



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

Expedition 303/306 : 北大西洋海域における 氷床・海洋・大気相互 作用の解明

佐藤 時 幸
金 松 敏 哉

Expedition 303/306 North Atlantic Climate

Tokiyuki Sato • Toshiya Kanamatsu

さとう ときゆき : 秋田大学
かなまつ としや : 独立行政法人海洋研究開発機構

IODP Expedition 303 と 306 の掘削は、中新世—第四紀のミレニアムスケールの気候変動に敏感な Labrador 海と、北大西洋 Ice Rafted Debris belt (IRD 帯) において、酸素同位体と堆積物地磁気強度を使った高解像度の古海洋変動解析を行うため実施された。

1. はじめに

グリーンランド氷床コアに見られる、最終氷期の数十年から数百年のタイムスケールの急激な温度変化 (Dansgaard Oeschger イベント : e.g. Johnsen *et al.*, 1992) により、ハドソン海峡から北大西洋に IRD が放出される (Heinrich イベント : Broecker *et al.*, 1992) と考えられた (e.g. Bond and Lotti, 1995). この北大西洋のミレニアムスケール気候変動は、最終氷期については良く知られているが、それ以前については、十分な知見が得られてなかった。深海掘削により、最終氷期—間氷期サイクルを超えたインターバルの気候変動を研究するため IODP Expedition 303/306 航海が計画された。航海の具体的な目的を以下に列挙する。1) 北大西洋では、いつから Heinrich イベントが出現したか？ 2) ミレニアムスケールの変動は mid-Pleistocene transition 以前でも同様か？ 3) 北大西洋の、空間的な表層—深層水の特徴は、ミランコビッチサイクルスケールとミレニアムスケールでは同じか？ 4) 更新世を通じて 1500 年周期は安定か？ 5) 堆積物地磁気強度の年代学は、最終氷期以前でも使用でき、酸素同位体とリンクさせる事ができるか？ 6) 地域的な $\delta^{18}\text{O}$ と温度を記録している底棲の $\delta^{18}\text{O}$ の記録は、堆積物地磁気強度タイムスケールで解析する事ができるか？ 7) 地磁気強度解析のために、均質な岩相の試料を採取できるか、また、地層は地磁気をきちんと記録しているか？ 8) 地磁気変動である、逆転、エクスカッション、短い磁極の変動はどのようなものであるか？ 9) 地磁気は宇宙起源物質の地球への侵入をコントロールしているか？ 北大西洋気候変動、IRD の変動と宇宙起源物質の相関は気候と地球磁場変動、または気候変動と太陽活動に関連があるか？これらの課題に

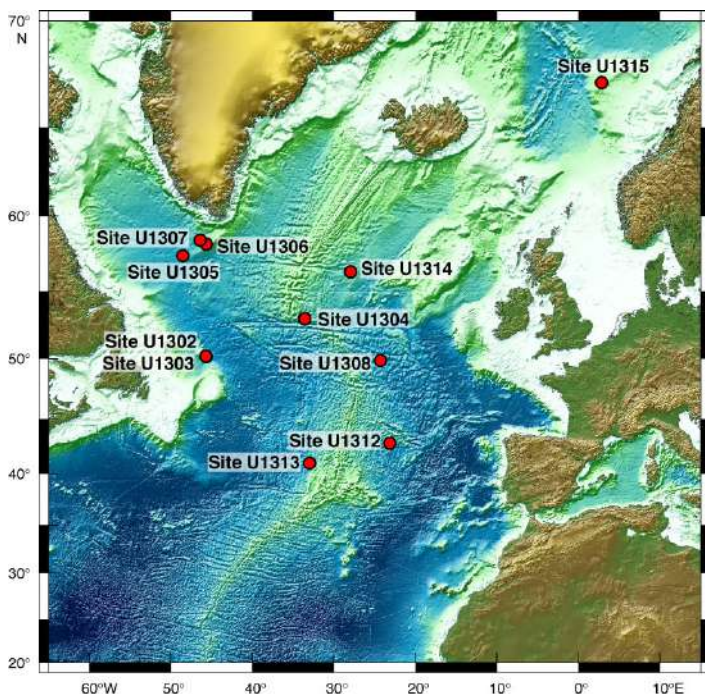


図1 IODP Expedition 303/306 の掘削サイトの位置 (Channell *et al.*, 2010 から).

取り組むため、2つの航海で11サイトを掘削した(図1)。高品質のコアを得るため、掘削法はAPCのみとし、その能力の限界まで掘削を進め、各サイトにおいて、コンポジットセクションを得られるよう複数の孔を掘削した。Expedition 303では、U1302からU1308の7サイトを掘削し、Expedition 306ではU1312からU1315の4サイトを掘削した(図2)。これまでに得られた試料を使い、多くの成果が挙げられている。それらをサイト毎にまとめ、以下に紹介する。

2. Site U1302 および Site U1303

ローレンタイド氷床の消長を、海底堆積物中の陸減物質から探るため Labrador 海膨の Orphan 海丘において U1302 と U1303 が掘削された。岩相は、クレーとナンノ化石軟泥で特徴づけられる。ナンノ化石の産出は良好で、精度良い生層序が確立された。浮遊性有孔虫 *Neogloboquadrina pachyderma* (sinistral) と渦鞭毛藻の出現頻度は、氷期

–間氷期サイクルに良く対応していた (Shipboard scientists, 2005)。ブルン期の浮遊性有孔虫の酸素同位体データが連続的に取得された (Hillaire-Marcel *et al.*, 2011)。古地磁気から平均堆積速度は 13.5 cm/k.y と見積もられ (Channell *et al.*, 2010)、Iceland Basin excursion (188 ka) などのいくつかのエクスカーションが見つかっている。堆積物地磁気強度の層序は、酸素同位体と対比でき (Channell *et al.*, 2010)、高解像度の年代コントロールが提供できる。ハインリッヒイベント層に含まれる炭酸塩量を見積るのに、Ca/Sr 比、密度、磁気パラメーターが使用された (Hodell *et al.*, 2008)。

3. Site U1304

U1304 の目的は、Gardar Drift 南縁から NADW 深層水の記録を得る事であった。ローレンタイド氷床の消長については、U1302 や U1303 に比べ遠地の情報が得られる事が期待された。岩相は珪藻軟泥とナンノ化石軟泥で特徴づけられる。このう

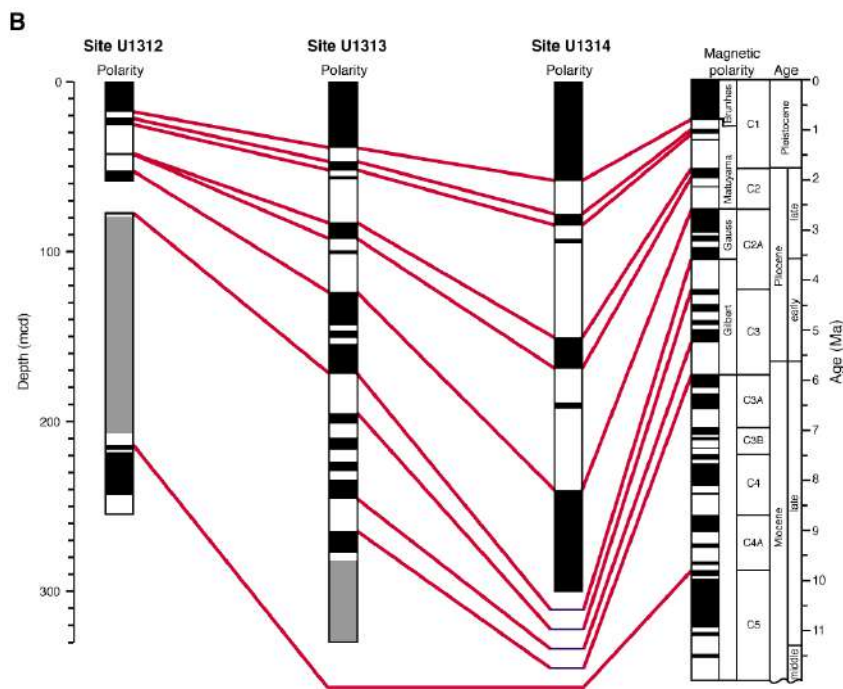
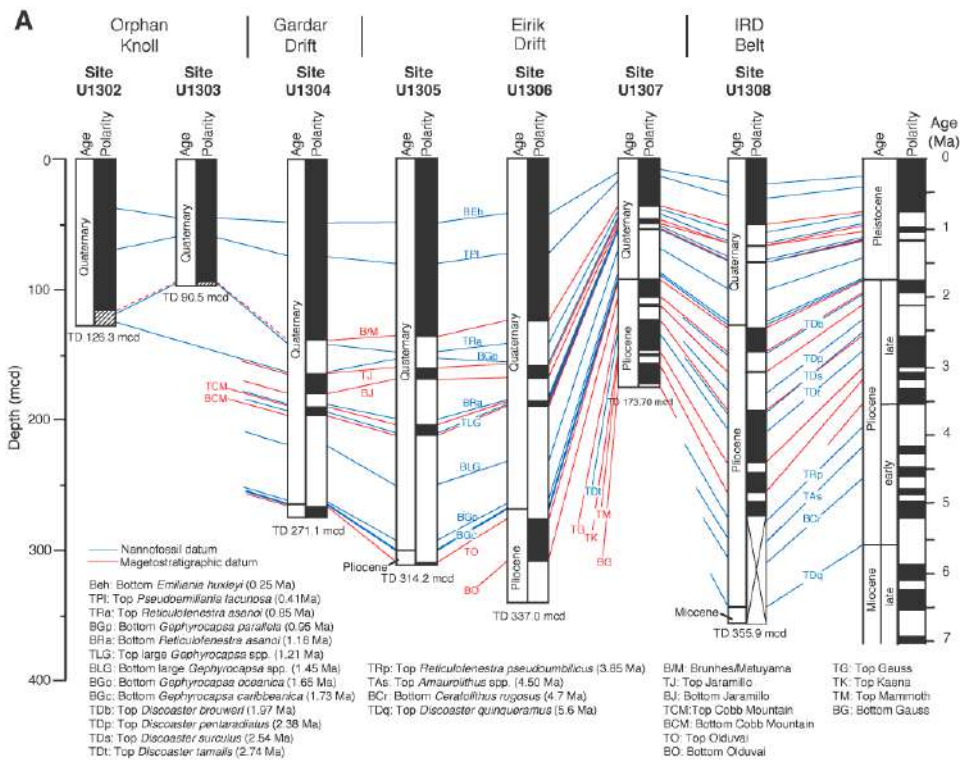


図 2 Expedition 303 (A) と 306 (B) で採取されたコアの層序 (Site U1315 を除く)。IRD=ice-rafted debris. 青線=ナノ化石層序, 赤線=古地磁気層序, 古地磁気極性柱状(左)で, 黒は正磁極, 白は逆磁極, ハッチまたは, 正磁極と逆磁極の中間と解釈されるインターバル。TD=サイトの最深深度 (Channell *et al.*, 2010 から)。

ち繰り返す葉理化した珪藻マットが岩相上、顕著な特徴である。珪藻マットは寒冷時と温暖時と両方で形成されたことが分かった (Shimada *et al.*, 2008)。有孔虫の *Neogloboquadrina pachyderma* (sinistral) の殻のサイズの変化が北大西洋だけでなく、太平洋でも起こっている事が報告された (Yamasaki *et al.*, 2008)。U1304 での酸素同位体データはこれまで MIS5 で詳細にされている (Hodell *et al.*, 2009)。

4. Site 1305, Site 1306, および Site 1307

Erick Drift で U1305, U1306, U1307 が掘削された。U1305 および U1306 の 2 つのサイトは、厚い第四紀が掘削されたのに対し、U1307 は第四紀層が薄く、鮮新世をカバーする事が目的であった。

Site U1305

Eirik Drift で掘削した U1305 は西岸境界底層流 (WBUC) 下にあり、岩相は陸源物質と、生物源物質が混合したものである。微化石の保存は 200 m までは良好であった。微化石群集は垂極から極域を示し、寒冷を示す小さなサイズの浮遊性有孔虫は、底棲有孔虫の出現と同期し、底層水の影響と解釈された (Shipboard Scientists, 2005)。間隙水のデータは有機物含有量が低いのかかわらず、硫黄 / メタン境界が存在し、有機物の分解が間隙水の化学組成を支配していることが報告された (Ennyu and Malone, 2009)。これは U1306, U1307 でも同様なパターンを示す。Kawamura *et al.*, (2012) は、間隙水の組成変化に伴い、磁性鉱物に続生作用が起こり、U1305, U1306, U1307 で磁性鉱物の種類や粒度に変化が見られる事を報告した。陸源炭酸塩 (Heinrich-type) レーヤーは、特殊なバイオマーカーで特徴づけられ、その起源はハドソン海峡付近のオルドビス紀のオイルシェールを示唆している (Hefter *et al.*, 2007)。Kawamura and Kanamatsu (2010) は、磁気ファブリックから、こういった砂層と陸源炭酸塩は、南からの古流向を示すとした。

Site U1306

U1306 サイトは U1305 の相補的な位置づけにあり、U1305 同様に WBUC の軸部に於て第四紀環境の変化を知るために掘削された。底棲有孔虫は深度 175 m 以下で産出しないが、他の微化石群集は多様な産出で特徴づけられる。多くの化石種は、SST が寒冷であった事を示唆している。古地磁気記録はブルネ期とマツヤマ期をカバーした (Shipboard Scientific Party, 2005)。

Site U1307

U1307 は第四紀層が薄く、U1306 の下位に相当する 3.6 Ma までの鮮新世が採取された。U1307 の掘削により、深層水と表層水の変動、ローレンタイドと、グリーンランドの氷床の消長史解明が期待された。岩相は陸源物質と生物源物質の変化より区分された。ナンノ化石層序より、56–61 m (およそ 1.21–1.45 Ma) にハイトス、または低堆積層度の区間があることが示唆された。更新世の微化石群集は、垂極から極域の種が卓越している。一方、下部後期鮮新世 (2.74 Ma 以前) では、ナンノ化石の群集は、温暖な表層水温を示す。Sarnthein *et al.* (2009) は、2.7–3.5 Ma の酸素同位体データと表層温度のプロキシーを使い、3.2–3.0 Ma に寒冷化と淡水の影響が合った事を示し、東グリーンランド海流の変化すなわちパナマ運河が閉じたためと解釈した。

5. Site U1308

U1308 は、これまでの北大西洋ミレニアムスケール古海洋学で重要な役割を果たしてきた DSDP site 609 の再掘削であった。今回の高解像度層序により詳細な記録を得ることが計画された。完新世から上部鮮新世の U1308 は、ナンノ化石軟泥と陸源物質の量比からユニットが区分された。ナンノ化石は上部 200 m の保存が良いが、それ以下では徐々に悪くなる (Sato *et al.*, 2009, Chiyonobu *et al.*, 2010)。佐藤 (2010) は、U1308 の極めて精度高いナンノ化石層序と、過去のデータに

に基づきパナマ海峡の成立と、寒冷化について議論した。約1.5 Maにあたる上部110 mでは高解像度の底棲有孔虫の酸素同位体が得られている(Hodell *et al.*, 2008)。Heinrich レーヤーは、帯磁率、ガンマ線密度、バルク炭酸塩の $\delta^{18}\text{O}$ 、Ca/Sr から識別でき、陸源炭酸塩の $\delta^{18}\text{O}$ はおよそ9‰と有孔虫のそれと比べると有為に低いため、バルク炭酸塩の $\delta^{18}\text{O}$ から、陸源炭酸塩を検知できる(Hodell and Curtis, 2008)。ハドソン海峡起源のHeinrich レーヤーは、MIS 16 からその存在が認識された。陸源炭酸塩はMIS 8, 10, 12, 16, に認められ、しかしMIS 6 と 14 には認められなかった(Hodell *et al.*, 2008a)。このサイトで、古地磁気強度層序が酸素同位体曲線で校正され、1.5 m.y. までのデータが得られ、他の過去のサイトのデータと合わせ、古地磁気強度層序と酸素同位体層序をスタッキングさせたモデルが発表された(PISO-1500 : Channell *et al.*, 2009b)。これにより精度高いタイムスケールが提供される。

6. Site U1312

U1312 は、DSDP site 608 の再掘削で、上部中新統を連続高解像で、表層、深層水の記録を得る事が目的であった。しかしながら、荒天のためコアの品質はよくなく、コンポジットセクションを作る事ができなかった。2 Ma までの堆積物地磁気強度の記録が、他の北大西洋の記録と対比された(Kanamatsu *et al.*, 2010)。

7. Site U1313

U1313 は、北大西洋古海洋変動のベンチマークであった Site 607 を高解像度層序で解析し直すことが目的であった。このサイトでは後期中新世(6 Ma)までのコンポジットセクションが確立できた。岩相は、ナンノ化石軟泥とクレーで構成され、鮮新世から中部中新世は均一なナンノ化石軟泥である。ナンノ化石の保存は良く、3 Ma までの詳細な生層序が編まれた(Hagino and Kulhanek, 2009)。鮮新世-更新世の浮遊性有孔虫のイベントが、地中海のそれと比較された(Sierro *et al.*,

2009)。また浮遊性と底棲有孔虫から MIS 10-16 のインターバルの同位体曲線の記録(Voelker *et al.*, 2009, 2010) から、Heinrich タイプのイベントは MIS 10 と 12 に起こっており、底棲有孔虫の低い $\delta^{13}\text{C}$ は子午面循環の弱化和南極深層水の影響が、氷期にあったためと解釈されている(Voelker *et al.*, 2010)。バイオマーカーのデータに基づき、SST、生物生産量、IRD 出現を氷期や間氷期で対比し、氷床融解は、高緯度の日射量増加が引き金になったと考えられた(Stein *et al.*, 2009)。Ferretti *et al.* (2010) は、浮遊性および底棲有孔虫の MIS 20-23 の $\delta^{18}\text{O}$ から、他の北大西洋にも同様に認められるように MIS21 は4つの垂間氷期が認められることを報告した。

8. Site U1314

Gardar Drift におけるU1314での目的は、深層水の記録を、Gardar Drift 南端のU1304や、他の掘削サイトのそれと比較する事であった。岩相はナンノ化石軟泥とクレーで構成される。3 Ma までの古地磁気層序は非常に明瞭であり、ガウス-マツヤマ磁極逆転など詳細な古地磁気記録が得られている(Ohno *et al.*, 2008, 2012)。Alvarez Zarikian *et al.* (2009) は、17万年までの貝形虫化石群集を解析し、出現量、多様性、群集組成が深層水や氷期-間氷期サイクルの変化とリンクしていることを示した。mid-Pleistocene transition の前後で岩石磁気学データから堆積物供給に変化があった事が示された(Kanamatsu *et al.*, 2009)。Hayashi *et al.* (2012) は2.76-2.10 Maを帯磁率や、自然ガンマ線を使い、より詳細な年代のチューニングをする事に成功し、北大西洋の環境変動、特にミレニアムスケールの変動を論じた。

9. Site U1315

底層水の温度と塩分濃度をモニタリングするため、site 642 と同地点で、CORK を設置し、ヒートフローを測定することで、海底から伝わる底層水の温度を、過去100年間分、解析することを目指して、機器を設置した。(Harris and Higgins, 2008)。

10. まとめ

Expedition 303/306 のゴールは、北大西洋において、後期中新世から第四紀までの環境変動を、高解像度酸素同位体の記録と堆積物地磁気強度の記録により得る事であった。U1312 以外のサイトでは、良質な堆積物が採取され、各サイトで精度高いナンノ化石を中心とした生層序が立てられた (Sato *et al.*, 2009 ; Chiyonobu *et al.*, 2010, Hagino and Kulhanek, 2009 : 図 2 参照)。またミレニウムスケールの急激な気候変動を研究するための高精度の酸素同位体層序と堆積物地磁気強度の複合年代スケールが U1308 を中心に組み立てられた (Channell *et al.*, 2009b)。

U1308 の解析で、Heinrich レーヤーは、帯磁率、ガンマ線密度、Ca/Sr から認識できることが分かった。また Heinrich レーヤーの陸源炭酸塩の $\delta^{18}\text{O}$ は、有孔虫のそれと比べると有為に低いため、バルクの $\delta^{18}\text{O}$ から、陸源炭酸塩の混入すなわち、氷床融解のイベントを表していることが分かった (Hodell and Curtis, 2008)。ハドソン海峽から供給された Heinrich タイプの陸源砕屑層は、U1303 と U1308 では、MIS16 で出現する。この時期はおおよそ mid-Pleistocene transition (41 から 100 k.y. へ、氷期-間氷期サイクルが移る) に対応している。ハドソン海峽からの陸源炭酸塩の供給は、MIS 8, 10, 12, と 16 にあり、MIS 6 または 14 には存在しない (Hodell *et al.*, 2008)。一方、Site 1313 においては、Heinrich レーヤーは、陸源炭酸塩を伴う岩片で特徴づけられ、MIS 10, 12, と 16 と Termination V と VII で起こっている (Stein *et al.*, 2009 ; Voelker *et al.*, 2010)。320-640 ka (MIS 9-16) において、SST, 表層生産量と IRD の産出を中緯度大西洋で対比させ、ドロマイトと斜長石、陸源有機物を示すアルケノンが、Heinrich イベントの証拠となる事が分かった (Stein *et al.*, 2009 ; Voelker *et al.*, 2010)。U1314 では、貝形虫の群集変化は深層水循環や気候変動に対応していた (Alvarez Zarikian *et al.*, 2009)。Expedition 303/306 において、特にサイト U1308, U1313, and U1314

の結果は、北大西洋全体の環境変動を代表する記録で、酸素同位体と、堆積物地磁気強度の年代ツールを使って高解像度で解き明かせる事を示した。

参考文献

- [1] Alvarez Zarikian, *et al.*, 2009. Mar. Geol., 258, 69-87.
- [2] Broecker *et al.*, 1992. Clim. Dyn., 6 : 265-273.
- [3] Bond and Lotti, 1995. I Science, 276, 1005-1010.
- [4] Channell *et al.*, 2010. Expedition 303/306, Synthesis : Proc. IODP, 303/306.
- [5] Channell *et al.*, 2009b. Earth Planet. Sci. Lett., 283 (1-4) :14-23.
- [6] Chiyonobu *et al.*, 2010. Data report : Proc. IODP, 303/306.
- [7] Ennyu and Malone, 2009. Data report : Proc. IODP, 303/306.
- [8] Ferretti, P., *et al.*, 2010. Earth Planet. Sci. Lett., 293, 28-41.
- [9] Hayashi *et al.*, 2010. Geochem., Geophys., Geosyst., 11.
- [10] Hagino and Kulhanek, 2009. Data report, Proc. IODP, 303/306.
- [11] Hefter *et al.*, 2007, Am. Geophys. Union, 88 (52) (Suppl.) : PP41C-0689. (Abstract).
- [12] Hillaire-Marcel *et al.*, 2011, Marine Geology , 279, 188-198.
- [13] Hodell and Curtis, 2008, Mar. Geol., 256 (1-4) : 30-35.
- [14] Hodell *et al.*, 2008a. Paleoceanography, 23, PA4218.
- [15] Hodell *et al.*, 2009. Earth Planet. Sci. Lett., 288, 10-19.
- [16] Johnsen *et al.*, 1992, Nature, 359 : 311-313.
- [17] Kanamatsu *et al.*, 2010, Data report : Proc. IODP, 303/306.
- [18] Kanamatsu *et al.*, 2009. Mar. Geol., 265, 31-39.
- [19] Kawamura and Kanamatsu, 2011. Data report : Proc. IODP, 303/306.
- [20] Kawamura *et al.*, 2012. Geochem., Geophys., Geosyst., 13.
- [21] Ohno *et al.*, 2008. Earth, Planets Space, 60, 13-16.
- [22] Ohno *et al.*, 2012. Geochem., Geophys., Geosyst., 13.
- [23] Sarnthein *et al.*, 2009. Clim. Past, 5 (2) : 269-283.
- [24] Sato *et al.*, 2009. Data report : Proc. IODP, 303/306.
- [25] 佐藤時幸, 第四紀研究, 49, 283-292, 2010.
- [26] Shipboard Scientific Party, 2005. Prel. Rept., 303.
- [27] Shimada *et al.*, 2008 Mar. Micropaleontol., 69, 139-150.
- [28] Sierro *et al.*, 2009, Data report : Proc. IODP, 303/306.
- [29] Stein *et al.*, 2009. Paleoceanography, 24, PA2203.
- [30] Voelker, A. H. L., *et al.*, 2009. Clim. Past, 5 : 1553-1607.,
- [31] Voelker *et al.*, 2010. Geophys. Res. Abst., 12 : EGU2010-10810.
- [32] Yamasaki *et al.*, 2008. Open Paleontol. J., 1, 18-23.

