



統合国際深海掘削計画 (IODP)
- 2003年から10年の成果 -

Exp. 313 ニュージャージー沖 陸棚浅海掘削 上部始新統-上部中新統の 堆積シーケンスの実証

安藤 寿男
林 武司
大塚 宏徳

Exp. 313 New Jersey Shallow Shelf

Hisao Ando • Takeshi Hayashi • Hironori Otsuka

あんどう ひさお : 茨城大学理学部
はやし たけし : 秋田大学教育文化学部
おおつか ひろのり : 東京大学大気海洋研究所

大西洋北西岸ニュージャージー沖の陸棚域の上部始新統-上部中新統 (35 - 14 Ma) の長尺コア掘削に成功し、震探断面-コア-ログ記録の詳細な対比から、10数層の堆積シーケンスの存在とその内部構造が実証された。また、その構造を反映した陸棚下の間隙水の挙動やその化学組成分布の詳細が明らかとなった。

1. はじめに

大西洋北西岸ニュージャージー沖の陸棚域は、安定した速度で海底が沈降しており、静穏境界としては堆積速度が速く、年代決定に適した微化石 (有孔虫、珪藻、石灰質ナノ化石など) がよく保存されていることから、海水準変動と堆積シーケンスとの関係を明らかにするのに適した「自然の実験室」とも言われてきた (Miller *et al.*, 2011 など)。1990年代には、白亜紀から新生代後期にかけての海水準変動を解明するための掘削調査が、陸棚縁 (ODP Leg. 150 : 1993年, 174A : 1995年) と沿岸陸域 (Leg. 150X : 1997年, 174AX : 1998年など) で行われていた (図1)。しかし、陸棚の海底下に厚く発達する古第三紀始新世-新第三紀中新世の砂質堆積物を直接掘削する研究は、その後の関係者の長年の提案や努力にもかかわらず、技術的に困難であったため実現していなかった。

Exp. 313では、石油資源探査等で取得された詳細な地震探査断面から読み取れる北米大陸東縁の陸棚下の内部構造を、掘削されたコア堆積物試料や坑内計測データから実証し、この地域の浅海における堆積システムが汎世界的海水準変動に対応して、どのように形成されたのかを解明することを主要な目的としている。そして、海水準変動の時期・速度・振幅の予測、海水準変動支配要因の解明、海水準変動に伴う堆積環境の変遷史、シーケンス層序、堆積後の地層の物性変化、陸から海域への堆積物運搬様式、海底下の間隙水中の溶存物質の挙動特性など多くの研究が展開されている。

本論では、この研究航海の概要と、筆者らが携わっている研究や筆者らが把握している研究グループの最近の成果の一部を紹介する。

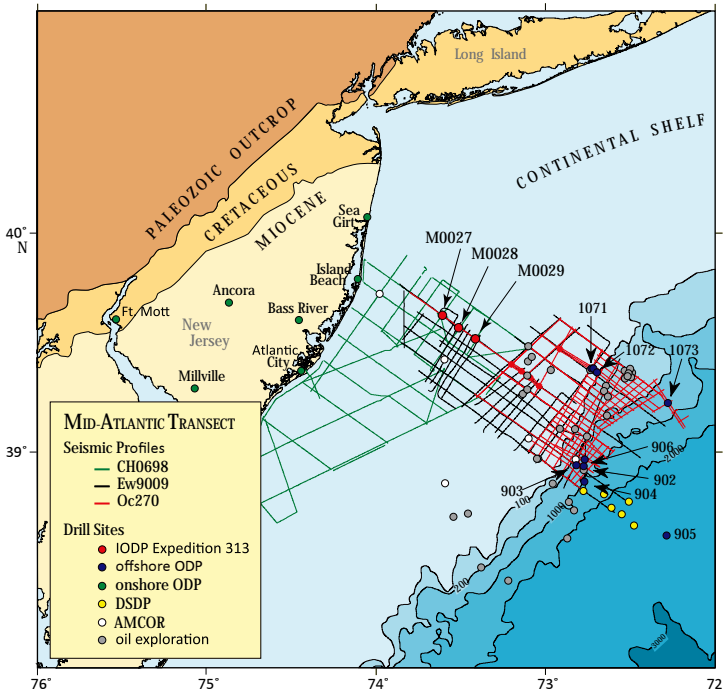


図1 Exp. 313 の掘削地点M27, M28, M29 (Mountain *et al.*, 2010).

2. 掘削の概要

Exp. 313 は、ニュージャージー沖 45 – 65 km の水深約 35 m という浅い陸棚で、MSP (特定任務掘削船) によって行われた (2009/4/30 ~ 7/17 の 79 日間)。ESO (欧州地球掘削科学コンソーシアム) が備船した民間のジャッキアップ型石油掘削船は、船上研究設備が限られるため、常駐する ESO 技術者以外の研究者は 2 ~ 3 週間交代で数名ずつ乗船した。そのため、研究者全員が一堂に会したのは、コア半割後のコア記載・測定等の陸上研究が行われた (2009/11/6 ~ 12/4 の 29 日間)、ブレーメン大学コア研究施設 (BCR) であった。

掘削は、陸棚の中央やや陸よりから海陸断面方向に 3 本行われた。総掘進長 2056 m のうち、コア採取を目指した区間の 80% に達する総延長 1311 m のコアを採取することに成功した。掘削深度はそれぞれ、陸側より 631 mbsf (M27A), 668 mbsf (M28A), 757 mbsf (M29A) である (図 1)。これらは、ODP や IODP において初めて掘削に成功した浅海陸棚砂質堆積物の長尺試料である。

3. 層序・堆積相層序・堆積環境の概要

ニュージャージー沖の海岸に直交する陸棚断面に沿う 3 つのサイト (陸側から M27, M28, M29) で、上部始新統-上部中新統 (35 – 14 Ma) におよぶ砂・砂質シルト主体の浅海相が厚く発達することが確認できた。いずれも下半部は海緑石を含むやや固結したシルト岩や砂岩が多く、上半部は未固結のシルトや砂からなっており、様々な堆積構造や、多くの貝化石や有孔虫化石などを肉眼で連続的に見ることができた。掘削深度が大きくなると続成の程度が高くなり、固結度が高くなるとともに海緑石層準も多くなる。

石油探鉱等で行われた精緻な震探断面から読み取れるクリノフォーム (海側に傾斜した前置面が堆積システムの前進によって横臥した S 字レンズ状に発達した構造: 図 2 左下差込図参照) の頂置面から底置面に対応する堆積相変化から、陸棚中部のクリノフォームの内部構造が堆積学的に復元できる。頂置部からクリノフォーム上部では河川やストームの影響を受けた外浜~沖浜の堆積物、

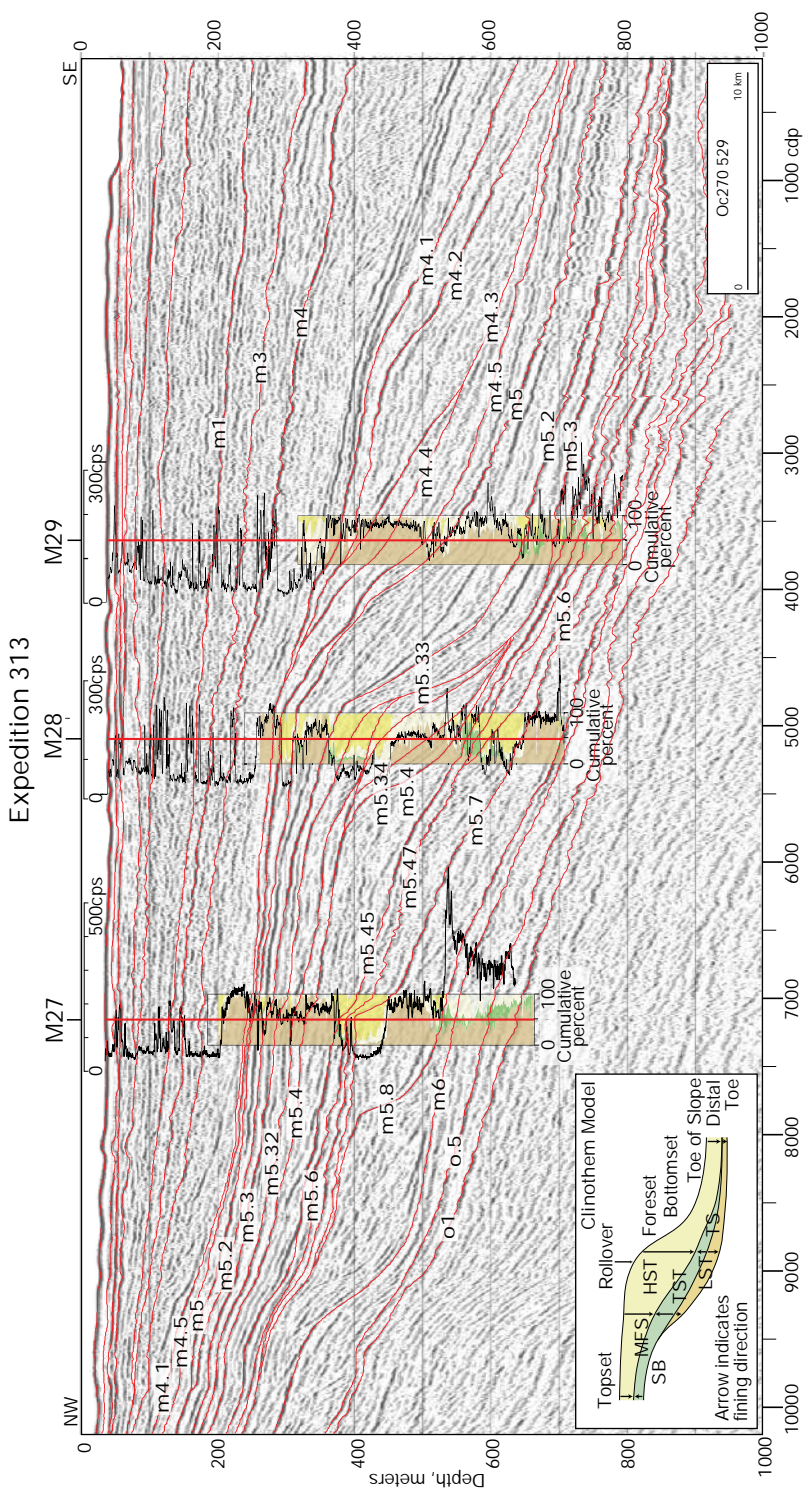


図 2. Exp. 313 の 3 サイト (M27-M29) の柱状断面とそれに沿う震探断面 (Miller *et al.*, 2013a). 往復走時は深度に交換. 赤線は震探層序によるシーケンス境界とシーケンス内の特徴的な反射面 (o1-m1). 柱状の色は粒度 (薄茶: 薄黄: 細粒砂, 黄: 中粗粒砂, 黄緑: 海緑石質) でその中はそれらの割合を表す. 曲線はガンマ線強度. 左下差込図は一般化したクリノフォームモデル (Miller *et al.*, 2013b). TS: 海進面, TST: 海進期堆積体, LST: 低海水準期堆積体, HST: 高海水準期堆積体, MFS: 最大海記鑑面, SB: シーケンス境界.

クリノフォーム下部から底置部には沖浜からストーム波浪限界以深で堆積した堆積物が卓越し、一部は重力流の堆積物とみなされる。また、数層準に葉理が顕著なシルトが発達し、貧酸素水塊の発達も想定される。

砂質シルトより細粒の堆積物からは有孔虫、石灰質ナノ化石、珪藻などが産出し、各コアの年代層序が組み立てられ、堆積シーケンスの累重構造解析の基礎データとなっている。さらに花粉化石群集の解析結果は、風で運搬された木本性植物花粉の組成変化を示しており、気候変動の証拠を提供している。

岩相、堆積構造、粒度、分級、含有大型化石などに基づいた堆積相解析からは、上部外浜～下部外浜、内側陸棚～外側陸棚、外側陸棚、外側陸棚～大陸斜面、大陸斜面～斜面上部堆積物、および海進残留堆積物が確認できた。全体として外側陸棚以深の生物擾乱塊状シルト岩相が卓越するが、M27では上部外浜～下部外浜相や内側陸棚砂質岩相が、沖合側のM28やM29より多い。M29では上部外浜～下部外浜相はほとんど見られない。したがって、M27からM29へとより沖合成の細粒堆積相が卓越する。その層序の変化は北米東海岸周辺の後期始新世～中期中新世の大局的な堆積環境変遷と対応しているようである。いずれにしても、例えば西部内陸海地域の白亜系浅海相によく発達する、ハンモック状斜交層理砂層で特徴付けられるストーム成砂質堆積物はまれで、生物擾乱の卓越した塊状の泥質砂相～砂質泥相が卓越する点では、日本の中新統と類似性がある。

4. 震探断面-コア-ログの詳細対比

この研究航海で最も注目される成果は、35-14 Maの期間に生じた海水準変動によって形成された、10数層の海浜～陸棚～沖合相の堆積シーケンスが識別され、震探断面-コア-ログの対比からその実態が検証されたことであろう。

筆頭主席研究者のG. S. Mountain氏やK. G. Miller氏をはじめとするRutgers ニュージャージー州立大学の研究チームは、本航海研究も含めて、

この20数年にわたって北米東岸地域の陸海域における白亜系以上の地表-地下地質の情報を蓄積してきた。したがって、Exp. 313の成果はこれらを集大成する内容となっており、Mountain *et al.* (2010) や Miller *et al.* (2013a, b) で詳細に記載されている(図2)。

震探断面解釈については、ODP Leg. 150 や 174A, Exp. 313のサイトサーベイ時に用いた多くの断面を再解釈し、特に3サイトの測線については、改めてシーケンスの内部構造解釈を可能にするように詳細に再解析された。

坑井ログおよびMSCLにより測定された物性値も最大限考慮されている。本研究航海では標準的な物性の測定およびワイヤーライン検層が実施された。主要な検層項目は自然ガンマ線スペクトル(ASGR)、インダクション(電気伝導度; DIL45)、帯磁率(EM51)、P波速度(2PSA-1000)および超音波孔壁画像(ABI40)である。各サイトにおいてドリルストリング回収前にVSPおよび自然ガンマ線スペクトル検層を実施したことにより、掘削した3サイトにおいて全区間の連続した自然ガンマ線強度を得た。コア未回収区間も含めた記録が得られたことにより、震探断面との対比およびコア試料の深度決定に際して非常に有効な指標となった。Inwood *et al.* (2013) は3サイトの自然ガンマ線スペクトルを用いたクラスター解析により、掘削サイトの概ね全区間における岩相の推定を試みた。この結果はコア未回収区間における岩相推定に大いに寄与するものであり、特筆すべき成果の一つである。その他の物性値についてはオープンホールで一部区間の測定となったが、回収された分解能の高い超音波孔壁画像や孔径データに加えMSCLやコアスキャン画像等を慎重に対比することで、コア深度の補正およびシーケンス境界の認定に活用された(図3)。

コアについては、岩相、色調、粒度(1.5 m間隔の礫・砂・泥・海緑石頻度)、生痕化石や生物擾乱の程度、海緑石の頻度といったコア観察記録のほか、有孔虫、石灰質ナノ化石、花粉、渦鞭毛藻化石、珪藻による化石層序、底生有孔虫による

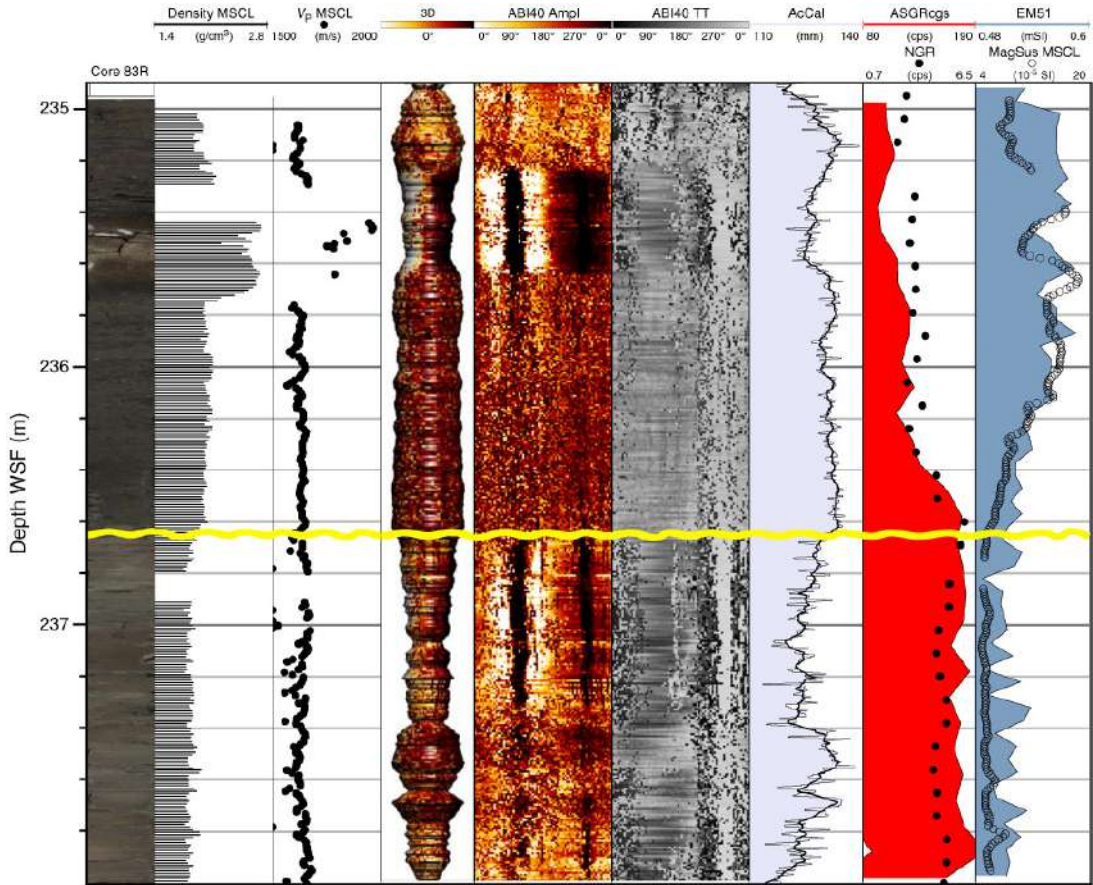


図3 サイトM27で得られた物性値とコア写真の対比 (Mountain *et al.*, 2010). 左からコア画像, 密度 (MSCL), P波速度 (MSCL), 超音波孔壁画像 (3Dイメージ, 振幅, 走時), 孔径, 自然ガンマ線強度 (検層・MSCL), 帯磁率 (検層・MSCL) を示す. 図は下位の泥質堆積物から上位の砂質堆積物 (海緑石含有) に変化する境界に相当する. 下位は孔径が小さく高いガンマ線強度を示す一方で, 上位ではガンマ線強度が減少し, 孔径が拡大している. 当該深度においてはコア試料およびMSCL測定値と検層の対比から約0.4 mの深度補正が行われた. 震探断面との対比を加え, シーケンス境界m5.3 (黄色波線) の深度は236.66 m WSFと認定された.

堆積深度推定値も考慮されている. さらに, 粒度組成変化については, 未固結堆積物の粒度分析の成果も報告されている (Ando *et al.*, in press).

コア観察におけるシーケンス境界や地層境界面 (最大海氾濫面, 海進面など) の判定には, 侵食面や不規則な境界面, 再堆積同時礫の存在, 貝殻片ラグ, 上位からの巣穴痕を含む顕著な生物擾乱, 顕著な岩相・粒度変化, ガンマ線強度の変化, 海緑石密集層準などが, 慎重な吟味の上, 根拠として用いられた. また, 堆積相から想定される堆積環境や古水深変化の傾向は, 堆積体の推論に欠

かせない情報として重視された.

こうした震探断面-コア観察記録-坑井-コアのログが慎重に比較・検討され, 反射面-コア岩相境界-ログ記録変曲点との対応から, シーケンス層序解析が行われた (Miller *et al.*, 2013a, b).

5. 上部始新統-上部中新統シーケンス層序

上部始新統-漸新統のシーケンスは陸側のM27最下部でのみで確認でき, 底生有孔虫による予想古水深で100 m前後とされている. 岩相的には固結した海緑石質砂質シルト岩からなっており, 始

新統-漸新統のシーケンス境界はコア中の侵食面として確認できたが、上下での岩相の大きな違いはない。震探面では顕著な反射面は確認できていない。始新統で1層、漸新世で3層のシーケンスが確認できたが、全体としてやや上方粗粒化する傾向にある。

前期-中期中新統は顕著なクリノフォームを示すために、頂置・前置・底置層の構造が明瞭である。底置層の古水深は中部~下部浅海帯(75-100 m)と推定できるが、それで深でのシーケンス境界の認定は、陸側に比べ容易ではない。クリノフォームの頂置部以浅ではシーケンスが薄くなり、識別は難しい。沖側ほど、新しい上位のシーケンスのクリノフォームが同じような深度に存在するので、実際には、3サイトはクリノフォームの中心を掘削するよう位置が選定されたのである。

前期-中期中新統で少なくとも15のシーケンスが確認されたが、年代層序の精度は ± 0.5 Maというこれまでにない高解像度である。震探インピーダンスから予測されるシーケンス境界や地層境界面の多くは、実際のコアやログ記録で確認ができたため、震探によるシーケンス層序の有用性を実証・補強する結果となった。個々のシーケンス境界付近のコア写真も、付録挿図として網羅されている(Miller *et al.*, 2013a)。

実際には、サイトや層準によって、コアやログでは岩相境界や物性変化が見られない層準に反射面がいくつか予測されていた。取得できる情報を駆使しても、震探解釈によるシーケンス境界とコアとの対応が不明なところもあったのである。したがって、自然のシステムがそう単純でないことを示すことにもなった。しかしながら、震探による境界面予測深度の精度が ± 5 mを超えることはないという結果が得られたことは大きな成果である。いずれにしても、コアにおける堆積相変化のみからシーケンス境界面を認定するのはかなり難しいので、個々のシーケンスの解釈に当たっては、あらゆる情報を総合した細心の注意や最大限の検討が必要である。

最も顕著なクリノフォームを構成する3つの

シーケンス(m 5.8 : 20 - 19 Ma, m 5.4 : 17.7 - 16.6 Ma, m 5.2 : 15.6 - 14.6 Ma)については、高解像震探断面から Wheeler ダイアグラムを描き、3本のコア柱状断面と対応させて、シーケンスの形態や堆積体の構成など内部の構造が詳細に示されている(Miller *et al.*, 2013b)。

シーケンス層序学が確立して以来、陸棚下の震探断面-コアログ記録がこれほど精緻に比較されたのは初めてであろう。また、震探断面をコア柱状断面と対応させて、Wilgus *et al.* (1988)以降のシーケンス層序モデルと堆積体レベルで検証した試みは前例を見ない。シーケンス層序学の有用性と限界を示した重要な成果と位置付けられよう。

6. 間隙水の地球化学性状と起源

ニュージャージー沖では、海水よりも塩濃度が低い間隙水が大陸棚下に広く賦存する一方で、海水以上の塩濃度を有する間隙水も賦存することが、USGSのAtlantic Margin Coring Project (AMCOR)等によって発見されている(Hathaway *et al.*, 1979など)。AMCORでは、ニュージャージー沖の沿岸域から沖合約100 kmの陸棚縁辺部にかけて、Cl濃度が5 g/kgを下回る“fresh”な間隙水が賦存することが明らかとなっている(図4)。一方、陸棚縁辺部~大陸斜面には、海水を上回るCl濃度を有する間隙水が発見されており(Hathaway *et al.*, 1979)、Leg. 150では最大35 g/kg以上のCl濃度を有する間隙水が確認されている(Mountain *et al.*, 1994)。

“fresh”な間隙水の起源としては、従来、陸域で涵養された地下水が広域的な流動によって輸送されてきたとする考えや、最終氷期もしくはそれ以前の氷期に陸化していた陸棚の地表から涵養されたとする考えがあったが、近年のシミュレーションや数値解析的な研究により、最終氷期に現在の陸域から広域的な地下水流動によって涵養されたとする考えや、その広域的な地下水流動が現在まで存在しているとする考えが示されている(Kooi and Groen, 2001 ; Cohen *et al.*, 2010 ; van Geldern *et al.*, 2013など)。一方、海水よりもCl濃度の高い

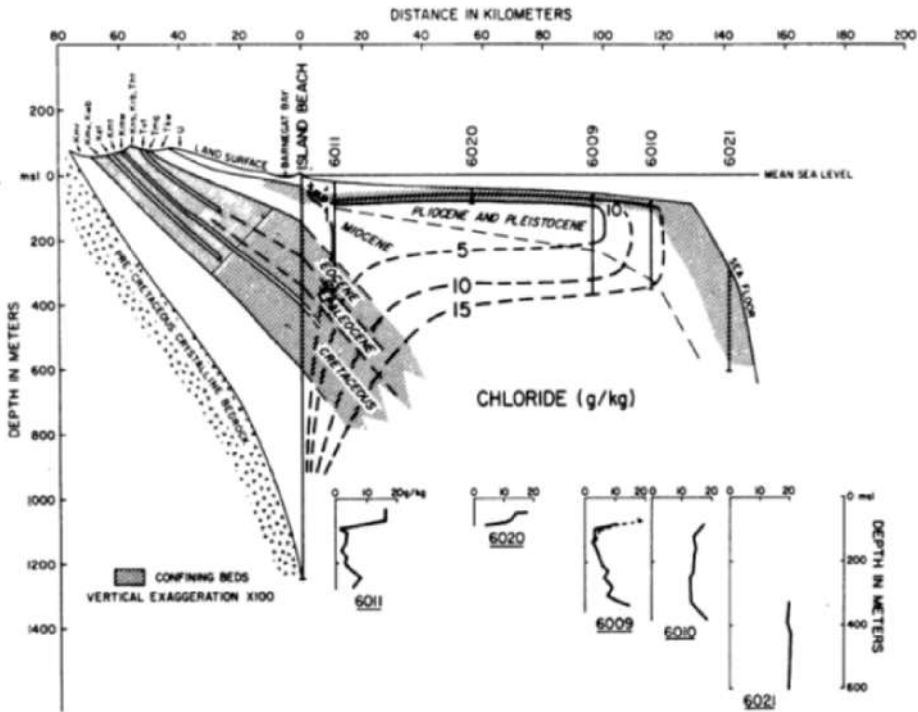


図4 ニュージャージー沖大陸棚下の間隙水のCl濃度分布推定図(Hathaway *et al.*, 1979).

間隙水の起源については、陸棚の地下深部に分布するジュラ紀の蒸発岩に起因するダイアピル(salt diapir: Sheridan and Grow, 1988 など)に由来する鹹水が考えられている。

Exp. 313 では、間隙水はコア採取区間のおよそ9 m ごとに採取され、主要溶存成分や微量金属元素などが測定された。得られた間隙水のCl濃度は約20～995 mM/kgの範囲にあり(図5)、“fresh”な間隙水および鹹水の双方が確認された(Mountain *et al.*, 2010; Lofi *et al.*, 2013)。

3章に述べたように、3サイトでは上半部(浅部)と下半部(深部)で堆積構造や岩相が大きく異なる。このため、浅部と深部では間隙水の挙動特性が異なると考えられるが、全体として“fresh”な間隙水は数十～500 mbsf程度にかけて賦存しており、従来の推定(図4)よりも深部まで“fresh”な間隙水が賦存することが明らかとなった。ただし、“fresh”な間隙水の主要な賦存区間は、掘削地点によって大きく異なっている(図5)。陸側に位置するM27では、“fresh”な間隙水は約200～450 mbsfに連続的に認められるのに対して、沖側の

M29では約200 mbsfより浅部に限られ、賦存区間も断続的である。ただし、浅部の砂質層では掘削泥水(海水)による汚染の可能性があるため、実際には、“fresh”な間隙水がより広範囲に賦存している可能性がある。一方、Cl濃度が海水よりも高い間隙水は、M27では認められなかったのに対して、M28では約620 mbsfより深部に、またM29では約340 mbsfより深部に認められた。M27においても、掘削深度より深部には高Cl間隙水が賦存していると考えられる。

先に述べたように、本研究航海ではクリノフォームを狙って掘削が行われているため、得られた間隙水のCl濃度分布の空間的な広がりについては検討の余地があるが、“fresh”な間隙水は大陸棚下に広く分布し、その下限は沿岸域から沖合に向かって浅くなるものの、少なくとも陸棚中央部までは数百mの厚さを有すると考えられる。また、“fresh”な間隙水の下位には、現海水ではなく鹹水に由来する高Cl間隙水が広く賦存していると考えられる。

海底下に賦存する“fresh”な間隙水は、北米東

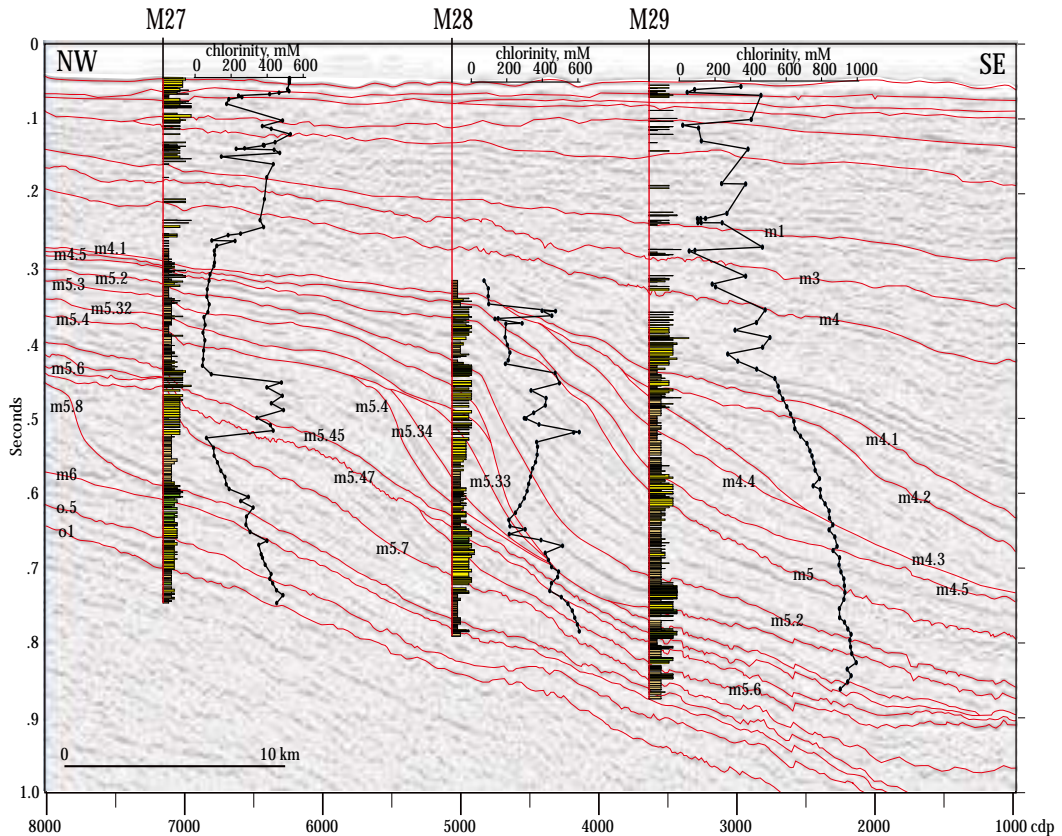


図5 Exp.313 で得られたコア間隙水のCl濃度分布 (Mountain *et al.*, 2010).

海岸だけでなくスリナムの沖合などでも発見されており、日本では東京湾下や幌延の沿岸海底下などに淡水性の地下水が発見されている。このように、過去に陸化した堆積性の沿岸海底下には淡水性の地下水が広く賦存している可能性が指摘されており、本研究航海で得られた知見は、沿岸域における水・物質循環と海水準変動の関係の解明に大きく寄与するものである。

参考文献

- [1] Ando, H. *et al.* in press : IODP Exp. Rep.
- [2] Cohen, D. *et al.* (2010) : *Groundwater*, 48, 143-158.
- [3] Hathaway, J. C., *et al.* (1979) : *Science*, 206, 515-527.
- [4] Inwood *et al.* (2013) : *Geosphere*, 9, 1025-1043, doi:10.1130/GES00913.1
- [5] Kooi, H. and Groen, K. (2001) : *J. Hydrol.*, 246, 19-35.
- [6] Lofi, *et al.* (2013) : *Geosphere*, 9, 1009-1024, doi: 10.1130/GES00855.1
- [7] Miller, K. G. *et al.* (2011) : *Oceanography*, 24, 40-53, doi:10.5670/oceanog.2011.26
- [8] Miller, K. G. *et al.* (2013a) : *Geosphere*, 9, doi: 10.1130/GES00858.1
- [9] Miller, K. G. *et al.* (2013b) : *Geosphere*, 10, doi: 10.1130/GES00884.1.
- [10] Mountain, G. S. *et al.* (1994) : *Proc. ODP, Init. Repts.*, 150, College Station, TX (ODP). doi:10.2973/odp.proc.ir.150.1994
- [11] Mountain, G. S. *et al.* (2010) : *Proc. IODP, Exp. 313. tokyo* (IODP Manage. Internat., Inc.), doi: 10.2204/iodp.proc.313.2010.
- [12] Sheridan, R. E. and Grow, J. A. eds. (1988) : *U. S. Geol. Soc. Amer.*, Boulder, CO.
- [13] van Geldern, R. *et al.* (2013) : *Geosphere*, 9, 96-112, doi:10.1130/GES00859.1.
- [14] Wilgus *et al.* (1988) : *Soc. Econ. Paleont. Mineral., Spec. Publ.*, no. 42, 407p.

