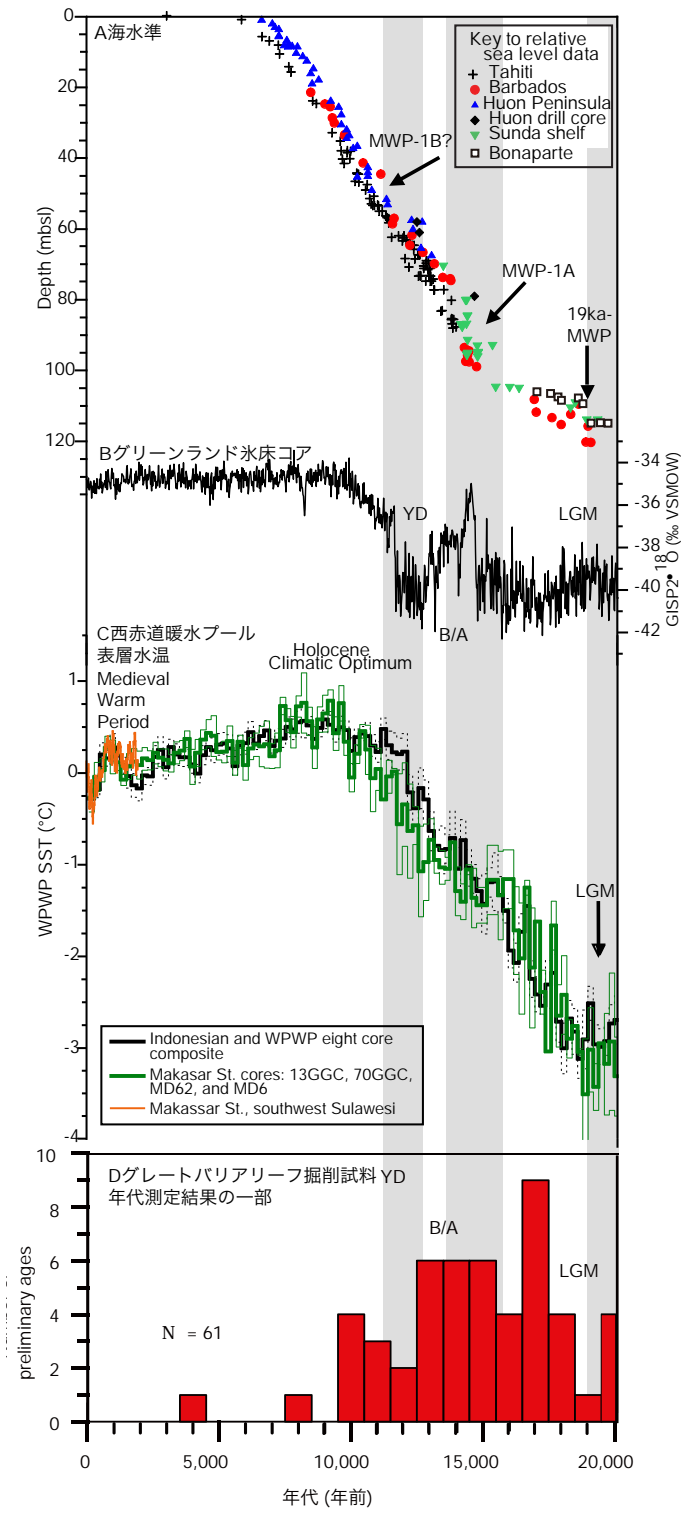


図2 グレートバリアリーフから得られたサンゴ礁試料と、最終融氷期の重要な気候アーカイブ。過去2万年間の海水準 (A), 気候変動 (グリーンランド氷床コア (B) および西赤道太平洋暖水プール (C) の表層温度変化), そして今回得られたサンゴ礁サンプルの年代測定結果の一部 (D) [Yokoyama et al., 2011 を改変]。最終氷期最盛期 (LGM) や氷期の終焉期に起こった急激な気候変動 (B/A, YD) それに急激な海水準上昇イベント (19ka-Mwp, Mwp-1a, Mwp1b) などカバーできている。

とで、掘削の技術的な側面の提案も行いながら（重要なサイトのコアについては、回収率の低さをストロークの短さで補うことやコアバレルの変更など）、何とか最低限の試料採取は行え、何よりこれだけのトラブルに見舞われながら、ケガ人や病人を出さずに済んで一安心した。

サンゴ礁掘削の場合、同じ深度の試料でも、サンゴのどの部分をサンプルとして使うかで、分析の結果が変わってくる。そこで陸上サンプリングの際（Onshore Party 2010年7/2-7/16 @ プレーメン）、より建設的な議論を行いながらのサンプリング作業が行えるように、Co-chief提案で、コアのトップと中程、そしてボトムの年代をボランティアで事前に分析・決定するという方法をとった（サンプリング作業前のデータは、Expedition Scientists 全員の成果とされる）。筆者のところにある加速器質量分析装置にて放射性炭素年代を、オックスフォード大の誘導プラズマ質量分析装置にてウラン系列核種の分析を行うことで実現した（Yokoyama *et al.*, 2011）。その結果、採取した試料がLGMを含む、過去30,000年以上遡れるところまでカバーしていることが明らかになり（図2）、また、海水準の結果についても既存の研究と異なり、複数のトランゼクトで類似の変動曲線が復元され、極めて高い信頼度をもつ結果を得ることに成功した（Yokoyama *et al.*, 2013）。現在、LGMの水温復元の結果などを含む複数の論文が投稿されており、高いインパクトのある成果が徐々に公表されつつある。

5. おわりに

IODPの枠組みで2回目となるExp 325は、貴重な試料の回収に成功し、現在はサイエンスパーティメンバーを中心に、成果が公表されつつある。日本からも多くのメンバーが加わり（筆者の他に鈴木淳、井龍康文、菅浩伸、藤田和彦、井上麻夕里、Marc Humbletの各氏）、分析および論文執筆作業を行うなかで、日本の研究者のプレゼンスを大きくアピールしている。10年間のIODPで日本が中心的なプレーヤーとして動いてきた御旗

で、地球環境関連の研究分野のレベルアップに繋がったと感じている。MSPも重要なオプションとしてサンゴ礁掘削などに活躍しており、是非今後も掘削活動を行う必要があるが、一方で、“技術の継続性”の大切さも痛感したExpeditionでもあった。

参考文献

- [1] Camoin, G. F., Seard, C., Deschamps, P., Webster, J. M., Abbey, E., Braga, J. C., Iryu, Y., Durand, N., Bard, E., Hamelin, B., Yokoyama, Y., Thomas, A.L., Henderson, G. M., and Dussouillez, P., 2012. Reef response to sea-level and environmental changes during the last deglaciation. IODP Expedition 310 "Tahiti Sea Level". *Geology*, 40 : 643-646.
- [2] Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N. S., Hammer, C. U., Hvidberg, C. S., Steffensen, J. P., Sveinbjörnsdóttir, A. E., Jouzel, J., and Bond, G., 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364 : 218-220.
- [3] Deschamps, P., N. Durand, E. Bard, B. Hamelin, G. Camoin, A. L. Thomas, G. M. Henderson, Okuno, J., and Y. Yokoyama, 2012. Ice-sheet collapse and sea-level rise at the Bølling warming 14,600 years ago. *Nature*, 483 (29 March 2012) : 559-564.
- [4] EPICA Community Members, 2006. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature*, 444 : 195-198.
- [5] Esat, T. M., and Y. Yokoyama, 2006. Variability in the Uranium isotopic composition of the oceans over glacial-interglacial timescale. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70 : 4140-4150.
- [6] Esat, T. M., and Y. Yokoyama, 2010. Coupled uranium isotope and sea-level variations in the oceans. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74 : 7008-7020.
- [7] Fairbanks, R. G., 1989. A 17,000-year glacio-eustatic sea level record : influence of glacial melting dates on Younger Dryas event and deep ocean circulation. *Nature*, 342 : 637-642.
- [8] Hanebuth, T., K. Statterger, and P. M. Grootes, 2000. Rapid flooding of the Sunda Shelf : a late-glacial sea-level record. *Science*, 288 : 1033-1035.
- [9] Liu, Z., Otto-Bliesner, B. L., He, F., Brady, E. C., Tomas, R., Clark, P. U., Carlson, A. E., Lynch-Stieglitz, J.,

Curry, W., Brook, E., Erickson, D., Jacob, R., Kutzbach, J., and Cheng, J., 2009. Transient Simulation of Last Deglaciation with a New Mechanism for Bølling-Allerød Warming. *Science*, 325: 310-314.

[10] Thomas, A.L., G. Henderson, P. Deschamps, Y. Yokoyama, A. J. Mason, E. Bard, B. Hamelin, N. Durand, and G. Camoin, 2009. Penultimate Deglacial Sea Level Timing from Uranium/Thorium Dating of Tahitian Corals. *Science*, 324: 1186-1189.

[11] Yokoyama, Y., Lambeck, K., DeDeckker, P., Johnston, P., and Fifield, L.K., 2000. Timing of the Last Glacial Maximum from observed sea-level minima. *Nature*, 406 : 713-716.

[12] Yokoyama, Y., and T. M. Esat, 2004. Long term variations of uranium isotopes and radiocarbon in surface seawater as recorded in corals. *Global environmental change in the ocean and on land*, 1 : 279-309.

[13] Yokoyama, Y., H. Matsuzaki, and T. M. Esat, 2008. Prospects for the New Frontiers of Earth and Environmental Sciences. *Quaternary Geochronology*, 3 : 206-207.

[14] Yokoyama, Y., and T. M. Esat, 2011. Global Climate and Sea Level-Enduring variability and rapid fluctuations over the past 150,000 years. *OCEANOGRAPHY*, 24 (2) : 54-69.

[15] Yokoyama, Y., Webster, J. M., Cotterill, C., Braga, J. C., Jovane, L., Mills, H., Morgan, S., Suzuki, A. and the IODP 325 Scientists 2011. IODP Expedition 325 : The Great Barrier Reef Reveals Past Sea-Level, Climate and Environmental Changes since the Last Ice Age. *Scientific Drilling*, 12 : 32-45.

[16] Yokoyama, Y., Esat, T. M., Thompson, W. G., Thomas, A. L., Webster, J., Miyairi, Y., Matsuzaki, H., Okuno, J., Fallon, S., Braga, J. -C., Humblet, M., Iryu, Y., and Potts, D., 2013. Sea level record obtained from submerged the Great Barrier Reef coral reefs. *EOS Transactions, American Geophysical Union*.

[17] Yokoyama, Y., and T. M. Esat, 2014. Coral Reefs. In : I. Shennan, Long, A., and Horton, B. (Editor) , *Handbook of Sea-Level Research*. John Wiley, Oxford.

