



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

# Expedition 308 : Gulf of Mexico Hydrogeology

山 本 由 弦

Expedition 308 : Gulf of Mexico  
Hydrogeology

Yuzuru Yamamoto

やまもと ゆづる : 海洋研究開発機構  
地球内部ダイナミクス領域

IODP Exp. 308 において採取された海底地すべり堆積物は、地すべりの活動によって粒子の回転とそれに付随する堆積物の透水係数の減少が起こり、実測された海底地すべり内部の高間隙水圧の形成に貢献していることが明らかになった。透水層上に不透水層が非対称にかつ非常に早く堆積した結果、透水層内部で間隙水の側方移動が起こり、有効応力が低下する。これにより海底地すべりが誘発されたと同時に、形成された地すべりそのものがさらなる不透水層として機能し、その後のさらなる斜面不安定性の要因になっている可能性がある。

## 1. はじめに

IODP Exp. 308 の主目的は、米国メキシコ湾の Ursa Basin において、ミシシッピ川海底谷の東側レビーを掘削し、透水層上に非常に早く不均質な堆積作用が起こった際にどのように間隙水の側方流動と異常間隙水圧が生じ、海底地すべりが生じるのかを検討するものであった。異常間隙水圧ゾーンを掘削するために IODP 史上初めて掘削泥水が用いられたほか、ペネトロメーターを使用して現位置の間隙水圧を直接測定するなど、挑戦的な航海であった。計測された間隙水圧は、レビー上方 (サイト U1324) で有効応力の 60% に、下方 (サイト U1322) で 70% に達していた (Flemings *et al.*, 2008)。土質力学モデルを用いた間隙水圧の減衰計算では、サイト U1324 では側方への排水が、サイト U1322 では側方からの流入が、観測された間隙水圧を達成するために必要であることが明らかになった。掘削海域のレビー堆積物直下に分布する透水層での側方流動が最も有力なメカニズムとして考えられた。海底面近傍で発生する高間隙水圧は、斜面安定性を減じ、巨大な海底地すべりを誘発する。ここでは、これらの機構から生じた海底地すべりのファブリックおよび物性に関する研究を紹介する。なおこの研究は、すでに Yamamoto and Sawyer (2012) として報告している。

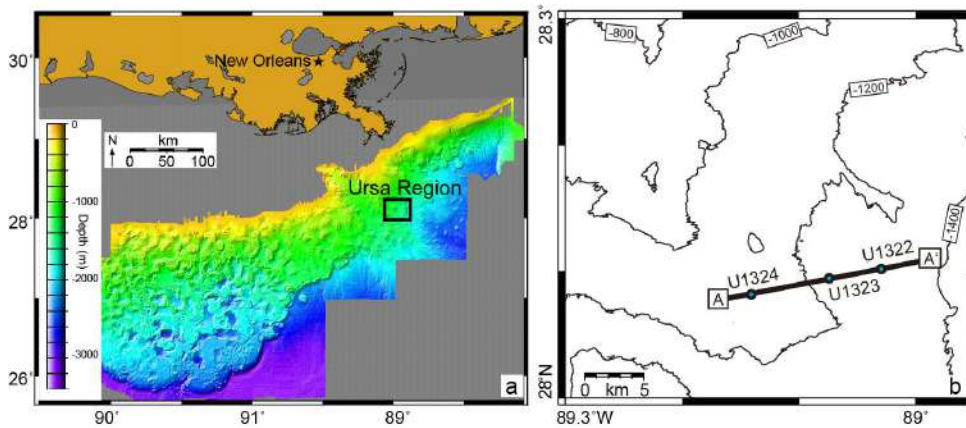


図1 a) メキシコ湾のミシシッピ川海底谷のチャンネルレピーシステム東部にあたるUrsa地域のインデックスマップ。四角部分の拡大がb. b) 掘削サイトを示した等深線図。

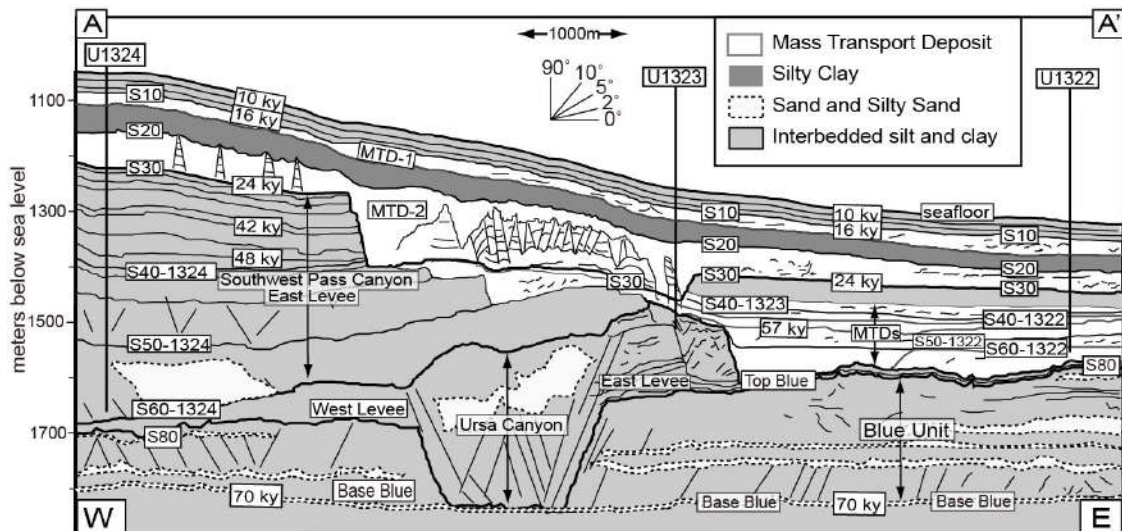


図2 図1bのA-A'測線の断面図 (Sawyer *et al.*, 2009 に加筆) と掘削サイト位置. 海底地すべり堆積物 (MTD) が、レピーの細粒堆積物層準に多く発達している. サイトU1323 では、掘削が行われていない.

## 2. 地質概説

Ursa Basin は、米国ルイジアナ州ニューオリンズの南東約 210 km に位置する、ミシシッピ川海底谷のチャンネルレピーシステムの東側をなす水深 800 m から 1500 m の領域である (図 1)。上部更新統のミシシッピファン堆積物で構成される Ursa Basin 堆積物は、Eastern Depositional Complex (たとえば Coleman and Roberts, 1988 ; McFarlan and

LeRoy, 1988) と呼ばれるシステムの一部を成している。この地域の更新世後期の非常に早い堆積速度 (3–10 mm/年) により、堆積物中に異常間隙水圧と海底地すべりが発生している (Flemings *et al.*, 2006, 2008 ; Dugan and Germaine, 2008)。

Ursa Basin 浅部 (1000 mbsf 以浅) は、Blue Unit と呼ばれる透水層、2つのチャンネルレピーシステム、それに数多くの海底地すべり堆積物で構成されている (図 2)。この Blue Unit が、この地域

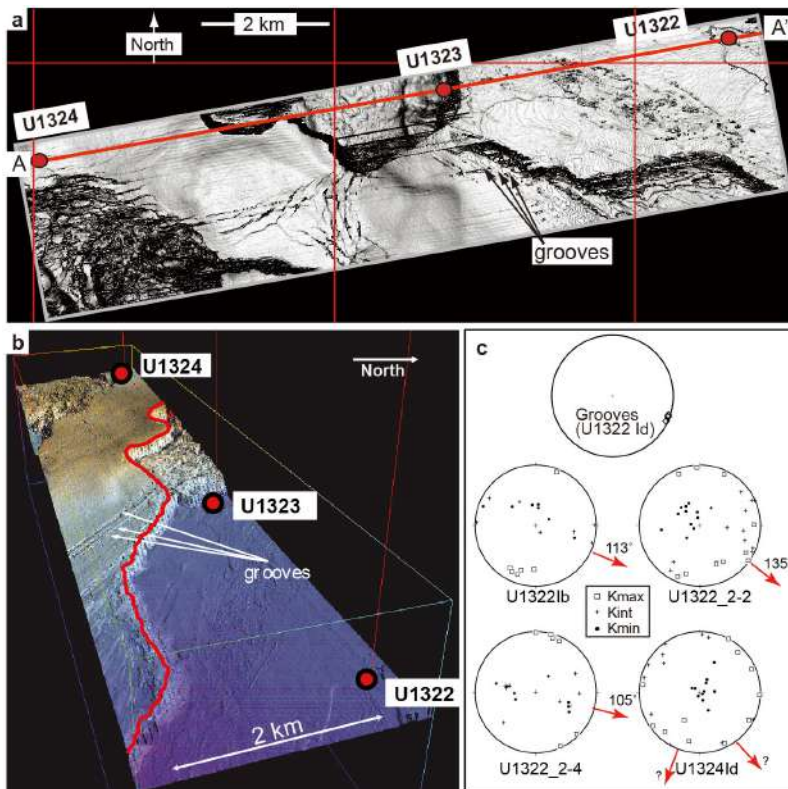


図3 a) 図2のMTD-2下底面に相当する反射面S30のディップマップ (Sawyer *et al.*, 2009). 海底地すべりの崩落崖と擦痕が見られる。b) 崩落崖 (赤線) と擦痕を示した鯨観図。c) 海底地すべり堆積物の擦痕および帯磁率楕円帯の姿勢を示したステレオプロット (下半球投影)。赤い矢印は、帯磁率楕円帯の姿勢から判断された地すべりの滑動方向。擦痕の方向とよく一致している。

の流体移動をコントロールする原因として注目されている (Ostermeier *et al.*, 2002)。Blue Unit は、2つのチャンネルレベシステムによって覆われ、削り込まれている (Sawyer *et al.*, 2007)。このレベ堆積物には多くの海底地すべり堆積物が含まれ、地震波断面では半透明の乱れた層準として追跡できる (図2; Sawyer *et al.*, 2009)。コアおよび検層では、この海底地すべり堆積物が周辺整然層に比べて小さい間隙率と高い抵抗値で特徴付けられることが判明している (Dugan *et al.*, 2007; Sawyer *et al.*, 2009)。

### 3. 海底地すべり堆積物の変形と物性

Ursa 地域で見られる海底地すべり堆積物は、地震波断面では地すべり堆積物そのものの小さな振幅と地すべり下面で高い振幅で特徴付けられ、乱雑な様相もしくは不連続な地層として確認される (Sawyer *et al.*, 2009; 図2)。サイト U1322とU1324

で採取されたコアスケールからは、傾いたもしくは歪んだ地層 (contorted layer) と攪拌されて均質化された堆積物が確認された。前者は、海底地すべり堆積物の上部を構成している一方で、後者は最下部を構成している傾向がある。海底地すべりの下面では、北西-南東方向の運動方向を示す察痕が報告されている (Sawyer *et al.*, 2009; 図3)。

比抵抗プロファイルでは、海底地すべり層準上部では下部に向かってゆるやかな増加を示し、最下部では下位の整然層との間で急落する (図4)。間隙率は、上部では下部に向かってゆるやかな減少を示し、最下部では下位の整然層との間で明瞭なギャップを示す。これらのデータは、海底地すべり堆積物が周囲の整然層に比べて密度が大きいことと、地すべり堆積物最下部が最も高密度化され、最下部の強い地震波反射面をもたらしていることを示している。

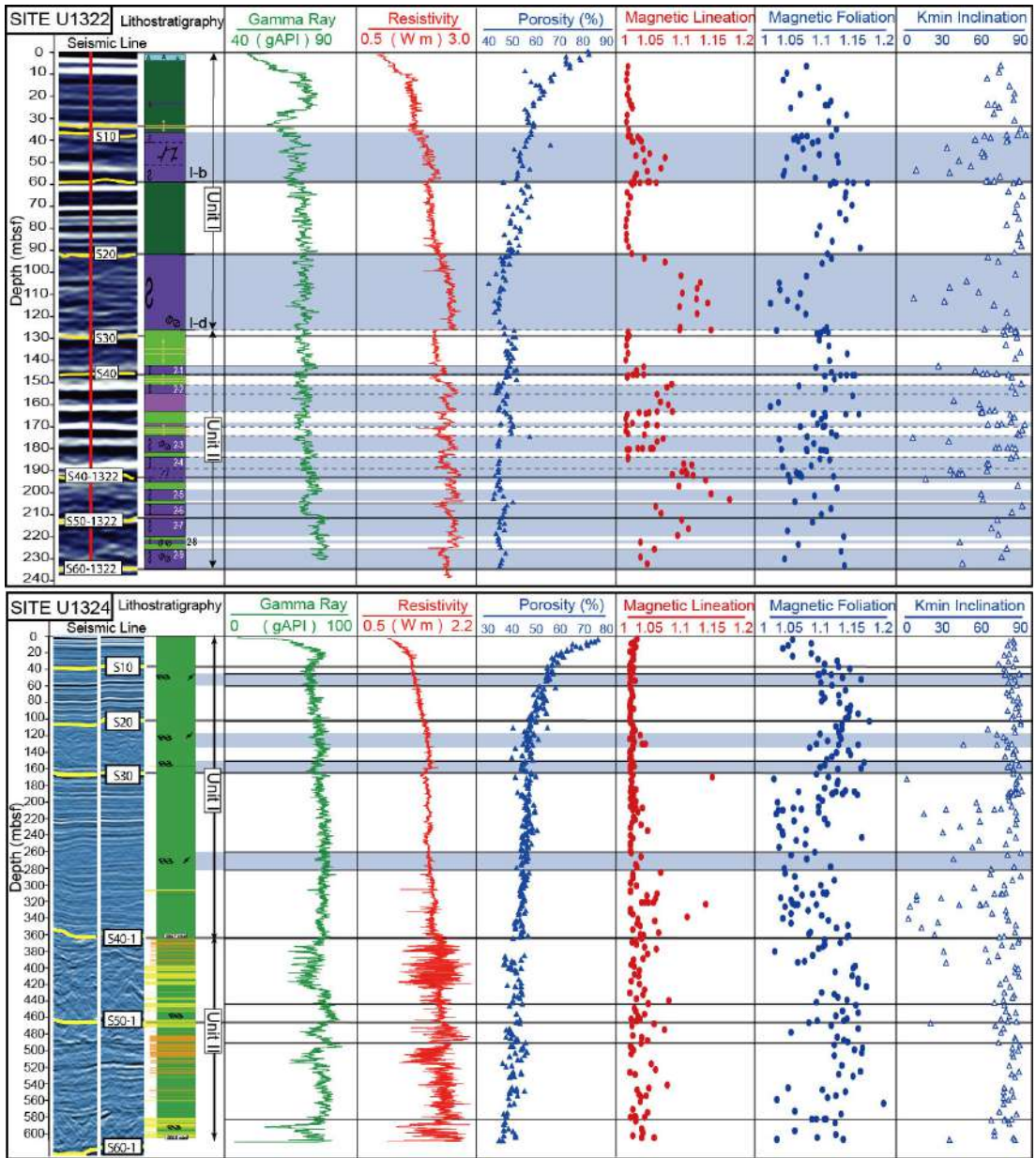


図4 サイトU1322(上図), U1324(下図)における検層および帯磁率異方性データのプロフィール. 検層(ガンマ線強度, 比抵抗)と間隙率データは, Flemings *et al.* (2006) から引用. 青色の塗りつぶし部分は, 海底地すべり堆積物に相当.

#### 4. 海底地すべりのファブリック

##### 4-1. サンプルングおよび手順

帯磁率異方性測定のための試料は, 砂層を避

け, 粘土および泥質の層準から採取した. 最も一般的な未固結堆積物のサンプルング方法は, 帯磁率異方性をはじめとする岩石磁気学測定の機器にそのまま使用できるプラスチックキューブ (7 cc)

をコアに直接挿入し採取することであるが、キューブ壁面との摩擦によりファブリックを破壊してしまうおそれがある。これを最小限にとどめるために、以下の方法を採用した。半割されたコア表面に船上に用意されている10 ccチューブ(内径約30 mm)を挿入し、試料を定方位で採取する。チューブは金属用はさみで切ると簡単に割れるので、試料を慎重に取り出し、円柱形試料の周辺と上端、下端をワイヤーソーでカットし、先述のプラスチックキューブの内径よりもわずかに小さい18-20 mm角の立方体を作成する。この立方体をプラスチックキューブにセットし、帯磁率異方性測定を行った。測定は、独立行政法人産業技術総合研究所所有のKLY-4 Kappabridgeを使用した。

測定を終えた試料を用いて走査型電子顕微鏡(SEM)観察を行った。試料は、多くが未固結の粘土質堆積物であるので、自然乾燥では組織が破壊されてしまう。そこで、試料中の間隙水をエタノールに置換した後、さらに第三ブチルアルコールに置換し、凍結乾燥(Takizawa *et al.*, 1995)を行った。

#### 4-2. 結果

測定試料の帯磁率は、 $9.78 \times 10^{-5}$  to  $1.23 \times 10^{-3}$  SIを示し、埋没深度とともに上昇していく傾向を示した。これは、間隙率が深度とともに減少していくため、単位体積あたりに含まれる磁性鉱物の量が増えるためである。しかし、構造や岩相による帯磁率の違いは認められなかった。Franke *et al.* (2009)は、陸源の鉄酸化物が岩石磁性のキャリアとなっていることを報告している。

整然層の帯磁率異方性のうち帯磁率線構造( $K_{max}/K_{int}$ :最大/中間帯磁率)は、小さい値(ほぼ1)を示し、 $K_{max}$ 方向がランダムであることを示している(図4)。海底表層数10 mでは、帯磁率面構造( $K_{int}/K_{min}$ :中間/最小帯磁率)が間隙率の減少とともに増加している。また整然層では、 $K_{min}$ の傾斜がほぼ90度である。これらのデータは、整然層のファブリックが圧密に支配されていることを示している。一方海底地すべり堆積物は、大きな帯磁率線構造、小さな帯磁率面構

造、それに $K_{min}$ の傾斜が整然層のそれと比べて乱れていることが特徴としてあげられる。サイトU1322では、帯磁率面構造の強度が海底地すべり堆積物上部で徐々に増加しているのに対して、地すべり堆積物最下部とその下位の整然層との間で急落している。サイトU1324で認められる海底地すべり堆積物のいくつかは、岩相解析と地震波断面の解析からサイトU1322のそれらと対比されるが、整然層と地すべり堆積物の帯磁率楕円帯の形状差異は、サイトU1322に比べて非常に限定的である。同様の傾向は、間隙率、ガンマ線強度、それに比抵抗値でも確認される。

帯磁率楕円帯の姿勢は、航海中の古地磁気データ(Flemings *et al.*, 2006)によって現位置に補正した。その結果、 $K_{max}$ の方向は北北東-南南西から北東-南西方向または北東-南西方向のガードル分布を示した(図3c)。一方 $K_{min}$ と $K_{int}$ は、西北西-東南東から北西-南東方向のガードル分布を示している。

SEMによるファブリック観察では、コア試料は板状の粘土鉱物粒子とシルト粒子で構成されていること、整然層と海底地すべり堆積物は、構成している粒子サイズと粘土粒子の含有量が異なることが見いだされた(図5)。これらは、粒子サイズ解析の結果(Sawyer *et al.*, 2008)と調和的である。整然層のファブリックは、地層面に平行な面構造で特徴づけられ、帯磁率異方性でも認められたように圧密によって形成された組織と考えられる(図5a, d)。サイトU1322の海底地すべり堆積物は、地層面に平行および斜交する強い面構造で特徴づけられる(図5b, c)。ほとんどの場合、地層面に平行な面構造が斜交する面構造を切って変位させており、これらの面構造がS-C構造であることを示している。サイトU1324の海底地すべりには、弱く面構造が発達している(図5e, f)。

## 5. まとめ

整然層で確認された弱い帯磁率線構造と相対的に強い面構造、それに地層面に直交する $K_{min}$ (図4)は、粘土質堆積物の圧密組織を反映している。

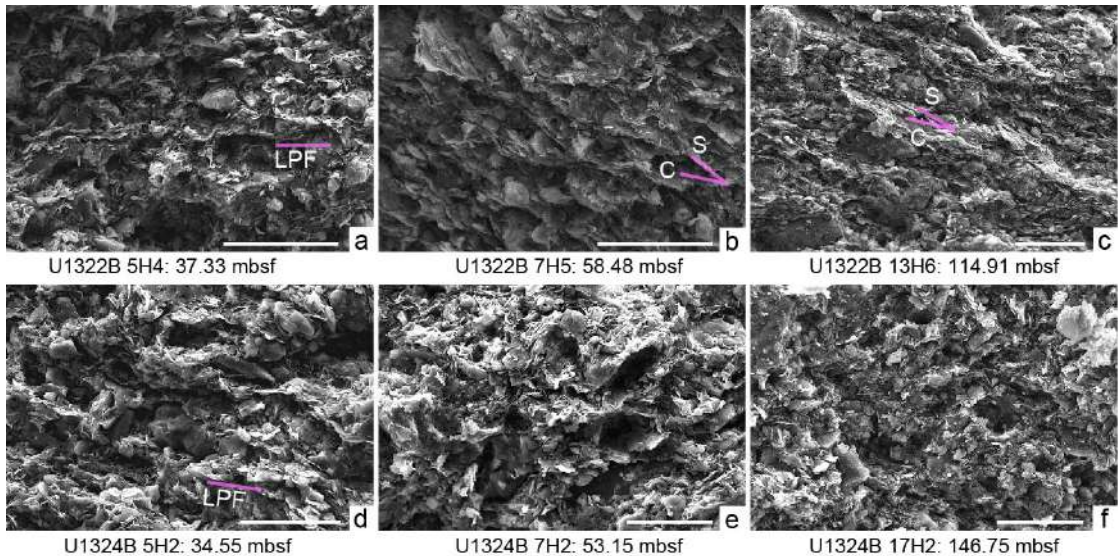


図5 整然層 (a, d) および海底地すべり堆積物 (b, c, e, f) の電子顕微鏡画像。a-c: サイトU1322; d-f: サイトU1324。スケールバーは、20  $\mu\text{m}$ 。整然層は地層面に平行な圧密組織が特徴的なものに対し、海底地すべり堆積物はS-C構造が確認される。LPF: Layer parallel foliation。

同様の組織は、SEM 観察でも確認された (図 5)。対照的に、海底地すべり堆積物では、非常に明瞭な帯磁率線構造の増加、面構造の減少、Kmin の傾きの減少が見られた。これらのプロファイルは、各種の検層データと一致し、これらの変化が海底地すべりの活動に伴う粒子の回転による物性変化に対応していることを示している。

変動が見られたパラメータの中でも帯磁率線構造は、非常に敏感である。サイト U1322 の海底地すべり堆積物は、強い S-C 構造と強い帯磁率線構造を示す一方、サイト U1324 のそれらは弱い剪断組織と弱い帯磁率線構造を伴う (図 4, 5)。サイト U1324 は、レビーの最上部付近に位置し、海底地すべり上端付近に相当するのに対し、サイト U1322 は地すべり末端付近に相当する。そのため、前者が海底地すべりの直前もしくはすべり始めの組織を記録しているのに対し、後者は長距離移動に伴う大きな歪みを記録していると考えられる。

古地磁気データをもとに補正された帯磁率楕円帯の方向は、Kmax が北北東-南南西から北東-南西方向または北東-南西方向のガードル分布、

Kmin と Kint が西北西-東南東から北西-南東方向のガードル分布であった (図 3c)。帯磁率楕円帯の分布とタービダイトの流行方向の関係を示した実験 (Taira, 1989) と比較すると、海底地すべりは東南東もしくは南東方向に活動したと考えられ、地すべり岩体底面の擦痕方向と一致する。

海底地すべり岩体の上部で帯磁率線構造と間隙率がそれぞれ徐々に増加、減少するのは、すべりに伴う剪断帯が徐々に上方に移動していることを示していると考えられる。一方、地すべり岩体の最下部と下位の整然層の間で帯磁率線構造と間隙率がそれぞれ急激にほぼもとの値に戻るの、海底地すべり下面に大きな力学的かい離 (mechanical decoupling) が生じていることを示している。海底地すべり岩体の上位と下位の岩相に違いがないことから、このかい離は流体圧によって発生した可能性がある。

海底地すべりの活動による未固結堆積物中の粒子の回転は、大きな間隙を破壊し、その結果変形した堆積物は圧密し、透水係数が小さくなる (Yamamoto, 2006)。このように透水係数が剪断に

よる粒子の回転によって規制されているならば、流体圧は海底地すべり岩体の直下または内部で上昇することが考えられる。この流体圧の上昇が、地すべり岩体の不安定性をもたらすほか、力学的かい離の発達、そして地すべり岩体の再活動を誘発する可能性がある。このようなフィードバックによって、海底地すべり岩体の剪断帯の肥大化と巨大な地すべり岩体の形成が促進されると考えられる。

## 6. おわりに

本航海で実測された高間隙水圧は、海底地すべり岩体の内部で観測されている。透水層上に不透水層が非対称にかつ非常に早く堆積した結果、透水層内部で間隙水の側方移動が起こり、有効応力が低下することで海底地すべりが誘発される (Flemings *et al.*, 2008) とともに、海底地すべり堆積物内部で生じる粒子の回転およびそれに付随する堆積物の透水係数の減少が、その後さらなる斜面不安定性の要因になっている可能性がある。

本航海で検討された海域は、非活動的縁辺域であるが、レビー断面のくさび形形状やその下位に存在する透水層のジオメトリーは、紀伊半島沖南海付加体のそれと類似している。付加関連断層のないシンプルジオメトリーとしてこの Exp. 308 の成果をとらえると、付加型沈み込み帯における水理学上の比較対象として興味深い。

## 参考文献

[ 1 ] Coleman JM, Roberts HH (1988) Late Quaternary Depositional Framework of the Louisiana Continental Shelf and Upper Continental Slope, *Trans GCAGS* 38 : 407-419.  
[ 2 ] Dugan B, Flemings PB, Urgeles R, *et al.* (2007) Physical properties of mass transport complexes in the Ursa Region, northern Gulf of Mexico (IODP Expedition 308) determined from log, core, and seismic data, OTC 18704. Offshore Technology Conference : Houston, TX, 1-13.  
[ 3 ] Dugan B, Germaine JT (2008) Near-seafloor overpressure in the deepwater Mississippi Canyon, northern Gulf of Mexico. *Geophys Res Lett* 35 : L02304, 10.1029/2007GL032275.  
[ 4 ] Flemings PB, Behrmann JH, John CM, Exp 308 Scientists (2006) Gulf of Mexico Hydrogeology. In : Flemings PB, Behrmann JH, John CM (ed) Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program 308 : College Station TX,

Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.

[ 5 ] Flemings PB, Long H, Dugan B, *et al.* (2008) Pore pressure penetrometers document high overpressure near the seafloor where multiple submarine landslides have occurred on the continental slope, offshore Louisiana, Gulf of Mexico. *Earth Planet Sci Lett* 269 : 309-324 doi:10.1016/j.epsl.2008.1006.1027.

[ 6 ] Franke C, Fu Y, Heslop D, von Dobeneck T (2009) Data report : natural remanent magnetization of IODP Holes U1319A, U1320A, U1322B, and U1324B and magnetic carrier identification by scanning electron microscopy. In : Flemings PB, Behrmann JH, John CM, Expedition 308 Scientists Proc. IODP 308 : College Station TX, Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.

[ 7 ] McFarlan E, LeRoy DO (1988) Subsurface geology of the Late Tertiary and Quaternary deposits, coastal Louisiana, and the adjacent continental shelf. *Trans Gulf Coast Assoc Geol Soc* 38 : 421-433.

[ 8 ] Ostermeier RM, Pelletier JH, Winker CD, Nicholson JW, Cowan CK (2002) Dealing with Shallow-Water Flow in the Deepwater Gulf of Mexico. *Leading Edge* 660-668.

[ 9 ] Sawyer DE, Flemings PB, Dugan B, Germaine JT (2009) Retrogressive failures recorded in mass transport deposits in the Ursa Basin, Northern Gulf of Mexico. *J Geophys Res* 114: B10102, doi:10.1029/2008JB006159.

[10] Sawyer DE, Flemings PB, Shipp RC, Winker CD (2007) Seismic geomorphology, lithology, and evolution of the late-Pleistocene Mars-Ursa turbidite region, Mississippi Canyon area, northern Gulf of Mexico. *AAPG Bulletin* 91 : 215-234 doi: 10.1306/08290605190.

[11] Sawyer DE, Jacoby R, Flemings PB Germaine JT (2008) Data report: particle size analysis of sediments in the Ursa Basin, IODP Expedition 308 Sites U1324 and U1322, northern Gulf of Mexico. In : Flemings PB, Behrmann JH, John CM, Expedition 308 Scientists Proc. IODP 308 : College Station TX, Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.

[12] Taira A. (1989) Magnetic fabrics and depositional processes. In : Taira A, Masuda F, (ed) *Sedimentary Facies in the Active Plate Margin*. TERRAPUB, Tokyo, 619-630.

[13] Takizawa S, Kawata T, Ohno Y (1995) A method of fixation and freeze drying of soft sediments containing water. *J Geol Soc Jpn* 101 : 941-944.

[14] Yamamoto Y (2006) Systematic variation of shear-induced physical properties and fabrics in the Miura-Boso accretionary prism: The earliest processes during off scraping. *Earth Planet Sci Lett* 244: 270-284 doi: 10.1016/j.epsl.2006.01.049.

[15] Yamamoto, Y., and Sawyer, D., E., 2012. Systematic variation of fabric and physical properties in mass transfer deposits in the Ursa region, Northern Gulf of Mexico. In Yamada, Y., *et al.* (eds) *Submarine Mass Movements and Their Consequences. Advances in Natural and Technological Hazards Research Series* 31, 649-658, doi: 10.1007/978-94-007-2162-3\_58, Springer Science+Business Media.

